



Universidade Federal do Ceará

Rubens Fernandes Nunes

*Usando Vibrações Naturais na Descrição e no
Controle de Locomoções Fisicamente Simuladas de
Personagens Articulados Arbitrários*

Fortaleza, Ceará

2012

Rubens Fernandes Nunes

***Usando Vibrações Naturais na Descrição e no
Controle de Locomoções Fisicamente Simuladas de
Personagens Articulados Arbitrários***

Tese apresentada ao Departamento de
Computação da Universidade Federal do
Ceará como requisito parcial para obtenção do
título de Doutor em Ciência da Computação.

Orientadores:

Joaquim Bento Cavalcante Neto

Creto Augusto Vidal

Orientadores Externos:

Victor B. Zordan (UCR, EUA)

Paul G. Kry (McGill, Canadá)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO
MESTRADO E DOUTORADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CRAB - COMPUTAÇÃO GRÁFICA, REALIDADE VIRTUAL E ANIMAÇÃO

Fortaleza, Ceará

2012

Resumo

A animação de personagens virtuais é uma das áreas mais fascinantes em computação gráfica pelo fato de estar diretamente relacionada à manifestação de vida em um ambiente virtual. Entretanto, mesmo envolvendo pesquisa em diferentes áreas, tais como biomecânica, robótica, dinâmica, inteligência artificial e otimização, e sendo bastante incentivada pelas indústrias cinematográficas e pelas indústrias de jogos, gerar ferramentas de animação capazes de produzir locomoções realistas para personagens arbitrários, de maneira automática, é extremamente difícil, e muita pesquisa ainda é necessária.

Simular a física presente no mundo real e entender como animais utilizam seus próprios aspectos físicos para se locomover é de fundamental importância para animar tais personagens arbitrários de maneira natural, já que capturar movimentos nem sempre é possível. Particularmente, esse problema se destaca ainda mais quando se deseja gerar locomoção para animais extintos ou completamente fictícios. De fato, é intuitivo que existe alguma relação entre a forma de um animal e a maneira como ele se locomove. Por outro lado, gerar locomoção usando abordagens dinâmicas é bastante desafiador porque a qualidade visual e o estilo da locomoção estão integralmente associados ao papel básico do controlador em fazê-la funcionar.

Este trabalho propõe um método de descrição e de controle de locomoções, baseado na hipótese que animais reais exploram suas estruturas elásticas passivas através de excitações internas correspondentes às suas vibrações naturais de mais baixas frequências, para se locomover de maneira energeticamente eficiente. Disponibilizando uma paleta composta pelos modos naturais de vibração do próprio personagem simulado, uma interface visual permite que o animador guie a locomoção final através da seleção e da combinação interativa dessas vibrações. A partir do esboço da locomoção fornecido pelo animador, uma otimização baseada em simulação é realizada sobre os parâmetros do controlador a fim de produzir automaticamente uma locomoção cíclica e fisicamente correta, considerando o efeito da gravidade e a influência do chão. Essa decomposição modal da dinâmica do personagem permite que a locomoção seja definida em um espaço de controle reduzido e dinamicamente independente, o que facilita o processo de otimização. Como resultado, o sistema de animação proposto consiste em uma ferramenta útil de controle, capaz de produzir uma grande variedade de estilos de locomoção para personagens articulados arbitrários, com diferentes morfologias.

Sumário

Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	xiii
1 Introdução	1
1.1 Problema	1
1.2 Motivação	5
1.3 Contribuições	11
1.4 Estrutura da Tese	12
2 Conceitos e Definições	13
2.1 Introdução	13
2.2 Personagens Virtuais	13
2.2.1 Estruturas Articuladas	13
2.2.2 Estruturas Articuladas Fisicamente Simuladas	14
2.2.3 Estruturas Articuladas Atuadas	17
2.2.4 Controladores	18
2.3 Controladores PD para Juntas 3D	21
2.3.1 Representação de Orientações 3D	22
2.3.2 Sistemas de Coordenadas 3D	24
2.3.3 Orientações 3D das Juntas	26
2.3.4 Relação Força/Rigidez/Deslocamento	29
2.3.5 Controladores PD para Juntas Esféricas	30

2.3.6	Definindo uma Pose de Relaxamento do Personagem	32
2.4	Análise Modal	34
2.4.1	Movimentos Harmônicos Simples	34
2.4.2	Sistemas com Múltiplos Graus de Liberdade	36
2.4.3	Análise Modal para Estruturas Articuladas	40
2.4.4	Calculando as Matrizes para Estruturas Articuladas	43
2.5	Considerações Finais	49
3	Trabalhos Relacionados	50
3.1	Controladores de Locomoção	50
3.1.1	Controladores Projetados Manualmente	50
3.1.2	Controladores Gerados por Otimização	58
3.1.3	Controladores Guiados por Dados de Movimento	65
3.2	Componentes Elásticos Passivos	67
3.3	Modos de Vibração	70
4	Técnica Proposta	72
4.1	Introdução	72
4.2	Estrutura do Controlador	73
4.2.1	Controlador Básico de Locomoção	74
4.2.2	Modos Naturais de Vibração	76
4.2.3	Estrutura Elástica Passiva	78
4.3	Construção do Esboço da Locomoção	81
4.4	Otimização	87
4.4.1	Problema de Otimização	87
4.4.2	<i>Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy</i>	91
4.4.3	<i>Method of Multipliers</i>	93

4.4.4	Restrições Fáceis	95
4.5	Considerações Finais	99
5	Resultados e Discussões	101
5.1	Introdução	101
5.2	Exemplo Básico de Locomoção	102
5.3	Diferentes Estilos de Locomoção	106
5.3.1	Balanço Lateral	107
5.3.2	Rotação Vertical	109
5.3.3	Saltitar	111
5.3.4	Estilos de Locomoção Aleatórios	112
5.4	Diferentes Poses Neutras	115
5.4.1	Agachado	115
5.4.2	Pernas Afastadas	116
5.4.3	Em Um Pé Só	118
5.5	Diferentes Personagens	119
5.5.1	Monstro Bípede	119
5.5.2	Canguru	122
5.6	Diferentes Variações da Técnica Proposta	123
5.6.1	Base Utilizada para Representar os Torques	124
5.6.2	Modos Permitidos	126
5.7	Aspectos de Implementação	127
5.7.1	Simulação Dinâmica	128
5.7.2	Detecção de Colisões	129
5.7.3	Otimização	129
5.7.4	Equilíbrio	130
5.8	Considerações Finais	131

Sumário

v

6 Conclusão e Trabalhos Futuros

134

Referências Bibliográficas

138

Lista de Figuras

1.1	Comparação entre distintas locomoções (chita vs. elefante).	2
1.2	Comparação entre locomoções associadas a diferentes anatomias (humano vs. canguru).	2
1.3	Comparação entre forma e locomoção de animais extintos e/ou fantasiosos. Entender essa associação é de claro interesse, principalmente nesses tipos de personagens, tais como os usados nos filmes <i>Jurassic Park</i> e <i>Avatar</i>	3
1.4	No jogo <i>Spore</i> , o jogador pode criar personagens arbitrários, através de um editor interativo, para povoar um mundo virtual, que podem ter suas próprias morfologias.	4
1.5	Por menos intuitivo que possa parecer, elementos elásticos passivos estão presentes em todo tipo de estrutura, como por exemplo pontes, prédios e estruturas articuladas.	7
1.6	Tornozelo e pulso humanos. Quando relaxados em posições adequadas, fica fácil perceber seus efeitos passivos, semelhantes a efeitos de molas.	7
1.7	<i>Principal Component Analysis (PCA)</i> aplicado às poses de um caminhar humano capturado [Jain e Liu 2011]. Esquerda: Oscilações de baixas frequências predominam nos três primeiros componentes principais. Direita: Oscilações de altas frequências possuem maior influência nos três últimos componentes principais. Note que, para permitir uma melhor ilustração, as escalas usadas nos eixos verticais são diferentes nos dois gráficos.	9
2.1	(a) $q(t)$ representa o estado do personagem em cada instante t . (b) Algumas curvas de movimento capturado de um caminhar humano.	14
2.2	Animação gerada através do uso de simulação física.	16
2.3	O controlador é responsável por calcular os torques internos a serem aplicados pelos atuadores do sistema, durante a simulação física.	19
2.4	Mola com amortecimento agindo em uma junta.	21

2.5	(a) junta dobradiça (<i>hinge</i>). (b) junta esférica (<i>ball and socket</i>).	21
2.6	Mudança entre sistemas de coordenadas. ($\mathbf{R}_a = {}^g_a\mathbf{R}$, $\mathbf{R}_b = {}^g_b\mathbf{R}$ e $\mathbf{R} = {}^b_a\mathbf{R}$).	24
2.7	Sistema de coordenadas local de um corpo.	26
2.8	Sistema de coordenadas local da junta alinhado ao sistema de coordenadas local do corpo pai.	28
2.9	Caso mais geral do sistema de coordenadas local da junta, não alinhado ao sistema de coordenadas local do corpo pai.	28
2.10	Personagem humanoide 3D em uma pose específica. Nesse caso, a pose escolhida mostrada corresponde tanto a sua pose de relaxamento quanto a sua pose nula de referência. Cada corpo possui uma orientação específica, dada em coordenadas globais. Os quadros à direita da figura correspondem à mesma pose, mas mostradas de pontos de vista diferentes. (a) vista frontal. (b) vista oblíqua.	33
2.11	Exemplo de movimento harmônico simples.	34
2.12	Gráfico da função correspondente à Equação 2.17, mostrando a influência do valor de ξ_i na i -ésima vibração. Nesse exemplo, temos que: $A_i = 1$, $f_i = 1$, $\omega_i = 2\pi$ e $\varphi_i = \pi/2$	39
3.1	(a) Resultados de animação com controladores de personagens simplificados obtidos em [Raibert e Hodgins 1991]. (b) Resultados usando personagens humanos 3D obtidos em [Hodgins et al. 1995].	52
3.2	Um exemplo de PCG utilizado para simular um personagem humanoide caminhando [Laszlo et al. 1996].	54
3.3	Esquema de equilíbrio SIMBICON [Yin et al. 2007].	55
3.4	Aplicação de forças virtuais, através da transposta da matriz Jacobiana, no centro de massa do personagem para controlar sua velocidade, e em um determinado corpo para compensar seu peso correspondente, devido à ação da gravidade [Coros et al. 2010].	57
3.5	Exemplo de discretização da trajetória, necessária para a formulação do problema de otimização proposto no método <i>spacetime constraints</i> [Witkin e Kass 1988].	62

3.6	Exemplos de robôs dinâmicos projetados para caminhar passivamente em superfícies levemente inclinadas [Collins et al. 2005].	67
3.7	Robôs dinâmicos constituídos por componentes passivos apropriadamente projetados são capazes de caminhar em superfícies retas com pouca influência ativa [Collins et al. 2005].	68
3.8	Exemplos de um robô dinâmico elástico “bípede” projetado para correr passivamente em uma superfície levemente inclinada [Owaki et al. 2012].	69
4.1	Uma visão geral do método proposto para a construção do controlador: (a) especificação do personagem e definição da pose de relaxamento; (b) análise modal e definição das paletas de modos de locomoção; (c) especificação dos modos para construção do esboço de locomoção; (d) esboço da locomoção; e (e) otimização do controlador para obtenção automática da locomoção final.	73
4.2	Controlador básico de locomoção definido para um personagem monópode. A partir de um determinado estado inicial do personagem, os torques definidos na fase do ar, τ^a , são aplicados durante δ^a segundos. Em seguida, após completados αT segundos, os torques definidos na fase do chão, τ^c , são aplicados durante δ^c segundos. Após completado o período total de um ciclo, T segundos, o controlador repete sua execução. Note que, já que os torques aplicados são definidos por vetores, para simplificar a ilustração, apenas uma versão escalar do trem de pulsos é mostrada.	75
4.3	Postura neutra humana. Os ângulos mostrados correspondem a valores médios. Valores entre parênteses são desvios padrões. Os dados mostrados foram obtidos a partir de estudos realizados na estação espacial americana Skylab, e são baseados nas medidas de doze diferentes pessoas [NASA 2012].	80
4.4	Analogia entre uma aquarela de pintura e a interface proposta para a construção do esboço da locomoção. Os modos naturais de vibração do personagem especificado pelo animador são disponibilizados na forma de uma paleta de movimentos básicos, apropriados à geração de locomoção eficiente para esse personagem específico. Dados da obra artística mostrada como ilustração: Abaporu, Tarsila do Amaral, 1928, óleo sobre tela.	84

- 4.5 Intervenção do animador na construção do esboço da locomoção desejada. A interface proposta funciona como uma ponte entre a ideia abstrata da locomoção desejada, na mente do animador, e a representação virtual dessa ideia, definida através do esboço gerado. Ao mostrar as animações dos modos naturais de vibração do personagem, essa interface disponibiliza portanto uma maneira intuitiva de o animador traduzir sua ideia de locomoção desejada, discretizando-a na forma de uma combinação linear dessas vibrações. 85
- 4.6 Processo iterativo da atualização da distribuição Gaussiana [CMA-ES 2012]. Em cada iteração, primeiramente uma amostragem randômica é realizada, baseada na distribuição Gaussiana atual (esquerda). Em seguida, as melhores amostras, avaliadas de acordo com a função objetivo, são escolhidas e usadas para estimar uma nova distribuição Gaussiana (meio). A nova Gaussiana torna-se então a Gaussiana atual, a ser utilizada na próxima iteração (direita). As linhas pontilhadas indicam que a função objetivo ilustrada diminui linearmente em direção ao canto superior direito. A média da Gaussiana é indicada por uma cruz. 92
- 4.7 Ilustração de uma restrição fácil (verde), de apenas uma dimensão, representada através de uma função quadrática condicional bilateral. Restrições fáceis são adicionadas ao objetivo principal (azul) para ajudar o otimizador a encontrar o mínimo global. 96
- 5.1 Personagens utilizados nos experimentos. As juntas esféricas são representadas por pequenas esferas azuis. Duas esferas cinzas, consideradas no tratamento de colisão entre o personagem e o chão, são incluídas para cada pé do personagem. Essas esferas representam a ponta do pé e o calcanhar. 101
- 5.2 Todos os modos naturais de vibração do personagem bípede humanoide. . . . 103
- 5.3 Especificação dos modos de vibração para o exemplo básico de locomoção. Apenas alguns poucos modos de vibração são suficientes para gerar o esboço de um movimento de corrida básico. Os modos de vibração combinados estão marcados de verde e os excluídos de vermelho. 104
- 5.4 A primeira sequência de animação corresponde ao esboço produzido pelo animador, simulado sem o efeito da gravidade. A segunda corresponde ao resultado final obtido através da otimização do controlador. As setas vermelhas correspondem às forças de reação do chão. 105

5.5	Simulação física do personagem bípede humanoide utilizando o controlador inicial e considerando o efeito da gravidade. O controlador inicial, utilizado na inicialização da otimização, é definido baseado no esboço produzido pelo animador.	105
5.6	Especificação dos modos para o exemplo de corrida com balanço lateral. Este exemplo é bastante semelhante ao exemplo básico de locomoção, com a diferença que uma oscilação lateral do corpo, como um todo, é acrescentada ao esboço produzido.	107
5.7	Em cima, esboço produzido para o exemplo de corrida com balanço lateral. Embaixo, locomoção final correspondente, resultante da otimização do controlador.	108
5.8	Comparação entre os esboços mostrados em uma visão frontal. Em cima, esboço do exemplo de corrida básico. Embaixo, esboço do exemplo de corrida com balanço lateral.	108
5.9	Comparação entre os resultados otimizados mostrados em uma visão frontal. Em cima, exemplo de corrida básico. Embaixo, exemplo de corrida com balanço lateral.	109
5.10	Especificação dos modos para o exemplo de corrida com rotação vertical. Este exemplo é também bastante semelhante ao exemplo básico de locomoção, com a diferença que uma rotação vertical do corpo, como um todo, é acrescentada ao esboço produzido.	109
5.11	Em cima, esboço produzido para o exemplo de corrida com rotação vertical. Embaixo, locomoção final correspondente, resultante da otimização do controlador.	110
5.12	Versão da Figura 5.11 mostrada em uma visão frontal.	110
5.13	Especificação dos modos para o exemplo do personagem saltitando.	111
5.14	Em cima, esboço produzido para o exemplo do personagem saltitando. Embaixo, locomoção final correspondente, resultante da otimização do controlador.	111
5.15	Escolha padrão inicial dos modos usada para os dois experimentos randômicos.	112
5.16	Resultado da especificação dos modos a partir do primeiro procedimento randômico.	113

5.17 Em cima, esboço produzido a partir do primeiro procedimento randômico. Embaixo, locomoção final correspondente, resultante da otimização do controlador.	113
5.18 Resultado da especificação dos modos a partir do segundo procedimento randômico.	114
5.19 Em cima, esboço produzido a partir do segundo procedimento randômico. Embaixo, locomoção final correspondente, resultante da otimização do controlador.	114
5.20 Diferentes poses de relaxamento definidas para o personagem bípede humanoide.	115
5.21 Especificação dos modos para o exemplo de corrida agachada.	116
5.22 Em cima, esboço produzido para o exemplo de corrida agachada. Embaixo, locomoção final correspondente, resultante da otimização do controlador.	116
5.23 Especificação dos modos para o exemplo de corrida com as pernas afastadas.	117
5.24 Em cima, esboço produzido para o exemplo de corrida com as pernas afastadas. Embaixo, locomoção final correspondente, resultante da otimização do controlador.	117
5.25 Especificação dos modos para o exemplo de corrida em um pé só.	118
5.26 Em cima, esboço produzido para o exemplo de corrida em um pé só. Embaixo, locomoção final correspondente, resultante da otimização do controlador.	118
5.27 Especificação dos modos para o exemplo do monstro bípede correndo.	120
5.28 Em cima, esboço produzido para o exemplo do monstro bípede correndo. Embaixo, locomoção final correspondente, resultante da otimização do controlador.	120
5.29 Simulação física do monstro bípede utilizando o controlador inicial e considerando o efeito da gravidade.	121
5.30 Especificação dos modos para o exemplo do monstro bípede correndo, mas com a movimentação cruzada dos braços.	121

5.31	Comparação entre os esboços dos exemplos com o monstro bípede correndo. Em cima, movimentação regular dos braços. Embaixo, movimentação cruzada dos braços.	121
5.32	Comparação entre os resultados otimizados dos exemplos com o monstro bípede correndo. Em cima, movimentação regular dos braços. Embaixo, movimentação cruzada dos braços.	122
5.33	Especificação dos modos para o exemplo do canguru saltando.	122
5.34	Em cima, esboço produzido para o exemplo do canguru saltando. Embaixo, locomoção final correspondente, resultante da otimização do controlador. . . .	123
5.35	Simulação física do canguru utilizando o controlador inicial e considerando o efeito da gravidade.	123
5.36	Comparação entre o resultado otimizado do exemplo de corrida básico obtido usando a versão original e o resultado otimizado obtido usando a primeira nova versão alternativa. Em cima, resultado da técnica proposta, com torques definidos através da base modal. Embaixo, resultado obtido com torques definidos através da base canônica. O esboço não é considerado no segundo caso.	124
5.37	Especificação dos modos para o exemplo de corrida básico, mas selecionando os doze primeiros modos de cada estado como os modos permitidos.	126
5.38	Comparação entre dois resultados otimizados do exemplo de corrida básico. Em cima, resultado da técnica proposta, na qual o animador seleciona os modos permitidos. Embaixo, resultado do caso em que os doze primeiros modos de cada fase são selecionados como os modos permitidos. Note que, embora o mesmo esboço seja produzido nos dois casos, os resultados otimizados são diferentes porque os modos permitidos selecionados são diferentes.	127

Lista de Tabelas

- 5.1 Comparação entre as dimensões dos espaços de busca utilizados nos diferentes experimentos realizados em cada uma das fases da locomoção (ar/chão). . . . 125

1 Introdução

1.1 Problema

A animação de personagens virtuais é uma das áreas mais fascinantes em computação gráfica pelo fato de estar diretamente relacionada à manifestação de vida em um ambiente virtual. Um dos modos mais eficazes de criar nas pessoas uma sensação de imersão é exatamente por meio da visualização de personagens que são capazes de se locomover e interagir com o mundo virtual de maneira semelhante ao que acontece na vida real. De fato, investir em tais aspectos capazes de causar essa impressão de que há vida em um ambiente virtual é de extrema importância para atrair a atenção das pessoas para as mais diversas aplicações envolvendo computação gráfica e realidade virtual. Ao mesmo tempo, o crescente interesse das pessoas em computação gráfica, principalmente devido às indústrias cinematográficas e de jogos de computador, exige um investimento cada vez maior no avanço das tecnologias usadas. Mais especificamente, as técnicas de animação de personagens virtuais precisam ser cada vez mais realistas e convincentes.

A importância da animação de personagens, bastante incentivada por essas indústrias, também pode ser percebida pelo fato de envolver pesquisa em diferentes áreas, tais como dinâmica, biomecânica, robótica, inteligência artificial e otimização. Entretanto, mesmo com esse incentivo e com a interação com essas diversas áreas, gerar ferramentas de animação capazes de produzir locomoções realistas para personagens arbitrários, de maneira automática, é extremamente difícil, e muita pesquisa ainda é necessária.

Por exemplo, para que a locomoção de um personagem arbitrário pareça natural, os aspectos físicos presentes no mundo real claramente precisam ser considerados. Além disso, entender como animais utilizam seus próprios aspectos físicos para se locomover é também de fundamental importância. De fato, é intuitivamente óbvio que existe algum relacionamento entre a forma de um animal, a qual consiste de suas propriedades morfológicas e físicas, e a maneira como ele se locomove. Como ilustrado na Figura 1.1, é fácil deduzir que as



Figura 1.1: Comparação entre distintas locomoções (chita vs. elefante).

claras diferenças entre as locomoções de uma chita¹ e de um elefante, por exemplo, estão evidentemente relacionadas ao fato de uma chita possuir coluna e pernas bastante elásticas e flexíveis que, em conjunto com sua leve estrutura, lhe conferem a habilidade de correr de maneira bastante ágil, e de um elefante possuir coluna e pernas que precisam ser bastante rígidas para poder sustentar todo o seu enorme peso.



Figura 1.2: Comparação entre locomoções associadas a diferentes anatomias (humano vs. canguru).

Outras diferentes situações também ajudam a motivar pesquisas relacionadas a locomoções de animais, associadas às suas formas. Por exemplo, assim como uma chita e um elefante, outros quadrúpedes, ainda que possuam a mesma topologia (e.g. cavalo, girafa, cachorro), também apresentam claras diferenças em suas locomoções devido às suas diferentes propriedades (e.g. forma, massa, elasticidade). Mais especificamente relacionado às propriedades elásticas de juntas individuais, o fato de cangurus possuírem tornozelos capazes de armazenar bastante energia elástica pode explicar o porquê de eles preferirem saltitar a correr como humanos (Figura 1.2). Já no caso da locomoção humana, a qualidade visual pode ser ainda mais influenciada por tais propriedades. Isso se deve ao fato de que pessoas são capazes de perceber aspectos mais abstratos ao visualizar locomoções mais familiares. Mesmo que, em alguns casos, seja difícil perceber o que exatamente pode tornar uma locomoção

¹ Também conhecida como guepardo, é o mais rápido de todos os animais terrestres, sendo capaz de atingir velocidade superior a 100km/h.



Figura 1.3: Comparação entre forma e locomoção de animais extintos e/ou fantasiosos. Entender essa associação é de claro interesse, principalmente nesses tipos de personagens, tais como os usados nos filmes *Jurassic Park* e *Avatar*.

humana não natural, avaliar simplesmente se ela é ou não natural é bastante intuitivo para as pessoas. Portanto, considerar diferenças mais sutis é também de grande interesse na animação de personagens humanos. Por exemplo, um homem mais gordo e um homem mais atlético devem correr de maneiras diferentes, devido a diferenças tanto da capacidade muscular quanto do peso total de cada indivíduo. Da mesma maneira, alguém que tenha problemas no joelho, por exemplo, deve ter sua locomoção influenciada por essa deficiência.

Entretanto, apesar do longo período de pesquisa nesse assunto de tamanha relevância, inclusive em outras áreas fora da computação gráfica, poucos trabalhos têm contribuído de maneira realmente efetiva na generalização do controle de locomoção de personagens, baseado apenas nos seus aspectos morfológicos e físicos. Particularmente, esse problema ganha ainda mais destaque quando se deseja gerar locomoção para animais extintos ou completamente fictícios, como ilustrados na Figura 1.3.

O problema abordado neste trabalho pode ser bem ilustrado através do jogo *Spore*. Como mostrado na parte de cima da Figura 1.4, os jogadores podem criar seus próprios personagens, definindo suas morfologias de maneira interativa e completamente arbitrária, os quais podem se locomover em um mundo virtual. Hecker et al. [2008] propuseram uma nova técnica capaz de animar tais personagens arbitrários de uma maneira generalizada, em que suas morfologias específicas não precisam ser conhecidas no momento em que a animação é criada. Essas animações generalizadas, previamente definidas e independentes de morfologia, podem então ser automaticamente adaptadas e aplicadas, em tempo de execução, a personagens arbitrários, tais como os mostrados na parte de baixo da Figura 1.4. Entretanto, embora essa técnica, usada no jogo *Spore*, sirva como uma importante motivação para este trabalho, seus resultados são obtidos através de uma abordagem cinematográfica.

Abordagens cinematográficas possuem uma clara limitação devido ao fato de lidar com um controle diretamente ligado a trajetórias. Como as causas físicas que influenciam o surgimento de uma determinada trajetória não são consideradas, adaptá-la para diferentes situações ou diferentes personagens, de uma maneira fisicamente correta, é bastante complicado. Por mais



Figura 1.4: No jogo *Spore*, o jogador pode criar personagens arbitrários, através de um editor interativo, para povoar um mundo virtual, que podem ter suas próprias morfologias.

que essa trajetória possa ser alterada ou adaptada cinematicamente, sua essência física é sempre mantida e conseqüentemente não condiz com os diferentes aspectos físicos envolvidos no novo caso.

Para entender melhor essa desvantagem associada a abordagens cinemáticas, imagine uma situação em que se deseja produzir a locomoção de um cavalo virtual. Baseando-se em um vídeo de um cavalo real correndo, um animador provavelmente seria capaz de imitar a trajetória gravada e produzir uma animação bastante natural e realista visualmente, embora isso possa exigir um processo trabalhoso, dependendo das ferramentas de animação que ele possua. Mas e se não fosse possível obter tal vídeo? E se cavalos nem sequer existissem? O resultado provavelmente seria baseado em exemplos de locomoção de outros animais ou dependeria bastante da criatividade do animador. Conseqüentemente, não haveria garantias de que a locomoção resultante seria adequada ou semelhante à locomoção de uma cavalo real.

Portanto, neste trabalho, ao invés de controlar trajetórias diretamente, deseja-se animar tais personagens arbitrários através de uma abordagem dinâmica, na qual as causas físicas que influenciam o surgimento das locomoções é que devem ser adequadamente controladas. Por outro lado, gerar locomoção de qualidade usando abordagens dinâmicas é bastante desafiador porque a qualidade visual da locomoção está integralmente associada ao papel básico do controlador em fazê-la funcionar. Ou seja, enquanto um animador precisa ajustar os parâmetros de entrada do controlador, a fim de melhorar a aparência da locomoção ou guiar a locomoção de acordo com um estilo específico desejado, esses ajustes devem ser realizados com o cuidado de não danificar o seu funcionamento dinâmico básico. Além disso, como o relacionamento entre os parâmetros de entrada do controlador e a locomoção final é frequentemente não linear e não intuitivo, muitas abordagens dinâmicas exigem que um processo de otimização sobre esses parâmetros seja realizado. Mesmo considerando essas dificuldades, deseja-se ainda que esse controle mais abstrato seja também capaz de relacionar automaticamente a forma específica do

personagem com sua locomoção gerada.

Ainda que animações fisicamente plausíveis possam ser geradas automaticamente através de otimização, baseando-se apenas nas formas específicas de personagens arbitrários [Sims 1994, Wampler e Popović 2009], a locomoção resultante pode não corresponder ao que se espera. De fato, um controle direto sobre a trajetória, apesar de ser fisicamente inconsistente e comprometer a naturalidade da locomoção, facilita a definição de um estilo de locomoção específico desejado. Sem tal controle, o animador não possui muita influência sobre o estilo da locomoção resultante. Portanto, automatizar o relacionamento entre forma e locomoção de maneira fisicamente consistente, e ao mesmo tempo fornecer um controle adequado sobre o estilo da locomoção resultante, ainda é um problema bastante difícil.

1.2 Motivação

Este trabalho é desenvolvido baseado em três hipóteses principais. A primeira hipótese é considerar a eficiência energética como o principal fator para definir a naturalidade de uma locomoção. Essa consideração sugere que, durante seu desenvolvimento, um animal aprende a usar suas formas específicas para se locomover de maneira mais eficiente, já que é conveniente que atividades mais comuns sejam realizadas com o menor gasto de energia possível. Note que a naturalidade de uma locomoção está justamente associada a esse processo de desenvolvimento do animal. Ou seja, o estilo de locomoção característico de cada animal está relacionado ao seu processo de desenvolvimento, no qual locomoções consideradas naturais para o animal em particular são manifestadas instintivamente, de acordo com sua morfologia.

Para melhor perceber esse aspecto instintivo de locomoções, é interessante comparar locomoções a outros movimentos mais previsíveis, que são claramente definidos através de trajetórias explícitas, tais como levar a mão a uma maçaneta para abrir uma porta, ou mudar o lugar de objetos situados em uma prateleira. De fato, locomoção possui uma natureza mais abstrata e surge espontaneamente de acordo com a percepção natural do animal sobre suas características específicas. Portanto, ao invés de definir uma locomoção através da descrição explícita de uma trajetória, deseja-se obter a trajetória resultante de uma locomoção como uma consequência de decisões de controle mais abstratas, baseadas em estratégias para economizar a energia gasta.

Na direção contrária a essa ideia abstrata de locomoção, alguns treinamentos de corrida sugerem que atletas devam tentar imitar uma determinada trajetória, supostamente ótima. Assim, atingir tal trajetória significaria correr de maneira mais eficiente. Entretanto, para

que o atleta consiga alcançar tal trajetória específica, ele provavelmente precisará fortalecer músculos associados a algumas de suas juntas, dessa maneira modificando sua estrutura física. Isso indica que essa trajetória recomendada é provavelmente obtida baseada em uma estrutura física específica, também supostamente ótima para um atleta. Assim, essa trajetória é natural e eficiente apenas para tal determinada estrutura. Note que o objetivo deste trabalho não é adaptar a forma de um personagem a determinada trajetória. O que se deseja é que trajetórias se manifestem espontaneamente, as quais serão naturalmente diferentes para cada caso, considerando que a estrutura física de cada personagem seja mantida fixa. Embora existam abordagens com o objetivo de analisar trajetórias desejadas específicas, já previamente obtidas, deseja-se que a técnica proposta seja capaz de produzir automaticamente diferentes trajetórias, de acordo com as características específicas de cada personagem.

Uma maneira bastante eficaz de diminuir o gasto de energia é através da reutilização da energia já produzida, o que pode ser claramente percebido, por exemplo, em movimentos que envolvem a ação de molas. Tais movimentos são eficientemente produzidos através da simples troca entre energia potencial elástica e energia cinética que ocorre à medida em que as molas são comprimidas e estendidas. De fato, qualquer estrutura elástica possui essa capacidade de produzir movimento através do reaproveitamento de sua energia potencial elástica, e o relacionamento entre a forma do animal e sua eficiência energética está diretamente ligado à maneira com que os elementos passivos presentes na sua estrutura elástica são usados para reaproveitar sua energia. Mas primeiramente é preciso que animais sejam realmente percebidos como estruturas elásticas, e que de fato essa elasticidade pode favorecer a locomoção, através da reutilização de energia.

Embora qualquer material possua propriedades elásticas, isso pode não ser claramente intuitivo para muitas estruturas (Figura 1.5). Enquanto, por exemplo, uma ponte ou um prédio podem não parecer elásticos por possuir estruturas bastante rígidas, animais também podem não parecer elásticos, mas porque suas juntas precisam ser suficientemente flexíveis para permitir movimento. Uma clara diferença é que animais possuem também elementos ativos voluntários. Além disso, enquanto se deseja evitar que estruturas tais como pontes e prédios se movam, é interessante que as propriedades elásticas dos animais os ajudem a se locomover de maneira mais eficiente.

Um exemplo bastante interessante para se convencer de que mesmo uma estrutura bastante rígida é constituída por material elástico é o famoso episódio que ocorreu com a *Tacoma Narrows Bridge*, ilustrada à esquerda da Figura 1.5. Essa ponte estava localizada sobre o Estreito de Tacoma, em Washington, e, em 7 de Novembro de 1940, caiu devido a um colapso



Figura 1.5: Por menos intuitivo que possa parecer, elementos elásticos passivos estão presentes em todo tipo de estrutura, como por exemplo pontes, prédios e estruturas articuladas.

gerado por fortes ventos, apenas poucos meses após a sua inauguração. O mais interessante desse episódio é que pôde-se perceber claramente o efeito elástico da ponte, enquanto ela balançava [TACOMA 2012].



Figura 1.6: Tornozelo e pulso humanos. Quando relaxados em posições adequadas, fica fácil perceber seus efeitos passivos, semelhantes a efeitos de molas.

Por outro lado, experimentos bem mais simples, tais como os ilustrados na Figura 1.6, podem ajudar a perceber que humanos, assim como animais em geral, também possuem elasticidade. Os experimentos ilustrados consistem em mostrar possíveis situações em que fica fácil perceber que juntas humanas, quando relaxadas, podem se comportar de maneira claramente passiva, semelhante ao efeito de uma mola. Enquanto a ação da gravidade pode dificultar a percepção do efeito passivo em humanos, sem o efeito da gravidade, seria possível observar um humano relaxado atingindo, como um todo, sua pose de equilíbrio. De fato, esse experimento já foi realizado pela NASA [2012] (Figura 4.3). Detalhes sobre esse experimento são discutidos na Subseção 4.2.3.

Portanto, baseado nessa discussão sobre os elementos passivos presentes em animais, a segunda hipótese considerada neste trabalho é que animais tendem a adaptar suas locomoções a fim de melhor reaproveitar a energia potencial elástica que é continuamente armazenada em suas estruturas. Pesquisas na área de animação de personagens virtuais ajudam a dar suporte a essa hipótese. Por exemplo, Raibert e Hodgins [1991] reconhecem que estruturas musculoesqueléticas de animais são capazes de armazenar energia ao se locomoverem, através

da compressão exercida em suas juntas elásticas. Mais recentemente, esse comportamento passivo de estruturas musculoesqueléticas foi explorado em alguns trabalhos com o objetivo de melhorar a qualidade da animação de personagens articulados [Liu et al. 2005, Kry et al. 2009, Wampler e Popović 2009]. Outras pesquisas, tanto na robótica [Thompson e Raibert 1990] quanto na biologia [Alexander 1996], também fornecem suporte a essa hipótese. O que pode ser observado na natureza é que sistemas biológicos em geral, de fato, aprendem a aproveitar suas próprias estruturas elásticas para produzirem controle eficiente em diferentes atividades dinâmicas. Uma estratégia bastante comum usada em locomoções naturais, tais como correr e pular, por exemplo, consiste em, no momento em que os pés de apoio tocam o chão, usar as pernas como se fossem verdadeiras molas [Alexander 1988]. Ou seja, no momento do contato com o chão, parte da energia potencial gravitacional e da energia cinética que o animal possui enquanto no ar é armazenada como energia potencial elástica, através da compressão das pernas de apoio. Essa energia é então reutilizada, no momento do impulso no chão, para fazer com que o animal ganhe novamente a altura e a velocidade necessárias para dar o próximo passo. Novacheck [1998] sugere que todo o tecido composto pelos músculos, tendões e ligamentos possui funcionamento semelhante ao de molas e amortecedores. Assim, o reaproveitamento da energia armazenada é realizado de acordo com o retorno passivo dessas molas, sob a influência de suas rigidezes, para as suas posições de equilíbrio específicas.

Entretanto, é importante observar que, além do efeito de armazenar e reutilizar a energia em cada junta individualmente, as propriedades morfológicas e físicas da estrutura elástica influenciam bastante a maneira como essa troca de energia ocorre no personagem como um todo. Como a energia de uma junta pode ser transmitida para as outras, analisar essa troca energética apenas localmente não é suficiente. Assim, a maneira mais adequada de se analisar um sistema dinâmico elástico é realmente considerando o sistema por completo. Portanto, para permitir que essas trocas energéticas sejam consideradas de tal maneira global, este trabalho sugere que uma análise modal do personagem a ser simulado seja realizada. Do ponto de vista dinâmico, as equações de movimento do sistema, ao serem definidas considerando as juntas individuais do personagem como os seus graus de liberdade, consistem em um sistema dinâmico acoplado, em que cada equação envolve mais de um grau de liberdade. Ou seja, um torque aplicado em uma das juntas se propaga para as demais juntas da estrutura, de modo que analisar cada junta individualmente é complicado. Através da análise modal do personagem, é possível desacoplar essas equações de movimento em vibrações independentes (Subseção 2.4.2). Definindo o sistema em coordenadas modais, o movimento pode ser visto como o resultado da superposição dessas vibrações individuais.

Note que a decomposição modal da dinâmica do personagem não apenas define modos

naturais de vibração dinamicamente independentes, mas também diretamente relacionados com eficiência energética (Seção 4.3). Esse relacionamento é definido de acordo com suas respectivas frequências naturais de vibração. Para uma quantidade fixa de energia excitando um único modo de vibração específico, quanto menor for sua frequência natural, maior será sua amplitude de deslocamento [Pentland e Williams 1989, Pentland 1990]. Isso significa que, ao excitar uma estrutura de acordo com seus modos de vibração de mais baixas frequências, movimentos mais amplos são obtidos com um menor gasto de energia. Essa propriedade está exatamente relacionada ao incidente ocorrido com a ponte de *Tacoma* [TACOMA 2012]. Embora a força dos ventos não fosse suficiente para derrubar a ponte de uma vez, ao entrar inesperadamente em ressonância com os modos naturais de vibração de mais baixas frequências da ponte, a ação dos ventos no dia do colapso foi capaz de produzir deslocamentos mais amplos na sua estrutura. Assim, fazendo uma comparação com os objetivos da análise modal em engenharia, enquanto se deseja evitar as vibrações de baixas frequências em pontes e prédios, possivelmente causadas por ventos ou terremotos, por exemplo, os objetivos neste trabalho são exatamente opostos. Em locomoção, a fim de economizar energia, deseja-se explorar as vibrações naturais de mais baixas frequências dos animais.

Finalmente, baseado nessa propriedade, a terceira hipótese considerada neste trabalho é que animais reais exploram suas estruturas elásticas passivas através de excitações internas correspondentes às suas vibrações naturais de mais baixas frequências. Ou seja, animais possuem mecanismos de identificar automaticamente seus modos naturais de vibração mais adequados para realizar determinada locomoção com menor gasto de energia. Inspirada e suportada pelo trabalho proposto por Kry et al. [2009], essa hipótese sugere que os modos naturais de vibração de mais baixas frequências do próprio personagem consistem em uma excelente base para construir locomoção eficiente.

Essa hipótese é também suportada pela análise das frequências presentes em um caminhar humano capturado [Jain e Liu 2011]. A Figura 1.7 apresenta os gráficos obtidos através dessa análise, os quais mostram que os primeiros componentes principais são predominantemente constituídos por oscilações de baixas frequências. Assim, esses gráficos também indicam que usar oscilações de mais baixas frequências é supostamente mais apropriado para o controle de locomoções. Uma outra observação interessante é que trocas entre energia potencial elástica e energia cinética estão mais presentes em corrida do que em caminhada [Novacheck 1998]. A explicação é que os movimentos de pêndulo invertido usando a perna de apoio esticada, observados em caminhada, são responsáveis por transformar grande parte da energia cinética diretamente em energia potencial gravitacional.

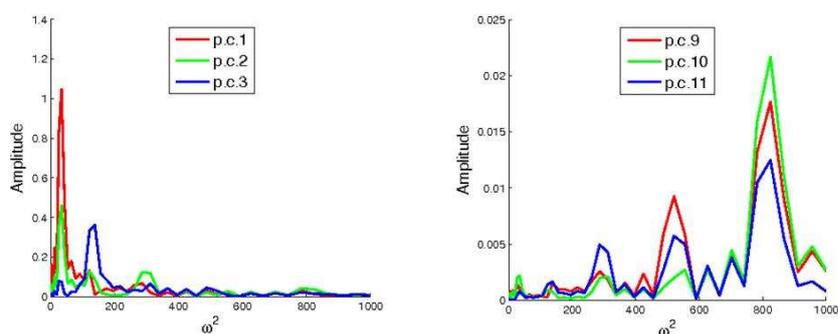


Figura 1.7: *Principal Component Analysis (PCA)* aplicado às poses de um caminhar humano capturado [Jain e Liu 2011]. Esquerda: Oscilações de baixas frequências predominam nos três primeiros componentes principais. Direita: Oscilações de altas frequências possuem maior influência nos três últimos componentes principais. Note que, para permitir uma melhor ilustração, as escalas usadas nos eixos verticais são diferentes nos dois gráficos.

Baseado nessas hipóteses discutidas nesta seção, este trabalho propõe usar vibrações naturais tanto na descrição quanto no controle de locomoções fisicamente simuladas de personagens articulados arbitrários. Através dessa decomposição modal da dinâmica, uma paleta composta pelos modos naturais de vibração do próprio personagem simulado pode ser automaticamente disponibilizada para auxiliar o animador a produzir estilos de locomoção desejados.

Embora a solução de usar modos de vibração seja geral para qualquer personagem arbitrário, a técnica proposta é testada principalmente para um personagem bípede humanoide correndo de diferentes maneiras. O motivo pelo qual um personagem bípede humanoide é usado na maioria dos testes é que a avaliação visual da qualidade dos resultados fica mais fácil e intuitiva, já que pessoas são bastante familiarizadas com locomoções humanas. Avaliar a técnica proposta aplicada a personagens imaginários, por exemplo, seria complicado porque não existem locomoções de referência que possam ser usadas como comparação. Entretanto, a utilização de diferentes personagens é importante para avaliar a capacidade de generalização da técnica. Portanto, testes também são realizados utilizando um personagem bípede imaginário possuindo quatro braços e um personagem semelhante a um canguru, mas possuindo apenas uma perna.

Além disso, embora a ideia da técnica proposta seja geral para qualquer tipo de personagem e locomoção, a estrutura do controlador utilizada limita a aplicação da técnica para personagens terrestres, e para locomoções de corrida em que apenas uma perna do personagem pode manter contato com o chão de cada vez.

1.3 Contribuições

Este trabalho é inédito principalmente por explorar o uso de modos naturais de vibração no controle da geração de locomoção de personagens arbitrários, fisicamente simulados e dinamicamente instáveis.

Usando uma abordagem de otimização baseada em simulação, a técnica proposta permite especificar o estilo da locomoção a ser gerada sem uma interferência direta na trajetória. Essa especificação do estilo da locomoção é realizada através de uma paleta mostrando os modos de vibração específicos do personagem simulado, a qual é disponibilizada automaticamente, de acordo com as propriedades morfológicas e físicas desse personagem. Analisando as animações individuais dessas vibrações dinamicamente independentes, o esboço da locomoção gerado pelo animador é obtido como consequência implícita da excitação da estrutura elástica do personagem, realizada indiretamente através da aplicação de torques, o que é mais consistente com o que acontece em animais reais.

A interface proposta, por ser baseada nas vibrações naturais do personagem, consiste em uma ferramenta útil de controle e ainda permite facilitar o processo de otimização, já que os torques podem ser facilmente definidos em um espaço de controle reduzido, formado pelos modos de vibração de mais baixas frequências escolhidos pelo animador. Note que os modos de vibração do personagem simulado também servem como uma fonte alternativa de descrição da locomoção. Como trajetórias de referência realistas (e.g. movimentos capturados) nem sempre podem ser disponibilizadas, os modos de vibração podem ser, em muitos casos, a única fonte disponível de descrição da locomoção. Além disso, a apresentação desses modos na forma de uma paleta de controle, através de uma interface amigável, também pode servir como excelente fonte de inspiração para a criatividade do animador.

Uma outra contribuição importante deste trabalho é disponibilizar um novo método de otimização, que combina dois outros métodos de otimização já existentes, *Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (CMA-ES)* (Subseção 4.4.2) e *Method of Multipliers (MoM)* (Subseção 4.4.3). Esse novo método permite que abordagens de otimização de controladores baseadas em simulação sejam capazes de tratar restrições explícitas na trajetória, as quais são usadas neste trabalho apenas para forçar que as locomoções resultantes do processo de otimização sejam cíclicas. Isso permite que a geração de um ciclo da locomoção e o equilíbrio exigido para manter essa locomoção estável nos próximos ciclos possam ser tratados de maneira independente.

Este trabalho resultou em uma publicação importante no *ACM SIGGRAPH Symposium on*

Interactive 3D Graphics and Games [Nunes et al. 2012], e espera-se que futuras contribuições ainda relacionadas a este trabalho também sejam publicadas em breve.

1.4 Estrutura da Tese

A estrutura desta tese é organizada da seguinte maneira. No Capítulo 2, encontram-se os principais conceitos e as principais definições usadas neste trabalho, além da teoria necessária para o entendimento da técnica proposta. No Capítulo 3, alguns trabalhos relacionados ao problema abordado são classificados e discutidos. No Capítulo 4, encontra-se a descrição detalhada da técnica proposta neste trabalho, usada para controlar a geração de locomoção de personagens virtuais fisicamente simulados, de acordo com suas vibrações naturais. No Capítulo 5, encontram-se os detalhes de como os vários exemplos de locomoção, utilizando diferentes personagens, foram produzidos a fim de avaliar a técnica proposta. Por fim, no Capítulo 6, encontram-se as conclusões deste trabalho e as discussões sobre interessantes perspectivas de trabalhos futuros.

2 *Conceitos e Definições*

2.1 Introdução

Neste capítulo, primeiramente discutem-se alguns conceitos importantes em relação à representação de personagens virtuais através de estruturas articuladas de corpos rígidos, dentro do contexto de simulação física. Em seguida, mostram-se os detalhes de como controladores são utilizados para fazer com que um personagem atinja uma pose específica, levando em consideração que as orientações das juntas são definidas em três dimensões. Por último, explica-se como realizar uma análise modal em estruturas articuladas de corpos rígidos.

2.2 Personagens Virtuais

Nesta seção, primeiramente apresentam-se os personagens virtuais, representados como estruturas articuladas de corpos rígidos. Em seguida, inserem-se os personagens virtuais no contexto de simulação física, e discute-se a diferença entre sistemas passivos e sistemas atuados. Finalmente, explica-se a motivação do uso de controladores nesse contexto.

2.2.1 Estruturas Articuladas

Personagens virtuais são frequentemente representados através de corpos rígidos simples hierarquicamente articulados através de juntas. A configuração (pose) desses personagens é determinada por um vetor, \mathbf{q} , de coordenadas generalizadas associadas a seus graus de liberdade: a posição global do corpo raiz, \mathbf{p}_{raiz} ; a orientação (ângulos) global do corpo raiz, $\boldsymbol{\theta}_{raiz}$; e as orientações locais de cada junta, $\boldsymbol{\theta}_j$. A animação do personagem é então determinada por uma função vetorial, $\mathbf{q}(t)$, das coordenadas generalizadas.

Como ilustrado na Figura 2.1, $\mathbf{q}(t)$ representa o estado do personagem em cada instante t e consiste de um conjunto de curvas de movimento das coordenadas generalizadas. Assim, dependendo da abordagem de animação utilizada, cada uma dessas coordenadas pode ser vista



Figura 2.1: (a) $q(t)$ representa o estado do personagem em cada instante t . (b) Algumas curvas de movimento capturado de um caminhar humano.

como uma curva de movimento independente, $q_i(t)$. Além disso, dependendo do propósito da animação, uma função vetorial extra, $\dot{q}(t)$, contendo informações de velocidade, também é exigida na representação do estado do personagem. Em alguns casos, q pode ser interpretado como já contendo \dot{q} , simplesmente por economia de notação.

A pose do personagem também pode ser definida em mais alto nível, através de parâmetros que são usados para obter os valores dos graus de liberdade em baixo nível. Os parâmetros usados para representar essas poses podem variar bastante de uma aplicação para outra. Alguns exemplos são as posições dos efetores finais (e.g. mão, pé) do personagem, a variação de direção e de velocidade de um caminhar, entre outros. Vale observar que não apenas as poses individuais, mas também animações inteiras podem ser parametrizadas. Na animação de um humanoide, por exemplo, o movimento desejado pode ser definido em mais alto nível, tal como simplesmente caminhar em direção a pontos específicos localizados no ambiente.

2.2.2 Estruturas Articuladas Fisicamente Simuladas

Ao se analisar os métodos de animação de personagens virtuais, um dos critérios principais de classificação é se o método utilizado para gerar o movimento se preocupa com as causas que o levam a ocorrer. Ou seja, se o método leva ou não em consideração a influência das forças atuantes e das massas dos corpos para gerar os movimentos. *Métodos cinemáticos* se abstraem das causas do movimento e não levam em conta essa influência para definir as poses dos personagens em cada instante da animação. Já os *métodos dinâmicos* dependem dessa influência para calcular os estados do sistema animado, de acordo com os aspectos físicos dos personagens e do ambiente simulado. Assim, nos métodos dinâmicos, as poses dos personagens são obtidas, de acordo com as equações de movimento do sistema, através das forças e torques que são aplicados, ao invés de serem definidas diretamente através de informações de posição e velocidade dos graus de liberdade, como nos métodos cinemáticos. Animações de personagens

e ambientes que respeitam as leis da física, imitando o mundo real, apresentam um grande apelo visual por estarem de acordo com o que os espectadores estão acostumados a ver em sua volta.

Notoriamente, o uso da física¹ em animação implica em implementações mais complicadas, que exigem maior esforço computacional e envolvem conhecimento em áreas tais como dinâmica e integração numérica. A animação de personagens virtuais, por exemplo, também envolve áreas tais como biomecânica, controle de movimento e otimização. Além disso, a animação geralmente depende de um número maior de parâmetros, algumas vezes não intuitivos, que necessitam de ajustes trabalhosos ou otimizações demoradas para que o resultado desejado seja obtido.

Entretanto, apesar dessas dificuldades associadas aos métodos dinâmicos, produzir movimentos visualmente naturais através de métodos cinemáticos geralmente exige muito esforço por parte do animador, e também apresenta dificuldades. Uma grave desvantagem na abordagem cinemática é que a tarefa de gerar animações que aparentem ser fisicamente corretas é sempre deixada a cargo do animador. Assim, exige-se do animador um grau suficiente de habilidade artística específica para o propósito da animação.

Alternativamente, movimentos capturados disponibilizam movimentos fisicamente corretos que podem ser utilizados pelo animador [Multon et al. 1999, Kalisiak 2002, Pejsa e Pandzic 2010]. Entretanto, apesar dos grandes avanços tanto na disponibilidade quanto nas técnicas de utilização dos dados de movimentos capturados, a habilidade em gerar movimentos naturais está restrita ao conteúdo da base de dados disponível. Além disso, o uso da técnica de captura de movimentos é limitado àquelas criaturas reais que possam ter seus movimentos capturados. Mesmo movimentos humanos, que na prática são os movimentos realmente explorados, são limitados às situações plausíveis de captura. Movimentos que coloquem os atores em perigo, por exemplo, não são apropriados para serem capturados. Mesmo em situações em que a captura é possível, os métodos baseados em dados disponíveis, sejam eles dados de movimentos capturados ou de movimentos gerados por outros métodos cinemáticos, não apresentam a mesma flexibilidade dos métodos baseados em física em interagir de maneira natural e em tempo real com eventos inesperados.

A utilização da física na animação de personagens virtuais tem sido uma das direções de pesquisa em animação por computador há mais de vinte anos [Armstrong e Green 1985, Wilhelms e Barsky 1985, Wilhelms 1986]. Para a simulação de fenômenos passivos,

¹ Em muitos textos sobre animação de personagens virtuais, é bastante comum a utilização do termo *física* implicitamente ligado a métodos dinâmicos, embora tanto a cinemática como a dinâmica sejam ramos de uma mesma área da física, a mecânica. Portanto, também neste trabalho, o termo *física*, sem referência explícita à cinemática, deve ser associado ao uso de métodos dinâmicos.

tais como objetos rígidos, fluidos, roupas e personagens “rag-doll”, simulação física tem sido largamente adotada em aplicações comerciais, tanto em videogames como na produção de filmes. Contudo, apesar de mais de duas décadas de pesquisa em animação de personagens baseada em física, *frameworks* comerciais ainda recorrem a abordagens cinemáticas quando se trata de animação de personagens virtuais atuados² [Pejsa e Pandzic 2010]. Isso é devido à existência atualmente de melhores soluções cinemáticas para muitas das exigências comerciais nessa área.

Apesar das desvantagens associadas ao uso da física mencionadas anteriormente, a perspectiva e o desejo de tornar possível a produção automática de animações fisicamente corretas de personagens virtuais, das mais variadas formas e capazes de interagir naturalmente com eventos inesperados com o ambiente em tempo real, fizeram com que os esforços de investimento no uso da física se mantivessem. De fato, os últimos anos têm mostrado excelentes avanços em animação de personagens virtuais baseada em física. De acordo com uma análise das publicações na área de animação de personagens virtuais [Geijtenbeek et al. 2011], depois de anos com o foco em técnicas baseadas em dados de movimento [Pejsa e Pandzic 2010], principalmente decorrente do sucesso da técnica de captura de movimentos e de suas inúmeras possibilidades, as técnicas baseadas em física parecem ter retomado a atenção dos pesquisadores.

Como já discutido, a maior motivação do uso da física em animação por computador é produzir movimentos fisicamente corretos de maneira automática. Intuitivamente, a física é usada a fim de reduzir o espaço que inclui todos os movimentos cinemáticos possíveis, restringindo as possíveis soluções de movimento a um espaço de movimentos fisicamente corretos. Quando simulação física é usada, por exemplo, a animação é implicitamente produzida apenas através da aplicação de forças e torques ao sistema, o que implica que o movimento resultante é automaticamente gerado e fisicamente correto de acordo com o modelo simplificado de física seguido pelo simulador específico usado.

A Figura 2.2 mostra um esquema ilustrando a utilização de uma simulação física para gerar animação. A simulação física de um sistema usa dinâmica direta para calcular as acelerações lineares e angulares dos objetos simulados, baseado no seu estado atual $q(t)$ e nas forças e torques aplicados. Assim, em cada instante da simulação, as acelerações são calculadas por dinâmica direta, e um novo estado $q(t + \delta t)$ é então obtido a partir do estado atual e dessas acelerações, através de uma integração numérica, que atualiza as posições, orientações e velocidades lineares e angulares dos objetos. A simulação física não faz parte do escopo deste

² Sistemas passivos e sistemas atuados são discutidos na Subseção 2.2.3.

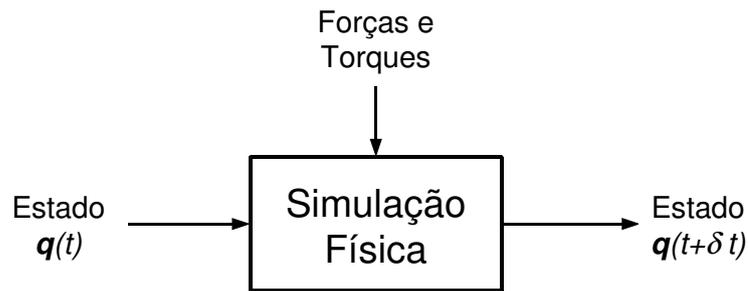


Figura 2.2: Animação gerada através do uso de simulação física.

trabalho e por isso pode ser considerada apenas como uma caixa preta que atualiza o estado do sistema adequadamente, dados os torques e as forças aplicados. Para mais detalhes de como calcular as equações de movimento para o uso da dinâmica direta, as seguintes referências podem ser consultadas [Kane e Levinson 2000, Featherstone 2007, ODE 2012].

2.2.3 Estruturas Articuladas Atuadas

Sistemas dinâmicos podem ser divididos em duas categorias: sistemas passivos e sistemas atuados. Os sistemas dinâmicos passivos, ou não-atuados, dependem unicamente de influência externa para se moverem. O sistema não possui autonomia para gerar torques ou forças de maneira voluntária, e a animação resultante do sistema não depende dele próprio. Um exemplo simples de sistema passivo é um projétil lançado sujeito apenas ao campo gravitacional. Sistemas apenas com molas e amortecedores, desde que as propriedades dessas molas e amortecedores, tais como posição de relaxamento e rigidez, não sejam alteradas de acordo com comandos voluntários, também são considerados passivos. Devido às suas características passivas, apenas a dinâmica de tais sistemas já é suficiente para gerar movimentos visualmente plausíveis.

Os sistemas dinâmicos atuados se diferenciam dos passivos principalmente por possuírem mecanismos de geração de torques internos e por serem capazes de executar tarefas voluntariamente, por meio do controle de seus movimentos. Esse controle consiste na especificação adequada das forças e torques gerados pelo conjunto de seus atuadores, e consequentemente o sistema não depende exclusivamente de forças externas [Raibert e Hodgins 1991]. Atuadores são dispositivos integrantes do sistema que são capazes de produzir movimento de acordo com comandos recebidos de outros dispositivos. Portanto, molas e amortecedores que não são capazes de atender a comandos, como exemplificado anteriormente, não são considerados atuadores.

No contexto de animação baseada em física de personagens virtuais, que são representados por estruturas articuladas atuadas, os atuadores se localizam nas suas juntas e funcionam como músculos, convertendo energia armazenada em torques que agem na estrutura mecânica do sistema. Na verdade, os músculos presentes em animais reais apenas são capazes de aplicar forças na estrutura óssea, de maneira voluntária, ao se contraírem. Por esse motivo, vários músculos são necessários para que seja possível executar todos os movimentos de uma única junta. Portanto, atuadores geralmente são modelados de maneira mais simplificada, ao invés de serem modelados exatamente como músculos reais. Eles podem ser representados, por exemplo, através de motores angulares capazes de aplicar torques em qualquer direção, dependendo do propósito e do tipo da junta.

2.2.4 Controladores

É importante notar que, no caso de sistemas dinâmicos atuados, diferente de sistemas passivos, apenas a obediência às leis da física não garante a naturalidade do movimento. A naturalidade e o realismo na animação de tais sistemas estão associados ao que é visualmente esperado pelos espectadores da animação em vários aspectos, e a correteza física é apenas um dos critérios dessa avaliação visual. Por exemplo, no caso de personagens virtuais, se nenhum torque for gerado pelos atuadores do personagem, ele provavelmente desabarà no chão e não será capaz de realizar os movimentos desejados. Portanto, mesmo obedecendo à física, o movimento não será considerado natural, pois, na maioria das situações, não é esperado que personagens ajam como estruturas passivas.

A animação de sistemas dinâmicos atuados requer portanto a solução de um problema de controle. O problema de controle consiste então em determinar as forças e os torques adequados a serem produzidos pelos atuadores do sistema, a fim de realizar o movimento desejado, e os controladores são as entidades responsáveis por fornecer esses comandos para os atuadores, funcionando como o cérebro do personagem. Essa analogia com organismos reais é discutida com mais detalhes em [Nunes 2006, Geijtenbeek et al. 2011]. Resumidamente, o controlador de movimento corresponde a partes do cérebro responsáveis por enviar os impulsos nervosos que transportam a informação de como contrair os músculos da maneira adequada para aplicar as forças corretas na estrutura esquelética e realizar o movimento desejado.

A Figura 2.3 ilustra a inserção do componente controlador agindo no laço da simulação física. Em cada instante da simulação, o controlador é responsável por enviar os torques internos, τ , a serem produzidos pelos atuadores e considerados na simulação. Informações sensoriais podem possivelmente influenciar a ação do controlador, dependendo da técnica

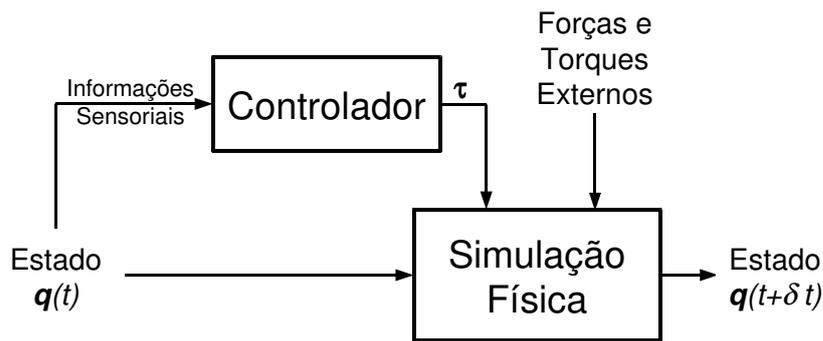


Figura 2.3: O controlador é responsável por calcular os torques internos a serem aplicados pelos atuadores do sistema, durante a simulação física.

usada. Essas informações sensoriais são chamadas de *feedback*, e consistem de qualquer informação relacionada ao estado atual do sistema, que inclui tanto a estrutura articulada quanto o ambiente como um todo. Elas são geralmente usadas para corrigir o movimento de acordo com mudanças imprevistas no sistema, fornecendo um controle mais estável desse movimento. Controladores podem ser classificados de acordo com o uso de *feedback*. São chamados controladores de laço aberto aqueles que não são influenciados por informações sensoriais durante a simulação física. Os torques são previamente especificados e não são corrigidos durante a execução da simulação. Quando os controladores se baseiam nas informações sensoriais para gerar os comandos de controle, são chamados controladores de laço fechado.

É importante ressaltar as dificuldades associadas ao problema de controle de personagens virtuais especificamente. A principal dificuldade é devido ao fato desses personagens serem representados por estruturas articuladas que não possuem atuadores associados a todos os seus graus de liberdade, sendo portanto chamadas *underactuated*. Os graus de liberdade globais devem ser então controlados através da interação da estrutura com o ambiente. Portanto, são as influências externas produzidas através do contato físico com o ambiente que conduzem esses graus de liberdade globais não-atuados da estrutura. Um exemplo bastante comum dessas influências externas são as forças de reação do chão.

Além disso, note que cada atuador possui influência direta na sua respectiva junta. Porém, essa influência não é exclusiva. Devido à dinâmica, a influência de um atuador localizado em uma junta também se propaga para as outras juntas da estrutura. Ou seja, os torques aplicados em uma junta também influenciam as demais devido ao fato de as equações de movimento do sistema serem acopladas, quando considerando as juntas individualmente como os graus de liberdade da estrutura. Portanto, os atuadores operam em conjunto, requerendo um controle coordenado do movimento. A Seção 2.4 mostra como as equações de movimento do sistema

podem ser desacopladas.

Controladores PD

Uma possibilidade de se representar o controlador é defini-lo no domínio cinemático. Ao invés de os torques serem definidos diretamente, controladores de baixo nível ficam responsáveis por calcular esses torques a partir de informações de orientações desejadas a serem atingidas pelas juntas durante a simulação. Baseado nessas informações cinemáticas desejadas, essa parte de mais baixo nível do controle é realizada localmente. Assim, os torques são computados em cada junta individualmente. Então, um componente gerador de movimentos é necessário para definir essas trajetórias cinemáticas para as juntas da estrutura, em um nível mais alto de abstração. A vantagem dessa representação é permitir que o movimento seja especificado num domínio mais intuitivo, quando comparando com a especificação direta de torques. Porém, como a dinâmica acopla o movimento da estrutura como um todo, controlar as juntas individualmente não é uma tarefa fácil, mesmo nesse domínio cinemático descrito.

Os controladores locais de baixo nível mais usados em animação de personagens virtuais são os chamados *Proportional-Derivative controllers*, ou controladores PD. O objetivo desses controladores de laço fechado é corrigir o erro entre o estado atual e o estado desejado da junta atuada, tentando fazer com que o estado desejado seja alcançado. A nomenclatura PD é usada porque a equação definida para o cálculo do torque possui um termo proporcional ao erro e um outro termo que depende da derivada do erro. O cálculo do torque assim definido é então dado pela seguinte equação:

$$\tau = k_p(\theta_d - \theta) + k_d(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}), \quad (2.1)$$

onde τ é o torque a ser aplicado na junta, θ representa a orientação atual da junta, θ_d a orientação desejada da junta, $\dot{\theta}$ a velocidade atual da junta, e $\dot{\theta}_d$ a velocidade desejada da junta. k_p e k_d são chamados de ganhos do controlador. Os valores desses ganhos podem estar simplesmente relacionados à modelagem física do personagem simulado, e mais detalhes de como esses valores influenciam o controle são discutidos em [Allen et al. 2007, Nunes et al. 2008]. Nesse caso, em que controladores PD são usados localmente no nível mais baixo do controlador, especificar as trajetórias cinemáticas do personagem corresponde a atribuir valores aos parâmetros θ_d e $\dot{\theta}_d$ para cada junta, em cada instante da simulação.

Note que, ao especificar uma orientação desejada fixa e ao manter a velocidade desejada igual a zero ($\dot{\theta}_d = 0$), a ação do controlador PD corresponde à ação passiva de uma mola angular com amortecimento localizada na junta. Nesse caso, θ_d define a orientação da junta na qual a mola se encontra relaxada, k_p define a rigidez da mola e k_d define as propriedades do

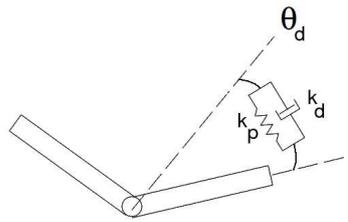


Figura 2.4: Mola com amortecimento agindo em uma junta.

amortecimento. A Figura 2.4 tenta ilustrar o comportamento de uma mola com amortecimento posicionada em uma junta. Uma mola angular funciona apenas levando a junta a assumir sua orientação de relaxamento, e isso não deve ser confundido com a ação de um atuador, como o funcionamento de um motor, por exemplo.

2.3 Controladores PD para Juntas 3D

Esta seção tem como objetivo mostrar como controladores PD são utilizados para fazer com que o personagem atinja uma pose específica, levando em consideração que a orientação da junta é definida em três dimensões. Nos casos mais simples, em que a junta possui apenas um grau de liberdade, sua orientação pode ser definida a partir de um único valor, e consequentemente a Equação 2.1 é diretamente calculada apenas com escalares. Por exemplo, no caso de estruturas articuladas definidas em duas dimensões, cada junta só permite rotação em torno do eixo perpendicular ao plano do movimento. Portanto, apenas um valor correspondente a um ângulo de rotação, facilmente medido, é necessário na especificação de cada orientação. Entretanto, quando a estrutura articulada é definida em três dimensões, dependendo do tipo de junta, a especificação da orientação exige mais de um parâmetro. A seguir, mostram-se os detalhes de como os torques na Equação 2.1 são calculados nesses casos.

A Figura 2.5 ilustra dois tipos de junta: junta dobradiça (*hinge*), e junta esférica (*ball and socket*). Nos dois casos, as juntas restringem o movimento relativo entre os corpos articulados de tal modo a mantê-los sempre unidos através de um ponto, que é apontado na figura como o ponto de encaixe da junta. No caso das juntas dobradiças, o movimento relativo entre os corpos é ainda mais restrito, se resumindo à rotação em torno de um único eixo, com direção fixa relativa aos corpos, embora podendo variar em coordenadas globais. Já as juntas esféricas permitem o movimento relativo entre os corpos em torno de qualquer eixo arbitrário, desde que a restrição do encaixe seja mantida. Portanto, qualquer movimento de rotação é possível, como pode-se intuitivamente perceber na ilustração. Note que enquanto as juntas dobradiças possuem

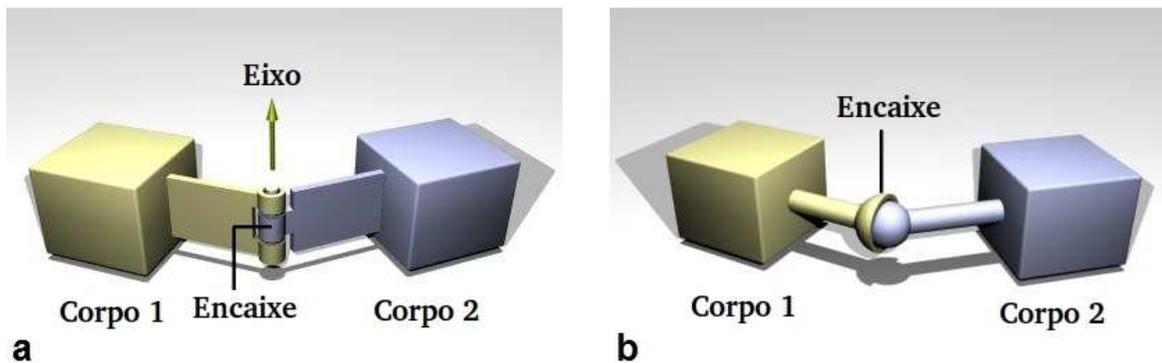


Figura 2.5: (a) junta dobradiça (*hinge*). (b) junta esférica (*ball and socket*).

apenas um grau de liberdade, as juntas esféricas possuem três.

As discussões contidas no restante deste capítulo assumem o uso de juntas esféricas, devido ao fato de essas juntas fornecerem maior liberdade de movimento, possibilitando portanto uma análise mais generalizada dos movimentos possíveis em estruturas articuladas.

2.3.1 Representação de Orientações 3D

Esta subseção tem como objetivo apenas apresentar resumidamente as principais formas de representação de orientações 3D a fim de realizar algumas comparações importantes entre elas. Mais detalhes sobre cada uma das representações apresentadas podem ser encontrados em [Watt e Watt 1992].

Diferente da especificação de posições 3D, orientações 3D não são especificadas tão diretamente, embora envolva o mesmo número de graus de liberdade. Orientações envolvem rotações, que não são tão fáceis de se representar quanto translações. Translações podem ser facilmente definidas em coordenadas cartesianas de maneira direta. Quanto a rotações, a maneira mais comum de representá-las é através de matrizes de rotação. Matrizes de rotação são matrizes quadradas que quando multiplicadas por um vetor mudam sua direção sem mudar sua magnitude. Uma matriz \mathbf{R} quadrada de dimensão $N \times N$ é então uma matriz de rotação se e somente se ela for *ortonormal*. Para ser ortonormal, todos os vetores correspondentes às colunas da matriz devem ser unitários e perpendiculares uns aos outros, formando assim uma base ortonormal do espaço $\mathcal{R}^{N \times N}$. Uma propriedade importante de matrizes ortonormais é que sua inversa é igual à sua transposta, ou seja, $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T$.

Assim, orientações 3D podem ser representadas por matrizes de rotação de dimensão 3×3 que rotacionam um vetor qualquer no espaço 3D em torno de um eixo de rotação específico,

percorrendo um ângulo determinado. Uma matriz de rotação pode também representar a composição de múltiplas rotações. De fato, qualquer conjunto de rotações pode ser representado por uma única matriz de rotação equivalente, obtida simplesmente multiplicando-se as matrizes correspondentes a cada rotação individual. Uma característica importante é que sempre é possível chegar de qualquer orientação a outra através de uma rotação simples, ao redor de um único eixo. Portanto, qualquer matriz de rotação pode também ser convertida em um eixo e um ângulo, o que também é suficiente para representar qualquer orientação 3D.

Matrizes de rotação podem ser calculadas tanto através da especificação do eixo e do ângulo de rotação, quanto através da especificação dos chamados *ângulos de Euler*. Especificar os ângulos de Euler corresponde a fornecer ângulos de rotação em torno de cada eixo principal x , y e z . Assim, as matrizes de cada uma dessas três rotações são multiplicadas para resultar na matriz de rotação total correspondente. Entretanto, essa representação através dos ângulos de Euler apresenta algumas limitações. Primeiro, como a ordem em que as matrizes de rotação são multiplicadas possui influência sobre a matriz resultante gerada, essa representação depende de uma ordem a ser escolhida de acordo com uma preferência não padronizada entre os eixos principais. Outra limitação, conhecida como *gimbal lock*, envolve a perda de graus de liberdade em algumas situações, em decorrência das singularidades existentes nessa representação. Além disso, existe uma grande dificuldade quanto à interpolação entre orientações, no caso em que uma transição suave e natural é desejada.

A representação através de *quatérnios* é uma alternativa que tem sido bastante usada. Também apresentando uma especificação concisa, essa representação surgiu com o objetivo de superar as limitações relacionadas à representação por ângulos de Euler. Quatérnios são números criados a partir da generalização dos números complexos para o mundo tridimensional, e têm esse nome por possuírem quatro parâmetros: um para sua parte real, e mais três constituindo sua parte imaginária. Apenas os quatérnios unitários são usados para representar rotações, e existe uma associação bem próxima entre os quatérnios unitários e a representação através de um eixo e um ângulo de rotação. Assim, a conversão entre essas duas representações é também possível e facilmente realizada. Consequentemente, cada quatérnio unitário também possui sua matriz de rotação correspondente.

Além disso, assim como a multiplicação de matrizes permite a composição de rotações, a multiplicação entre quatérnios unitários é definida com a mesma propriedade, sendo correspondente à multiplicação de matrizes. Comparando com o uso de matrizes de rotação, o uso de quatérnios disponibiliza operações mais baratas. Tanto a multiplicação e a inversa quanto a conversão para eixo e ângulo são realizadas através de um menor número de operações

básicas. Também, quatérnios são representados de maneira mais concisa, através de apenas quatro parâmetros, enquanto matrizes de rotação precisam de nove. O uso de quatérnios também permite uma interpolação natural entre orientações, obtida percorrendo o caminho mais curto sobre a superfície da hipersfera (generalização da esfera para quatro dimensões) de raio unitário formada pelo subconjunto dos quatérnios que representam rotações. O uso de quatérnios consiste, portanto, numa representação concisa de orientações 3D, disponibilizando uma solução matemática elegante para situações relacionadas tanto à composição de múltiplas rotações quanto à transição suave e natural entre orientações. Operações entre quatérnios são usadas neste trabalho e, para uma discussão mais detalhada sobre o uso de quatérnios, sugere-se consultar também as seguintes referências [Biasi e Gattass 2002, Cline 1999].

2.3.2 Sistemas de Coordenadas 3D

Todo tipo de operação deve ser realizado considerando as variáveis envolvidas sempre definidas num mesmo sistema de coordenadas. Por isso, é importante uma discussão mais detalhada sobre como sistemas de coordenadas 3D são definidos, e sobre como é feita a mudança entre diferentes sistemas de coordenadas. A definição de um sistema de coordenadas 3D consiste na especificação da sua origem e da direção de cada um dos seus três eixos principais. Entretanto, para que a especificação dessas informações seja possível, um sistema de coordenadas de referência é sempre necessário. Assim, um sistema de referência principal, chamado *sistema de coordenadas globais*, é convenientemente definido possuindo sua origem no ponto $(0,0,0)$ e seus eixos como sendo a base ortonormal canônica: $(1,0,0)$, $(0,1,0)$ e $(0,0,1)$. Qualquer sistema de coordenadas pode então ser definido em relação a esse sistema global.

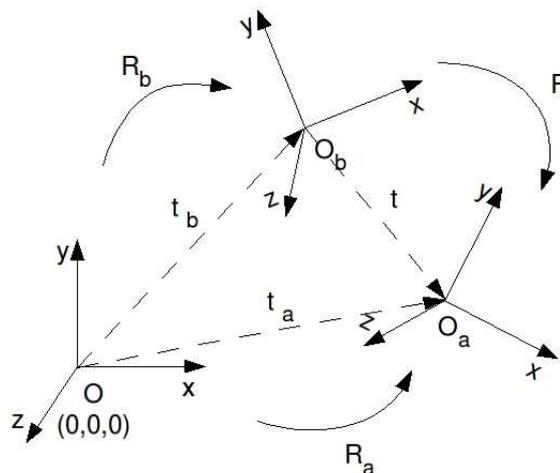


Figura 2.6: Mudança entre sistemas de coordenadas. ($R_a = {}^g_a R$, $R_b = {}^g_b R$ e $R = {}^b_a R$).

No caso geral, a maneira mais comum de se definir um sistema de coordenadas a , usando

um sistema de referência b , é através da definição de uma *matriz de transformação homogênea*, ${}^b_a\mathbf{T}$, responsável por transformar qualquer ponto ${}^a\mathbf{p}$, definido no sistema a , em seu ponto equivalente ${}^b\mathbf{p}$, definido em coordenadas do sistema b , usando a seguinte expressão: ${}^b\mathbf{p} = {}^b_a\mathbf{T}{}^a\mathbf{p}$, onde ${}^a\mathbf{p}$ e ${}^b\mathbf{p}$ são definidos também em coordenadas homogêneas. Como ilustrado na Figura 2.6, essa matriz ${}^b_a\mathbf{T}$ é definida a partir de uma orientação 3D, correspondente à rotação necessária para levar os eixos do sistema b a assumirem as direções dos eixos do sistema a , e de uma translação 3D, correspondente a mover a origem do sistema b em direção à origem do sistema a . Representando essa orientação 3D por uma matriz de rotação \mathbf{R} de dimensão 3×3 , e essa translação 3D através de um vetor \mathbf{t} de dimensão 3×1 , a matriz de transformação homogênea ${}^b_a\mathbf{T}$ de dimensão 4×4 , é dada por:

$${}^b_a\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.2)$$

É importante notar que, assim como a matriz \mathbf{R} , o vetor \mathbf{t} também deve ser definido relativo aos eixos do sistema de referência b . Portanto, o vetor ${}^s\mathbf{t} = \mathbf{t}_a - \mathbf{t}_b$, definido em coordenadas globais e correspondente ao vetor \mathbf{t} mostrado na Figura 2.6, deve ser convertido para coordenadas do sistema de referência b . Assim, o vetor \mathbf{t} usado na definição da matriz ${}^b_a\mathbf{T}$ é equivalente ao vetor ${}^b\mathbf{t} = \mathbf{R}_b^{-1} {}^s\mathbf{t}$.

Além da transformação relativa do sistema a para o sistema b , a Figura 2.6 também ilustra as transformações de cada um dos sistemas de coordenadas a e b para o sistema global. Entendido como uma matriz de transformação homogênea inclui na sua definição uma matriz de rotação dos eixos dos sistemas, discute-se, a seguir, o cálculo dessas matrizes de rotação. Sem perda de generalidade, utiliza-se como exemplo a matriz de rotação \mathbf{R}_a da figura, que transforma qualquer vetor ${}^a\mathbf{v}$, dado em coordenadas do sistema a , no vetor equivalente ${}^s\mathbf{v}$, em coordenadas globais: ${}^s\mathbf{v} = \mathbf{R}_a {}^a\mathbf{v}$. Para obter essa matriz \mathbf{R}_a , basta definir cada uma de suas colunas como sendo a direção unitária, dada em coordenadas globais, de cada eixo do sistema a , na seguinte ordem: $\mathbf{R}_a = [{}^s\mathbf{x}_a {}^s\mathbf{y}_a {}^s\mathbf{z}_a]$. Note a ortonormalidade da matriz \mathbf{R}_a , pois os eixos do sistema a são definidos unitários e perpendiculares. A matriz \mathbf{R} , por sua vez, pode ser calculada através da composição das matrizes de rotação \mathbf{R}_a e \mathbf{R}_b : $\mathbf{R} = \mathbf{R}_b^{-1} \mathbf{R}_a$. De maneira análoga à relação ${}^b\mathbf{t} = \mathbf{R}_b^{-1} {}^s\mathbf{t}$, a matriz \mathbf{R} também pode ser entendida como a matriz \mathbf{R}_a , dada em coordenadas globais, convertida para coordenadas do sistema de referência b .

É também importante lembrar que, assim como as matrizes de rotação, as matrizes de transformação também podem ser multiplicadas a fim de representar uma composição de transformações. Assim, tem-se, por exemplo, que: ${}^b_a\mathbf{T} = {}^b_g\mathbf{T} {}^g_a\mathbf{T}$, onde ${}^b_g\mathbf{T} = {}^g_b\mathbf{T}^{-1}$. Note que as matrizes de transformação homogêneas não são obrigatoriamente ortonormais e, diferente

das matrizes de rotação, **não** possuem a propriedade ${}^gT_b^{-1} = {}^gT_b^T$.

2.3.3 Orientações 3D das Juntas

Para se especificar a orientação de uma junta, a primeira coisa a se fazer é especificar um sistema de coordenadas associado a ela, o qual funcionará como o sistema de referência para se realizar as medidas angulares necessárias. Entretanto, como a orientação de uma junta é dada pela orientação relativa entre os corpos que a ela se ligam, primeiramente é preciso especificar a orientação de cada corpo.

Orientações 3D dos Corpos

Como no caso das juntas, a especificação da orientação de um corpo exige primeiramente a especificação de um sistema de coordenadas associado a ele. Além disso, informações de referência são também exigidas, consistindo de uma orientação e uma posição que devem ser assumidas como nulas (no caso, uma orientação nula corresponde a uma matriz de rotação igual à matriz identidade). Assim, a orientação e a posição do corpo são então medidas relativas a essa orientação e essa posição nulas de referência.

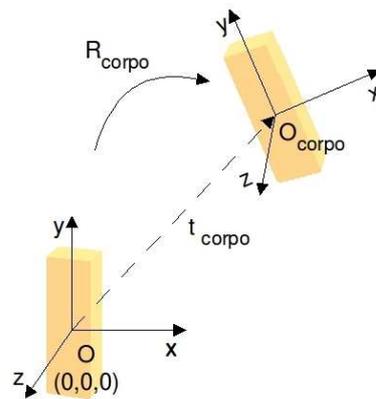


Figura 2.7: Sistema de coordenadas local de um corpo.

Intuitivamente, como ilustrado na Figura 2.7, definir essas informações pode ser pensado como definir o corpo com uma orientação e uma posição iniciais, correspondendo às informações nulas de referência em coordenadas globais, e associar (“fixar”) ao corpo um sistema de coordenadas local, inicialmente idêntico ao sistema global. Esse sistema de coordenadas local deve ser associado ao corpo de tal maneira que sua origem e seus eixos acompanhem o movimento do corpo como se estivesse colado nele.

Assim, a orientação 3D do corpo em coordenadas globais corresponderá à matriz de rotação

R_{corpo} , a mesma usada para definir a matriz de transformação homogênea (Subseção 2.3.2) desse sistema de coordenadas móvel, vinculado ao corpo, para o sistema de coordenadas globais. A posição 3D do corpo em coordenadas globais por sua vez corresponderá ao vetor de translação t_{corpo} . A orientação e a posição do corpo também podem ser facilmente definidas em qualquer outro sistema de coordenadas dado, simplesmente usando esse outro sistema como o sistema de referência. Note que, se o sistema de referência em questão for o próprio sistema local do corpo, a posição e a orientação obtidas serão sempre nulas.

É importante que a orientação e a posição nulas de referência sejam escolhidas de maneira conveniente ao propósito da animação. Quando o modelo do corpo é usado em simulação física, é conveniente que os seus eixos principais de inércia estejam alinhados com os eixos do seu sistema de coordenadas local e que seu centro de massa seja usado como origem desse sistema de coordenadas.

Orientações 3D Relativas Entre Corpos

Uma estrutura articulada é definida de acordo com uma hierarquia, a partir de um corpo principal chamado *corpo raiz*. Esse corpo corresponde portanto ao nível mais alto na hierarquia da estrutura. Seguindo essa hierarquia, cada junta associa sempre dois corpos possuindo diferentes níveis. O corpo de nível mais alto é chamado de *corpo pai* e o de nível mais baixo de *corpo filho*. Como dito anteriormente, a orientação de uma junta é dada pela orientação relativa entre seus respectivos corpos. Para medir essa orientação relativa, primeiramente é necessário que um sistema de coordenadas local da junta, vinculado ao seu corpo pai, seja definido. Definido esse sistema local, a orientação da junta então equivale simplesmente à orientação do seu corpo filho definida em coordenadas do sistema local da junta. É importante notar aqui que a orientação de uma junta esférica depende apenas da *orientação* relativa entre os corpos, não dependendo portanto da *posição* relativa entre eles. Assim, ao invés de uma matriz de transformação homogênea (Subseção 2.3.2), apenas uma matriz de rotação é usada para transformar a orientação do corpo filho.

Como ilustrado na Figura 2.8, a maneira mais simples de se definir o sistema de coordenadas local da junta é escolher sua origem coincidindo com o ponto de encaixe da junta e os seus eixos alinhados aos eixos do sistema de coordenadas do corpo pai da junta. Note que o sistema da junta é vinculado ao corpo pai de tal maneira que sua origem e seus eixos acompanham o movimento do corpo pai como se estivessem colados nele. No centro, a figura mostra dois corpos, inicialmente com suas orientações nulas (medidas em coordenadas globais), correspondendo à orientação da junta nula de referência. Na direita da figura, os mesmos dois

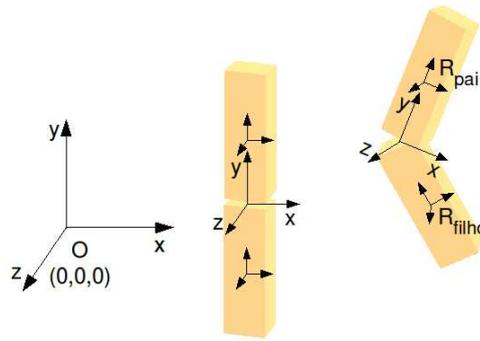


Figura 2.8: Sistema de coordenadas local da junta alinhado ao sistema de coordenadas local do corpo pai.

corpos são mostrados com orientações diferentes, arbitrariamente escolhidas. A orientação 3D da junta, R_{junta} , é então dada pela orientação 3D do seu corpo filho, R_{filho} (em coordenadas globais), transformada para coordenadas da junta. Como a orientação 3D do seu corpo pai, R_{pai} , transforma do sistema de coordenadas do corpo pai, alinhado ao sistema da junta, para o sistema de coordenadas globais, a orientação 3D necessária à transformação desejada é a inversa R_{pai}^{-1} . Portanto, a orientação 3D da junta é dada por: $R_{junta} = R_{pai}^{-1}R_{filho}$.

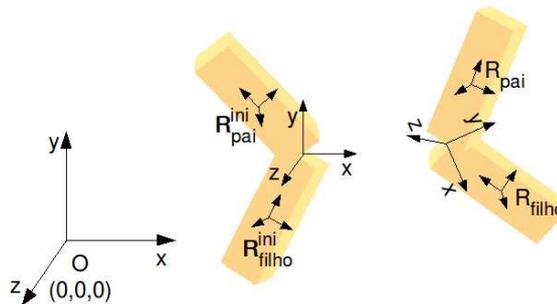


Figura 2.9: Caso mais geral do sistema de coordenadas local da junta, não alinhado ao sistema de coordenadas local do corpo pai.

A Figura 2.9 ilustra o caso mais geral, no qual é possível definir o sistema de coordenadas da junta ainda vinculado ao corpo pai mas não alinhado ao sistema de coordenadas do mesmo. Nesse caso, uma orientação inicial, não nula em coordenadas globais, é escolhida para o corpo pai e o sistema de coordenadas da junta é então associado ao mesmo, inicialmente alinhado ao sistema de coordenadas globais, como mostrado no centro da figura. Note que o sistema da junta, mesmo não estando alinhado ao sistema do corpo pai, ainda acompanha o seu movimento como se estivesse colado nele. Ainda em relação a esse caso mais geral, uma outra orientação inicial pode ser escolhida também para o corpo filho, a fim de permitir definir uma orientação nula de referência para a junta de maneira completamente arbitrária, de acordo com o propósito de cada situação. Novamente no centro da figura, pode-se notar que a orientação nula de

referência definida para a junta é agora livremente escolhida, diferente do caso mais simples mostrado na Figura 2.8.

Assim, nesse caso mais geral, essas orientações iniciais escolhidas para os dois corpos devem ser incluídas no cálculo da orientação da junta, \mathbf{R}_{junta} . Primeiramente, esse novo cálculo deve considerar a orientação do corpo filho a partir de sua orientação inicial escolhida, atualizando \mathbf{R}_{filho} para $\mathbf{R}_{filho}\mathbf{R}_{filho}^{ini-1}$. Depois, a orientação que transforma do sistema de coordenadas da junta para o sistema de coordenadas globais não é mais dada apenas por \mathbf{R}_{pai} , e sim por $\mathbf{R}_{pai}\mathbf{R}_{pai}^{ini-1}$. A inversa dessa orientação atualizada é portanto igual a $\mathbf{R}_{pai}^{ini}\mathbf{R}_{pai}^{-1}$. A orientação 3D da junta é, finalmente, definida como: $\mathbf{R}_{junta} = \mathbf{R}_{pai}^{ini}\mathbf{R}_{pai}^{-1}\mathbf{R}_{filho}\mathbf{R}_{filho}^{ini-1}$.

2.3.4 Relação Força/Rigidez/Deslocamento

Nesta subseção, a análise é resumida de modo a considerar apenas a conversão entre dois sistemas de coordenadas específicos a e b . Assume-se também o conhecimento da matriz \mathbf{T} capaz de transformar um vetor *deslocamento* qualquer, dado em coordenadas de a , para seu deslocamento equivalente em coordenadas de b , ou seja, ${}^b\boldsymbol{\delta} = \mathbf{T} {}^a\boldsymbol{\delta}$.

O objetivo desta subseção é demonstrar que, embora vetores representando velocidade ou aceleração também sejam transformados do sistema a para o sistema b através da mesma matriz \mathbf{T} , a matriz a ser usada para a transformação de vetores que representam forças é relacionada com a matriz \mathbf{T} , mas é definida de maneira diferente. Além disso, mudança de coordenadas é possível não apenas para vetores mas também para matrizes, tais como as matrizes de rigidez e as de amortecimento que são usadas no cálculo dos torques produzidos pelos controladores PD. Portanto, transformações de matrizes também são discutidas.

A demonstração é feita usando o fato de que o trabalho realizado por uma determinada força, o qual é calculado multiplicando essa força \mathbf{F} pelo seu deslocamento $\boldsymbol{\delta}$ correspondente, deve ser o mesmo, independente do sistema de coordenadas considerado. Assim:

$$\begin{aligned} {}^b\mathbf{F}^T {}^b\boldsymbol{\delta} &= {}^a\mathbf{F}^T {}^a\boldsymbol{\delta} \\ {}^b\mathbf{F}^T \mathbf{T} {}^a\boldsymbol{\delta} &= {}^a\mathbf{F}^T {}^a\boldsymbol{\delta} \\ {}^b\mathbf{F}^T \mathbf{T} &= {}^a\mathbf{F}^T \\ \mathbf{T}^T {}^b\mathbf{F} &= {}^a\mathbf{F} \\ {}^b\mathbf{F} &= \mathbf{T}^{-T} {}^a\mathbf{F}. \end{aligned} \tag{2.3}$$

Portanto, dado que os deslocamentos são transformados do sistema de coordenadas a para o sistema de coordenadas b através de \mathbf{T} , as forças são transformadas do sistema a para o sistema b através da transposta inversa \mathbf{T}^{-T} (*princípio da contragradência*).

Para obter a transformação de uma matriz de rigidez ${}^a\mathbf{K}$, em coordenadas de a , para sua equivalente ${}^b\mathbf{K}$, em coordenadas de b , basta que os vetores de força e de deslocamento sejam substituídos por seus equivalentes na equação:

$$\begin{aligned} {}^b\mathbf{F} &= {}^b\mathbf{K}{}^b\boldsymbol{\delta} \\ \mathbf{T}^{-T}{}^a\mathbf{F} &= {}^b\mathbf{K}\mathbf{T}{}^a\boldsymbol{\delta} \\ {}^a\mathbf{F} &= \mathbf{T}^T{}^b\mathbf{K}\mathbf{T}{}^a\boldsymbol{\delta}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Portanto, como ${}^a\mathbf{F} = {}^a\mathbf{K}{}^a\boldsymbol{\delta}$, temos que:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}^T{}^b\mathbf{K}\mathbf{T} &= {}^a\mathbf{K} \\ {}^b\mathbf{K} &= \mathbf{T}^{-T}{}^a\mathbf{K}\mathbf{T}^{-1}. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Essas relações valem para transformações gerais, incluindo transformações que também envolvem a posição relativa entre os sistemas de coordenadas, e não apenas a orientação relativa entre eles, tais como aquelas em que as matrizes de transformação são escritas em coordenadas homogêneas (Subseção 2.3.2) ou aquelas usadas para transformar vetores espaciais 6D (Subseção 2.4.3). Entretanto, quando transformações consideram apenas a orientação relativa entre os sistemas de coordenadas, as matrizes de transformação \mathbf{T} se resumem a matrizes de rotação \mathbf{R} . Conseqüentemente, essas relações podem ser simplificadas devido à propriedade de ortonormalidade dessas matrizes, para as quais vale a relação $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T$. Assim:

$$\begin{aligned} {}^b\boldsymbol{\delta} &= \mathbf{T}{}^a\boldsymbol{\delta} & \Rightarrow & \quad {}^b\boldsymbol{\delta} = \mathbf{R}{}^a\boldsymbol{\delta} \\ {}^b\mathbf{F} &= \mathbf{T}^{-T}{}^a\mathbf{F} & \Rightarrow & \quad {}^b\mathbf{F} = \mathbf{R}{}^a\mathbf{F} \\ {}^b\mathbf{K} &= \mathbf{T}^{-T}{}^a\mathbf{K}\mathbf{T}^{-1} & \Rightarrow & \quad {}^b\mathbf{K} = \mathbf{R}{}^a\mathbf{K}\mathbf{R}^T. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Essas novas equações são válidas, por exemplo, para o cálculo dos torques a serem aplicados em juntas esféricas, realizado através de controladores PD.

2.3.5 Controladores PD para Juntas Esféricas

Controladores PD calculam torques de acordo com a Equação 2.1. O torque calculado deve ser aplicado por um atuador interno, vinculado à respectiva junta, que funciona aplicando $\boldsymbol{\tau}$ no seu corpo filho e $-\boldsymbol{\tau}$ no seu corpo pai. No caso de estruturas articuladas 3D, $\boldsymbol{\tau}$ é um vetor de dimensão 3×1 , que deve ser representado em coordenadas globais. Portanto, todas as variáveis da equação devem ser definidas nesse mesmo sistema de coordenadas. Alternativamente, pode-se também definir todas as variáveis em coordenadas da junta e depois converter o torque resultante para coordenadas globais. Além disso, a Equação 2.1 mostra as variáveis envolvidas no cálculo desse torque numa forma mais simplificada, e precisa ser reformulada com mais

detalhes no caso em que a junta é do tipo esférica.

Como discutido ao longo desta seção, diferente dos casos em que a junta possui apenas um grau de liberdade, o cálculo do erro entre as orientações da junta não é realizado apenas através de uma subtração direta entre dois ângulos. Para juntas esféricas, esse erro deve ser calculado a partir das orientações 3D desejada e atual da junta, dadas pelas matrizes de rotação \mathbf{R}_d e \mathbf{R}_a respectivamente. A orientação 3D relativa correspondente ao erro é então dada por $\mathbf{R}_\varepsilon = \mathbf{R}_d \mathbf{R}_a^{-1}$. Entretanto, o erro precisa ser expresso na forma de um vetor $\boldsymbol{\varepsilon}$ de dimensão 3×1 para que seja possível usá-lo na equação do torque $\boldsymbol{\tau}$. Uma vez definidos o vetor normalizado \vec{e} e o ângulo θ , em radianos, como o eixo e o ângulo de rotação equivalentes à matriz de rotação \mathbf{R}_ε , o erro, na forma vetorial desejada, é obtido através de uma simples multiplicação: $\boldsymbol{\varepsilon} = \theta \vec{e}$. Como a orientação 3D da junta corresponde à orientação do seu corpo filho em coordenadas locais da junta, $\boldsymbol{\varepsilon}$ ainda deve ser convertido para coordenadas globais. No caso mais geral, ilustrado na Figura 2.9, essa mudança de coordenadas é dada por: ${}^g \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{R}_{pai} \mathbf{R}_{pai}^{ini}{}^{-1} j \boldsymbol{\varepsilon}$.

O segundo termo da Equação 2.1, no caso de juntas esféricas, também não é resolvido tão diretamente como no caso em que a junta possui apenas um grau de liberdade, embora não exija tanto cuidado quanto o primeiro termo. Para calcular esse termo, é importante considerar a representação da velocidade angular 3D. Assim como uma orientação 3D pode ser representada por um vetor, cuja direção indica o eixo de rotação e cujo módulo indica o ângulo da rotação (em radianos), uma velocidade angular 3D também pode ser representada de maneira vetorial, onde a direção e o sentido do vetor indicam o eixo de rotação e o sentido da rotação respectivamente, e o módulo do vetor representa o valor da velocidade angular em radianos por segundo. Portanto, dados os vetores $\boldsymbol{\omega}_{pai}$ e $\boldsymbol{\omega}_{filho}$, correspondendo às velocidades angulares 3D do corpo pai e do corpo filho respectivamente, a velocidade angular 3D relativa da junta pode ser simplesmente obtida pela subtração direta desses vetores: $\boldsymbol{\omega}_{junta} = \boldsymbol{\omega}_{filho} - \boldsymbol{\omega}_{pai}$. Finalmente, de maneira semelhante, o erro entre a velocidade angular desejada da junta, $\boldsymbol{\omega}_d$, e a velocidade angular atual da junta, $\boldsymbol{\omega}_a$, é obtido por: $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \boldsymbol{\omega}_d - \boldsymbol{\omega}_a$. Vale lembrar que $\boldsymbol{\omega}_d$ e $\boldsymbol{\omega}_a$ devem ser definidos no mesmo sistema de coordenadas, assim como $\boldsymbol{\omega}_{pai}$ e $\boldsymbol{\omega}_{filho}$ de cada situação. Note também que a mudança de coordenadas tanto para orientações quanto para velocidades angulares é realizada de maneira idêntica. Assim, caso necessário, $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ pode facilmente ser transformado para o sistema de coordenadas globais.

Para completar a reformulação da Equação 2.1, falta apenas redefinir as variáveis k_p e k_d . Adotando juntas esféricas e comparando a ação de um controlador PD com a ação de uma mola e um amortecedor passivos, pode-se dizer que essas variáveis correspondem às matrizes de rigidez e de amortecimento da junta. É possível definir a matriz de rigidez \mathbf{K}_p apenas através

de três valores, k_p^x , k_p^y e k_p^z , os quais representam as componentes de rigidez da junta em torno de cada um dos seus respectivos eixos locais x , y e z . Portanto, a matriz de rigidez ${}^j\mathbf{K}_p$, em coordenadas locais da junta, é definida simplesmente como a seguinte matriz diagonal:

$${}^j\mathbf{K}_p = \begin{pmatrix} k_p^x & 0 & 0 \\ 0 & k_p^y & 0 \\ 0 & 0 & k_p^z \end{pmatrix}. \quad (2.7)$$

De acordo com a Subseção 2.3.4, e sabendo que ${}^g\boldsymbol{\delta} = (\mathbf{R}_{pai}\mathbf{R}_{pai}^{ini})^{-1}{}^j\boldsymbol{\delta}$, a matriz de rigidez ${}^g\mathbf{K}_p$, em coordenadas globais, é obtida por:

$${}^g\mathbf{K}_p = (\mathbf{R}_{pai}\mathbf{R}_{pai}^{ini})^{-1}{}^j\mathbf{K}_p (\mathbf{R}_{pai}\mathbf{R}_{pai}^{ini}). \quad (2.8)$$

A matriz de amortecimento \mathbf{K}_d é obtida de maneira análoga.

Portanto, a nova equação reformulada para juntas esféricas, correspondente ao cálculo dos torques produzidos pelos controladores PD, pode ser resumida como:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{K}_p \boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{K}_d \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}. \quad (2.9)$$

2.3.6 Definindo uma Pose de Relaxamento do Personagem

Os torques aplicados em cada junta esférica do personagem são calculados através de controladores PD. Isso permite a fácil definição, de maneira mais geral, de uma pose desejada completa, realizada através da especificação das orientações desejadas de todas as juntas. Assim, torna-se possível calcular torques a serem aplicados no personagem como um todo, a fim de atingir essa pose definida. Analisando a ação desses controladores PD, quando a pose desejada e as velocidades angulares desejadas das juntas são mantidas fixas durante toda a simulação física, com essas velocidades angulares sempre iguais a zero, os torques aplicados correspondem simplesmente à ação passiva de molas e amortecedores angulares localizados nas juntas, responsáveis por manter o personagem numa pose de relaxamento, correspondente a essa pose desejada fixa. Nesta subseção, discute-se o funcionamento desse exemplo específico.

O objetivo aqui é saber como definir as informações de orientação desejada, de velocidade angular desejada, de rigidez e de amortecimento para cada uma das juntas. A possível dificuldade portanto está relacionada a como escolher os sistemas de coordenadas adequados para definir essas informações, para então realizar as operações da Equação 2.9 de acordo com esses sistemas de coordenadas escolhidos.

Primeiramente, uma pose de relaxamento do personagem deve ser definida e armazenada.

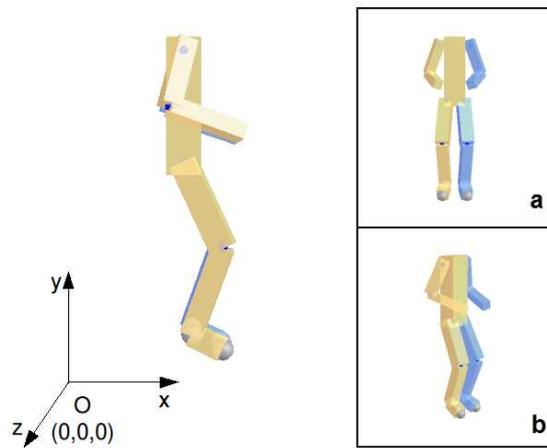


Figura 2.10: Personagem humanoide 3D em uma pose específica. Nesse caso, a pose escolhida mostrada corresponde tanto a sua pose de relaxamento quanto a sua pose nula de referência. Cada corpo possui uma orientação específica, dada em coordenadas globais. Os quadros à direita da figura correspondem à mesma pose, mas mostradas de pontos de vista diferentes. (a) vista frontal. (b) vista oblíqua.

A Figura 2.10 mostra um personagem humanoide 3D e ilustra a escolha de uma pose de relaxamento específica. Para definir uma pose, é suficiente definir uma orientação 3D inicial, dada em coordenadas globais, para cada um dos corpos do personagem. Com essas informações, a pose pode ser desenhada simplesmente posicionando cada um desses corpos de modo que as restrições de todas as juntas sejam obedecidas. Note que a posição global da pose não tem influência nesse caso.

Para o exemplo específico descrito no início desta subseção, é bastante conveniente que os sistemas de coordenadas de todas as juntas, assim como suas orientações nulas de referência, sejam definidos a partir dessa pose de relaxamento escolhida, de acordo com o caso mais geral mostrado na Figura 2.9. Assim, a pose escolhida também corresponderá à chamada pose nula de referência. Analisando o caso em que a pose nula é definida como pose desejada, as orientações desejadas das juntas podem ser trivialmente definidas como iguais a zero, correspondendo à matriz de rotação identidade. Note que a pose nula fornece as orientações iniciais dos corpos pais e filhos de todas as juntas do personagem, e, assim como as orientações nulas individuais das juntas, essa pose nula independe da orientação global da estrutura articulada.

Definidos os sistemas de coordenadas das juntas, as matrizes de rigidez e de amortecimento podem ser também definidas nesses mesmos sistemas locais. Assim, essas propriedades serão mantidas sempre constantes em relação ao corpo pai da junta, independente da orientação global desse corpo durante a simulação física. Já no caso das velocidades angulares desejadas, por serem iguais a zero, a escolha do sistema de coordenadas no qual elas devem ser definidas não

possui influência alguma. Em casos mais gerais, em que se deseja seguir trajetórias (obtidas a partir de movimentos capturados, por exemplo) ao invés de uma única pose, as velocidades desejadas são normalmente obtidas por diferenças finitas a partir das orientações desejadas, e por isso são definidas no mesmo sistema de coordenadas em que as orientações desejadas são definidas. Geralmente, esse sistema é o sistema de coordenadas local da junta.

2.4 Análise Modal

A análise modal de um sistema mecânico consiste no estudo de suas oscilações mecânicas em relação a seu estado de equilíbrio. Devido às propriedades elásticas dos materiais, mover um sistema de modo a afastá-lo do seu estado de equilíbrio corresponde a armazenar energia potencial elástica no mesmo. As vibrações que ocorrem em um sistema estão diretamente relacionadas à conversão natural entre energia cinética e energia potencial elástica que acontece à medida que ele se movimenta. O estudo das vibrações deve investigar como essa troca de energia é realizada e como ela influencia o movimento do sistema, de acordo com sua estrutura e suas propriedades físicas. Discussões detalhadas sobre o assunto desta seção são encontradas em [Jain e Liu 2011, Kry et al. 2009, Thomson 1993, Shabana 1997].

2.4.1 Movimentos Harmônicos Simples

O sistema mais simples de ser analisado é aquele que possui dinâmica linear e que pode, a partir de um estado inicial qualquer, vibrar livremente sem a influência de forças externas e sem amortecimento. Assim, quando tal sistema possui apenas um grau de liberdade, seu movimento pode ser representado através de um *movimento harmônico simples*, no qual as trocas de energia determinam que o sistema vibre de acordo com uma função senoidal específica. A Figura 2.11 ilustra um sistema constituído por apenas um corpo rígido preso a uma mola linear, em que uma das extremidades da mola é mantida fixa a um suporte e a outra é presa ao centro de massa do corpo.

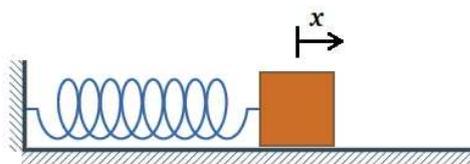


Figura 2.11: Exemplo de movimento harmônico simples.

Assumindo que a única força agindo no corpo é a força aplicada pela mola, a equação

de movimento do sistema é dada por: $m\ddot{x} = -kx$, onde m é a massa do corpo, x é o seu deslocamento relativo à posição de equilíbrio, e k é a rigidez da mola. Conseqüentemente, a solução dessa equação diferencial pode ser dada por: $x(t) = A \text{sen}(\omega t + \varphi)$, onde A é a amplitude do movimento (valor máximo de x), $\omega = 2\pi f$ é a sua frequência angular, e φ é a sua fase. A frequência f é conhecida como a *frequência natural* do sistema. Note que essa frequência é única, constante e não depende do estado inicial escolhido para o sistema. Isso pode ser verificado explicitamente derivando $x(t)$ duas vezes a fim de obter: $\ddot{x}(t) = -\omega^2 A \text{sen}(\omega t + \varphi) = -\omega^2 x(t)$. Como $\ddot{x} = -(k/m)x$, é fácil ver que $\omega^2 = k/m$, ou seja, a frequência do movimento depende apenas da rigidez da mola e da massa do corpo.

Já quando tal sistema possui mais de um grau de liberdade, embora seu movimento não possa mais ser representado por um único movimento harmônico simples, ainda é possível decompô-lo na forma de um somatório de movimentos desse tipo:

$$\mathbf{x}(t) = \sum_i A_i \boldsymbol{\phi}_i \text{sen}(\omega_i t + \varphi_i), \quad (2.10)$$

onde \mathbf{x} é o vetor dos graus de liberdade definidos para o sistema; A_i , ω_i e φ_i são respectivamente a amplitude, a frequência angular e a fase do i -ésimo componente harmônico; e $\boldsymbol{\phi}_i$ é um vetor correspondente ao modo de vibração do i -ésimo componente harmônico.

De acordo com essa possível decomposição, pode-se perceber que um sistema com múltiplos graus de liberdade possui também múltiplas frequências naturais, $f_i = \omega_i/(2\pi)$, associadas a cada um dos respectivos componentes harmônicos do seu movimento. É importante perceber também que cada componente harmônico individual **não** corresponde diretamente ao movimento individual de um dos graus de liberdade originalmente definidos para o sistema, $x_i(t)$. Portanto, cada um desses componentes possui também um modo de vibração específico associado, $\boldsymbol{\phi}_i$, o qual define a forma natural com que o sistema vibra, como um todo, na sua respectiva frequência natural f_i . Cada elemento do vetor $\boldsymbol{\phi}_i$ corresponde então à influência relativa de um dos graus de liberdade originalmente definidos para o sistema, na i -ésima vibração em questão. Esses modos correspondem aos *modos de vibração naturais* do sistema. Note que, para obter o movimento completo do sistema, é possível gerar cada um dos seus componentes harmônicos independentemente e então simplesmente somá-los.

A análise modal de tal sistema com múltiplos graus de liberdade deve determinar portanto os seus modos e as suas frequências de vibração naturais. Note que tanto suas amplitudes quanto suas fases dependem apenas do estado inicial do sistema.

2.4.2 Sistemas com Múltiplos Graus de Liberdade

Para um sistema com N graus de liberdade $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_N)^T$ e dinâmica linear, as equações de movimento, em sua forma matricial geral, podem ser escritas como:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{f} , \quad (2.11)$$

onde \mathbf{M} , \mathbf{D} e \mathbf{K} são as matrizes de massa, amortecimento e rigidez do sistema; e \mathbf{f} corresponde ao vetor das forças sendo aplicadas ao sistema. As matrizes são todas quadradas, de dimensão $N \times N$, e simétricas. Os vetores \mathbf{q} , $\dot{\mathbf{q}}$, $\ddot{\mathbf{q}}$ e \mathbf{f} , dados em coordenadas generalizadas, são todos de dimensão N .

Considerando o caso de vibração livre, em que o sistema é permitido vibrar sem a influência de forças externas e sem amortecimento, a análise modal pode ser realizada considerando a seguinte simplificação da Equação 2.11:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = 0 . \quad (2.12)$$

Problema de Autovalores e Autovetores

Dadas as simplificações mencionadas, pode-se perceber que as acelerações do sistema, $\ddot{\mathbf{q}}$, são linearmente proporcionais aos seus deslocamentos, \mathbf{q} , caracterizando portanto o comportamento de movimentos harmônicos. Assim como no caso envolvendo apenas um grau de liberdade, esses movimentos harmônicos também podem ser representados através de funções senoidais, como mostrado na Equação 2.10, e, conseqüentemente, as acelerações podem ser expressas de acordo com a seguinte função dos deslocamentos: $\ddot{\mathbf{q}} = -\omega^2\mathbf{q}$, onde ω é um valor escalar que representa as possíveis frequências angulares do sistema. Portanto, definindo $\lambda = \omega^2$, as soluções admissíveis para \mathbf{q} na Equação 2.12 consistem das soluções para o seguinte problema de autovalores generalizado:

$$\mathbf{K}\mathbf{q} = \lambda\mathbf{M}\mathbf{q} , \quad (2.13)$$

onde λ representa os autovalores; e \mathbf{q} representa os autovetores. As frequências naturais do sistema podem ser obtidas, a partir dos autovalores resultantes, de acordo com a seguinte expressão: $f_i = \sqrt{\lambda_i}/(2\pi)$. Já os modos de vibração do sistema equivalem exatamente aos autovetores resultantes, os quais formam uma base para as soluções admissíveis para \mathbf{q} , chamada de *base modal*. Note que, como a matriz \mathbf{M} é sempre invertível, o problema de autovalores generalizado acima pode ser redefinido como um problema de autovalores na sua forma mais simples $(\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K})\mathbf{q} = \lambda\mathbf{q}$.

Os autovalores e autovetores resultantes da Equação 2.13 são também geralmente descritos numa forma matricial, correspondendo ao modelo modal resultante do sistema. Assim, define-se uma matriz dos autovetores, $\Phi = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N)$, cuja coluna ϕ_i corresponde ao i -ésimo autovetor resultante; e uma matriz diagonal dos autovalores, ou equivalentemente das frequências angulares ao quadrado, $\Omega = \text{diag}(\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_N^2)$. Usando essas representações matriciais da solução, pode-se ainda reescrever a equação do problema de autovalores na seguinte forma: $(M^{-1}K) = \Phi\Omega\Phi^{-1}$.

Desacoplando as Equações de Movimento

Os autovetores resultantes da Equação 2.13, correspondentes aos modos de vibração do sistema, possuem propriedades muito importantes chamadas *propriedades ortogonais dos autovetores*. De acordo com essas propriedades, as colunas da matriz Φ são tanto M -ortogonais quanto K -ortogonais. Isso significa que as matrizes M e K são diagonalizadas pela matriz Φ , isto é, $\Phi^T M \Phi$ e $\Phi^T K \Phi$ são matrizes diagonais. Portanto, pode-se escrever: $M_d = \Phi^T M \Phi = \text{diag}(m_1, m_2, \dots, m_N)$ e $K_d = \Phi^T K \Phi = \text{diag}(k_1, k_2, \dots, k_N)$. Os elementos m_i e k_i são denominados *massas generalizadas* e *rigidezes generalizadas*, respectivamente.

As propriedades de ortogonalidade dos autovetores são importantes porque, desde que as matrizes M e K podem ser diagonalizadas, as equações de movimento de sistemas dinâmicos lineares com múltiplos graus de liberdade, mostradas na Equação 2.11 em sua forma matricial, podem ser desacopladas e conseqüentemente resolvidas de maneira independente. Entretanto, para que esse desacoplamento seja possível, a matriz de amortecimento D deve ser uma combinação linear das matrizes M e K , ou seja, $D = \alpha M + \beta K$. Essa restrição, conhecida como *amortecimento de Rayleigh*, é bastante conveniente nesse caso, pois garante que a matriz D também possa ser diagonalizada.

Note que as propriedades ortogonais das colunas da matriz Φ não implicam que elas sejam ortogonais entre si. Portanto, a matriz Φ não é necessariamente ortogonal. De fato, a base modal somente será ortogonal se a matriz $M^{-1}K$ for simétrica. Entretanto, a ortogonalidade propriamente dita da base modal não tem tanta importância nesse caso porque, mesmo que a base modal não seja ortogonal, as propriedades de desacoplamento e independência entre os modos de vibração são mantidas. De qualquer forma, deve-se observar que a relação $\Phi^{-1} = \Phi^T$ só é válida para matrizes ortonormais.

Usando a matriz de transformação modal Φ , pode-se obter o vetor q , definido em coordenadas generalizadas, a partir de um vetor p , dado em *coordenadas modais*: $q = \Phi p$. Portanto, substituindo q por Φp , D por $\alpha M + \beta K$, e pré-multiplicando a Equação 2.11 por Φ^T ,

obtem-se um novo conjunto de equações de movimento definidas em coordenadas modais:

$$\begin{aligned} \Phi^T M \Phi \ddot{\mathbf{p}} + \Phi^T (\alpha M + \beta K) \Phi \dot{\mathbf{p}} + \Phi^T K \Phi \mathbf{p} &= \Phi^T \mathbf{f} \\ M_d \ddot{\mathbf{p}} + (\alpha M_d + \beta K_d) \dot{\mathbf{p}} + K_d \mathbf{p} &= \Phi^T \mathbf{f}. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Como discutido anteriormente, ao diagonalizar as matrizes da Equação 2.11, obtêm-se N equações desacopladas e independentes, envolvendo apenas um grau de liberdade cada, que podem ser escritas como:

$$m_i \ddot{p}_i + d_i \dot{p}_i + k_i p_i = f_i, \quad (2.15)$$

onde $d_i = \alpha m_i + \beta k_i$, e f_i é o i -ésimo elemento do vetor $\Phi^T \mathbf{f}$. Note que, se o amortecimento d_i e a força f_i forem ignorados, a Equação 2.15 reduz-se à expressão: $\ddot{p}_i = -(k_i/m_i)p_i$. De maneira análoga ao caso de sistemas com apenas um grau de liberdade, $\ddot{p}_i = -\omega_i^2 p_i$ e, portanto, $\omega_i^2 = k_i/m_i$.

Solução Analítica para Vibrações

Resolver essas equações desacopladas é equivalente a resolver múltiplos problemas com apenas um grau de liberdade envolvido, possibilitando a existência de uma solução analítica. Como cada equação desacoplada equivale agora à equação de um modo de vibração do sistema, uma solução analítica pode ser obtida separadamente para cada uma dessas vibrações. Ainda considerando o caso de vibração livre sem amortecimento, ou seja, $d_i = 0$ e $f_i = 0$, a solução da Equação 2.15 pode ser escrita como:

$$p_i(t) = A_i \text{sen}(\omega_i t + \varphi_i), \quad (2.16)$$

onde A_i e φ_i são a amplitude e a fase da i -ésima vibração, determinadas a partir das condições iniciais, em coordenadas modais, p_{0i} e \dot{p}_{0i} , também correspondentes à i -ésima vibração. Os vetores correspondentes às condições iniciais para todas as vibrações, $(\mathbf{p}_0, \dot{\mathbf{p}}_0)$, em coordenadas modais, podem ser facilmente obtidos a partir dos vetores correspondentes às condições iniciais, $(\mathbf{q}_0, \dot{\mathbf{q}}_0)$, em coordenadas generalizadas: $\mathbf{p}_0 = \Phi^{-1} \mathbf{q}_0$ e $\dot{\mathbf{p}}_0 = \Phi^{-1} \dot{\mathbf{q}}_0$. O movimento completo pode então ser dado pela simples superposição dessas vibrações individuais obtidas. Para isso, basta converter os vetores $\mathbf{p}(t)$ e $\dot{\mathbf{p}}(t)$, obtidos analiticamente, de volta para coordenadas generalizadas: $\mathbf{q}(t) = \Phi \mathbf{p}(t)$ e $\dot{\mathbf{q}}(t) = \Phi \dot{\mathbf{p}}(t)$.

Quando o amortecimento no sistema é levado em consideração, algumas atualizações devem ser realizadas a partir do caso não amortecido. Por exemplo, uma nova frequência angular para o caso amortecido deve ser definida a partir da frequência angular não amortecida ω_i . Definindo o valor conhecido como o *amortecimento crítico* por $d_{ci} = 2\sqrt{k_i m_i}$, e um

outro valor conhecido como a *relação de amortecimento* por $\xi_i = d_i/d_{ci}$, pode-se definir a frequência angular amortecida por: $\omega_{di} = \omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2}$. Note que vibrações somente ocorrem em sistemas amortecidos quando $\xi_i < 1$. Diferente das frequências naturais, os modos de vibração naturais de um sistema não amortecido não são alterados quando amortecimento de Rayleigh é adicionado. Também é importante perceber que as amplitudes das vibrações não são mantidas constantes devido à perda de energia causada pelo amortecimento. É portanto necessário incluir um fator responsável pelo decréscimo da amplitude na expressão da vibração resultante: $e^{-\xi_i \omega_i t}$. Esse fator depende diretamente da relação de amortecimento ξ_i , que é, geralmente, usada para analisar a influência do amortecimento no comportamento do sistema. A partir da expressão definida para sistemas não amortecidos (Equação 2.16), uma nova expressão mais geral, que pode ser usada também para sistemas amortecidos, é escrita como:

$$p_i(t) = A_i e^{-\xi_i \omega_i t} \text{sen}(\omega_{di} t + \varphi_i) . \quad (2.17)$$

A Figura 2.12 apresenta o gráfico da função $p_i(t)$, onde pode-se verificar a influência do amortecimento nas vibrações. De acordo com o valor de ξ_i , a i -ésima vibração é classificada como: livre, caso $\xi_i = 0$; subamortecida, caso $0 < \xi_i < 1$; criticamente amortecida, caso $\xi_i = 1$; e sobreamortecida, caso $\xi_i > 1$.

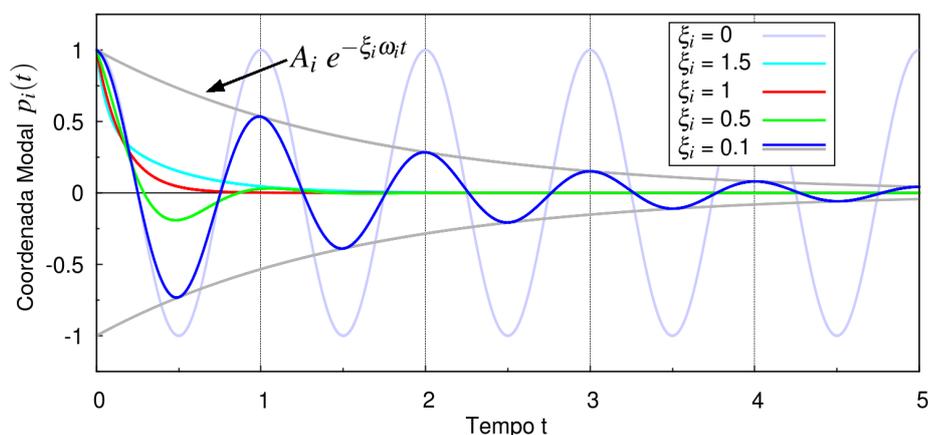


Figura 2.12: Gráfico da função correspondente à Equação 2.17, mostrando a influência do valor de ξ_i na i -ésima vibração. Nesse exemplo, temos que: $A_i = 1$, $f_i = 1$, $\omega_i = 2\pi$ e $\varphi_i = \pi/2$.

Nas vibrações amortecidas forçadas, pode-se definir o impulso, I_f , como um impulso aplicado no instante de tempo t_f : $I_f = \int_{t_f}^{t_f + \delta t} f(t) dt$. A resposta do sistema a esse impulso é então dada por:

$$\bar{p}_i(t) = I_i \left(\frac{e^{-\xi_i \omega_i (t - t_f)}}{m_i \omega_{di}} \text{sen}(\omega_{di} (t - t_f)) \right) , \quad (2.18)$$

onde $I_i = \int_{t_f}^{t_f+\delta t} f_i(t) dt$ é o i -ésimo elemento do vetor $\Phi^T I_f$. Portanto, a solução analítica para a i -ésima vibração amortecida, quando o impulso I_f é aplicado no instante de tempo t_f , é dada pela soma de $p_i(t)$ da Equação 2.17 com $\bar{p}_i(t)$ da Equação 2.18.

2.4.3 Análise Modal para Estruturas Articuladas

Em computação gráfica, análise modal tem sido mais comumente usada em modelos deformáveis [Pentland e Williams 1989, Faloutsos et al. 1997, James e Pai 2002, Hauser et al. 2003, Barbic et al. 2009]. Entretanto, neste trabalho, a análise modal é realizada em personagens virtuais representados através de estruturas de corpos rígidos articulados. Portanto, nesta subseção, apresentam-se detalhes de como essa análise pode ser realizada para tais personagens. A abordagem usada é a mesma proposta em [Kry et al. 2009], na qual o estado do sistema é representado através das informações de orientação e posição de cada corpo rígido individualmente, exigindo que restrições, tais como as restrições impostas pelas juntas da estrutura, sejam adicionadas ao sistema. Essas restrições são responsáveis pela redução dos graus de liberdade do sistema, constituído inicialmente por corpos rígidos independentes.

Coordenadas Completas versus Coordenadas Reduzidas

A parametrização usada neste trabalho para definir o estado da estrutura, representada através de todos os seis graus de liberdade necessários para determinar a orientação e a posição de cada corpo rígido, é conhecida como parametrização por *coordenadas completas*. As restrições do sistema são então representadas através de equações de restrição, responsáveis por manter os corpos em configurações pertencentes ao subespaço de estados admissíveis.

Uma outra possibilidade de parametrização do estado é a parametrização por *coordenadas reduzidas*. Nesse caso, as restrições já devem ser implicitamente definidas na própria representação paramétrica do estado. Portanto, ao invés de usar seis parâmetros para cada corpo, a quantidade de parâmetros usada já é igual ao número de graus de liberdade do sistema. Conseqüentemente, o espaço paramétrico inteiro corresponde a configurações válidas. Note que, ao serem usadas coordenadas completas, apenas um subespaço, de dimensão mais baixa, de todas as configurações possíveis é consistente com as restrições. O uso de coordenadas reduzidas também permite um ganho significativo em eficiência computacional para sistemas com muitas restrições e poucos graus de liberdade.

Entretanto, a definição de tal parametrização reduzida pode ser muito complicada em certas situações. Além disso, o número de graus de liberdade do sistema pode mudar,

por exemplo, quando contatos envolvendo os corpos e o ambiente ocorrerem. Usando coordenadas completas, essas mudanças podem ser facilmente tratadas simplesmente incluindo ou removendo as equações de restrição correspondentes a cada situação, quando necessário. Em contextos que envolvem física, essa habilidade permite que os sistemas sejam facilmente representados de maneira geral e flexível.

Vetores Espaciais 6D

A parametrização do estado da estrutura articulada por coordenadas completas exige que seis parâmetros sejam definidos para cada corpo rígido, seus seis graus de liberdade: três referentes à sua orientação e três referentes à sua posição. Convenientemente, para facilitar as operações envolvendo essa representação de corpos rígidos, usa-se uma notação mais geral, chamada aqui de *vetores espaciais 6D* [Cline 1999, Kry et al. 2009]³.

De acordo com essa notação, para representar as velocidades e as forças aplicadas nos respectivos corpos rígidos, as informações de orientação e posição são concatenadas em um único vetor de seis dimensões. Assim, a *velocidade 6D* de um corpo rígido, também conhecida como *twist*, é representada pelo vetor $\mathfrak{v} = (\boldsymbol{\omega}^T, \mathbf{v}^T)^T$, onde $\boldsymbol{\omega}$ corresponde à sua velocidade angular e \mathbf{v} corresponde à sua velocidade linear. De maneira análoga, a *força 6D* aplicada em um corpo rígido, também conhecida como *wrench*, é representada pelo vetor $\mathfrak{f} = (\boldsymbol{\tau}^T, \mathbf{f}^T)^T$, onde $\boldsymbol{\tau}$ corresponde ao torque aplicado e \mathbf{f} corresponde à força aplicada.

Além disso, definida uma velocidade 6D em um sistema de coordenadas a específico, representada por ${}^a\mathfrak{v}$, é fundamental saber como essa velocidade 6D pode ser convertida para um outro sistema de coordenadas qualquer b , resultando na velocidade 6D ${}^b\mathfrak{v}$. Essa conversão é feita através de uma matriz chamada *matriz de transformação adjunta*, ${}^b\mathbf{Ad}_a$, de dimensão 6×6 , que pode ser facilmente construída a partir da matriz de transformação homogênea correspondente ${}^b\mathbf{T}_a$ (Subseção 2.3.2):

$${}^b\mathbf{Ad}_a = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{0} \\ [t]\mathbf{R} & \mathbf{R} \end{pmatrix}, \quad (2.19)$$

onde \mathbf{R} e t são definidos de acordo com a Equação 2.2:

$${}^b\mathbf{T}_a = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0} & 1 \end{pmatrix},$$

e $[t]$ corresponde à matriz anti-simétrica, de dimensão 3×3 , equivalente ao produto vetorial $\mathbf{t} \times$:

³ Para mais detalhes e materiais relacionados a essa notação e a sua álgebra correspondente, conhecida como *spatial vector algebra*, sugere-se a seguinte referência [Featherstone 2012].

$$\mathbf{t} \times \mathbf{x} = [\mathbf{t}]\mathbf{x} = \begin{pmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{pmatrix} \mathbf{x}. \quad (2.20)$$

Note que as discussões feitas na Subseção 2.3.4 também são válidas para essa notação 6D. Portanto, forças 6D podem ser transformadas usando a inversa transposta da matriz adjunta. Assim:

$$\begin{aligned} {}^b\boldsymbol{\vartheta} &= {}^b\mathbf{A}d^a\boldsymbol{\vartheta} \\ {}^b\boldsymbol{\zeta} &= {}^a\mathbf{A}d^T\boldsymbol{\zeta}, \end{aligned} \quad (2.21)$$

onde ${}^b\mathbf{A}d^{-1} = {}^a\mathbf{A}d$.

Problema de Autovalores e Autovetores para Estruturas Articuladas

Parametrizando o estado da estrutura por coordenadas completas, e usando vetores espaciais 6D, pode-se montar o vetor velocidade da estrutura inteira concatenando as velocidades 6D de todos os corpos rígidos em um único vetor coluna, cujo número de linhas é igual a seis vezes o número de corpos (n_c): $\boldsymbol{\vartheta} = (\boldsymbol{\vartheta}_{c_1}^T, \boldsymbol{\vartheta}_{c_2}^T, \dots, \boldsymbol{\vartheta}_{c_{n_c}}^T)^T$.

Assim, dada uma pose de equilíbrio específica, definida da mesma maneira como no cálculo dos controladores PD discutido na Subseção 2.3.6 (ver Figura 2.10 como exemplo), e assumindo que a estrutura articulada encontra-se nessa pose de equilíbrio, as equações de movimento mostradas na Equação 2.12 podem ser reescritas da seguinte forma:

$${}^c\mathbf{M} \dot{\boldsymbol{\vartheta}} + {}^c\mathbf{K} \boldsymbol{\vartheta} h = 0, \quad (2.22)$$

onde ${}^c\boldsymbol{\vartheta}$ é definido em coordenadas dos corpos, o que significa que cada velocidade 6D individual é especificada no sistema de coordenadas local do seu respectivo corpo rígido; ${}^c\mathbf{M}$ e ${}^c\mathbf{K}$ são respectivamente as matrizes de massa e rigidez, também definidas em coordenadas dos corpos; e ${}^c\boldsymbol{\vartheta}h$ corresponde ao deslocamento a partir da pose de relaxamento dada.

Entretanto, define-se inicialmente a matriz ${}^j\mathbf{K}$, em coordenadas das juntas, para em seguida convertê-la para ${}^c\mathbf{K}$, em coordenadas dos corpos. Para isso, primeiramente constrói-se a matriz $\boldsymbol{\Theta}$, responsável por converter ${}^c\boldsymbol{\vartheta}$ para ${}^j\boldsymbol{\vartheta}$. De acordo com a Equação 2.6, mostrada na Subseção 2.3.4, dado que ${}^j\boldsymbol{\vartheta} = \boldsymbol{\Theta} {}^c\boldsymbol{\vartheta}$, pode-se deduzir que ${}^c\mathbf{K} = \boldsymbol{\Theta}^T {}^j\mathbf{K} \boldsymbol{\Theta}$.

Além disso, a Equação 2.22 considera simplesmente um conjunto de corpos rígidos independentes. Portanto, para realizar a análise modal, todas as restrições do sistema devem ser consideradas, tais como as restrições impostas pelas juntas. Para isso, definem-se as equações

de restrição do sistema através da seguinte expressão matricial: $\mathbf{G} \mathbf{c} \boldsymbol{\vartheta} = 0$, onde cada linha da matriz \mathbf{G} representa uma dessas equações. Como $\mathbf{c} \boldsymbol{\vartheta}$ somente é válido se satisfizer $\mathbf{G} \mathbf{c} \boldsymbol{\vartheta} = 0$, o subespaço admissível para $\mathbf{c} \boldsymbol{\vartheta}$ pode ser descrito pelo espaço nulo de \mathbf{G} , o qual é representado pela matriz \mathbf{N} . Ou seja, cada coluna da matriz \mathbf{N} corresponde a um elemento da base que forma o espaço nulo de \mathbf{G} . Portanto, para garantir que $\mathbf{c} \boldsymbol{\vartheta}$, definido em coordenadas dos corpos, sempre obedeça às restrições definidas pela matriz \mathbf{G} , basta obtê-lo como uma combinação linear das colunas da matriz \mathbf{N} , em que os pesos da combinação correspondem aos elementos de um vetor velocidade $\dot{\mathbf{x}}$, dado em *coordenadas admissíveis*: $\mathbf{c} \boldsymbol{\vartheta} = \mathbf{N} \dot{\mathbf{x}}$.

Considerando também que $\dot{\mathbf{x}}^h = \mathbf{x}$ e $\mathbf{c} \dot{\boldsymbol{\vartheta}} = \mathbf{N} \ddot{\mathbf{x}}$, pode-se reescrever a Equação 2.22, pré-multiplicada por \mathbf{N}^T , como:

$$\mathbf{N}^T \mathbf{c} \mathbf{M} \mathbf{N} \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{N}^T \boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\Theta} \mathbf{N} \mathbf{x} = 0. \quad (2.23)$$

Reorganizando e considerando ainda que $\ddot{\mathbf{x}} = -\omega^2 \mathbf{x} = -\lambda \mathbf{x}$, de maneira análoga à Equação 2.13, obtém-se o seguinte problema de autovalores generalizado:

$$(\mathbf{N}^T \boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\Theta} \mathbf{N}) \mathbf{x} = \lambda (\mathbf{N}^T \mathbf{c} \mathbf{M} \mathbf{N}) \mathbf{x}. \quad (2.24)$$

Os autovetores resultantes, \mathbf{x}_i , correspondentes aos modos naturais de vibração, são convertidos para coordenadas das juntas: $\boldsymbol{\phi}_i = \boldsymbol{\Theta} \mathbf{N} \mathbf{x}_i$. Note que $\boldsymbol{\phi}_i$ é definido em relação à pose de equilíbrio dada. As frequências naturais correspondentes são obtidas a partir dos autovalores resultantes: $f_i = \sqrt{\lambda_i} / (2\pi)$.

Devido ao fato dos graus de liberdade globais dos personagens não possuírem rigidez associada, caso não existam restrições envolvendo esses graus de liberdade globais, a matriz de rigidez $(\mathbf{N}^T \boldsymbol{\Theta}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\Theta} \mathbf{N})$ é sempre singular. Isso implica que seis dos autovetores resultantes, correspondentes aos chamados modos de vibração de corpo rígido, possuem seus respectivos autovalores iguais a zero.

2.4.4 Calculando as Matrizes para Estruturas Articuladas

Para calcular os autovalores e autovetores da Equação 2.24, é necessário entender como cada uma das matrizes $\mathbf{c} \mathbf{M}$, \mathbf{K} , $\boldsymbol{\Theta}$, \mathbf{G} e \mathbf{N} é formulada. Esta subseção, portanto, explica a formulação de cada uma dessas matrizes separadamente.

Matriz de Massa ${}^c\mathbf{M}$

O sistema de coordenadas local de cada corpo rígido é convenientemente escolhido de modo que seus eixos estejam alinhados com os eixos principais de inércia do corpo e que sua origem coincida com o centro de massa do corpo. Portanto, usando a notação 6D, a matriz de massa individual para cada corpo rígido c , definida em coordenadas locais do próprio corpo, é dada pela seguinte matriz diagonal, de dimensão 6×6 :

$${}^c\mathbf{M}_c = \begin{pmatrix} {}^c\mathbf{I}_c & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & m_c \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{pmatrix}, \quad (2.25)$$

onde ${}^c\mathbf{I}_c$ é a matriz de inércia do corpo c , de dimensão 3×3 , definida em coordenadas do próprio corpo; m_c é a massa total do corpo c ; $\mathbf{I}_{3 \times 3}$ é a matriz identidade de dimensão 3×3 ; e $\mathbf{0}_{3 \times 3}$ é a matriz nula de dimensão 3×3 .

Assim, para montar a matriz de massa da estrutura inteira, ${}^c\mathbf{M}$, de dimensão $6n_c \times 6n_c$, em coordenadas dos corpos, basta concatenar essas matrizes de massa individuais de cada corpo, da seguinte maneira:

$${}^c\mathbf{M} {}^c\dot{\boldsymbol{\vartheta}} = \begin{pmatrix} {}^{c_1}\mathbf{M}_{c_1} & \mathbf{0}_{6 \times 6} & \cdots & \mathbf{0}_{6 \times 6} \\ \mathbf{0}_{6 \times 6} & {}^{c_2}\mathbf{M}_{c_2} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \mathbf{0}_{6 \times 6} \\ \mathbf{0}_{6 \times 6} & \cdots & \mathbf{0}_{6 \times 6} & {}^{c_{n_c}}\mathbf{M}_{c_{n_c}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^{c_1}\dot{\boldsymbol{\vartheta}}_{c_1} \\ {}^{c_2}\dot{\boldsymbol{\vartheta}}_{c_2} \\ \vdots \\ {}^{c_{n_c}}\dot{\boldsymbol{\vartheta}}_{c_{n_c}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^{c_1}\mathbf{M}_{c_1} {}^{c_1}\dot{\boldsymbol{\vartheta}}_{c_1} \\ {}^{c_2}\mathbf{M}_{c_2} {}^{c_2}\dot{\boldsymbol{\vartheta}}_{c_2} \\ \vdots \\ {}^{c_{n_c}}\mathbf{M}_{c_{n_c}} {}^{c_{n_c}}\dot{\boldsymbol{\vartheta}}_{c_{n_c}} \end{pmatrix}, \quad (2.26)$$

onde c_i indica o i -ésimo corpo; n_c é o número de corpos; e $\mathbf{0}_{6 \times 6}$ é a matriz nula de dimensão 6×6 . Note que, como cada matriz individual ${}^c\mathbf{M}_c$ é diagonal, a matriz ${}^c\mathbf{M}$ também é diagonal.

Matriz de Rigidez ${}^j\mathbf{K}$

Como no caso da matriz de massa, devemos definir primeiramente as matrizes de rigidez individuais para depois montar a matriz de rigidez da estrutura inteira. Portanto, usando a notação 6D, a matriz de rigidez individual para cada junta esférica j , definida em coordenadas locais da própria junta, é dada pela seguinte matriz diagonal, de dimensão 6×6 :

$${}^j\mathbf{K}_j = \begin{pmatrix} k_j^x & 0 & 0 & & & \\ 0 & k_j^y & 0 & & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \\ 0 & 0 & k_j^z & & & \\ & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \end{pmatrix}, \quad (2.27)$$

onde k_j^x , k_j^y e k_j^z são as componentes de rigidez da junta j em torno de cada um dos seus respectivos eixos locais x , y e z ; e $\mathbf{0}_{3 \times 3}$ é a matriz nula de dimensão 3×3 . Note que a posição relativa entre os corpos conectados pela junta esférica j , diferente da sua orientação relativa, não depende de influência elástica, sendo portanto mantida nula no seu ponto de encaixe através de restrições definidas na matriz \mathbf{G} . Note também que a submatriz superior esquerda, de dimensão 3×3 , da matriz ${}^j\mathbf{K}_j$ é equivalente à matriz ${}^j\mathbf{K}_p$ da Equação 2.7 (Subseção 2.3.5).

Assim, para montar a matriz de rigidez da estrutura inteira, ${}^j\mathbf{K}$, de dimensão $6n_j \times 6n_j$, em coordenadas das juntas, basta concatenar essas matrizes de rigidez individuais de cada junta, da seguinte maneira:

$${}^j\mathbf{K} = \begin{pmatrix} {}^{j_1}\mathbf{K}_{j_1} & \mathbf{0}_{6 \times 6} & \cdots & \mathbf{0}_{6 \times 6} \\ \mathbf{0}_{6 \times 6} & {}^{j_2}\mathbf{K}_{j_2} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \mathbf{0}_{6 \times 6} \\ \mathbf{0}_{6 \times 6} & \cdots & \mathbf{0}_{6 \times 6} & {}^{j_{n_j}}\mathbf{K}_{j_{n_j}} \end{pmatrix}, \quad (2.28)$$

onde j_i indica a i -ésima junta; n_j é o número de juntas; e $\mathbf{0}_{6 \times 6}$ é a matriz nula de dimensão 6×6 . Note que, como cada matriz individual ${}^j\mathbf{K}_j$ é diagonal, a matriz ${}^j\mathbf{K}$ também é diagonal.

Matriz Θ

O vetor de velocidades 6D da estrutura inteira também pode ser definido usando as informações das juntas, ao invés das informações dos corpos rígidos. Nesse caso, ao invés de concatenar as velocidades 6D de todos os corpos, as velocidades 6D de todas as juntas é que são concatenadas em um único vetor coluna, cujo número de linhas é igual a seis vezes o número de juntas (n_j): $\boldsymbol{\vartheta} = (\boldsymbol{\vartheta}_{j_1}^T, \boldsymbol{\vartheta}_{j_2}^T, \dots, \boldsymbol{\vartheta}_{j_{n_j}}^T)^T$. Portanto, assim como ${}^c\boldsymbol{\vartheta}$ consiste das velocidades 6D de todos os corpos, especificadas em coordenadas locais de cada um dos seus respectivos corpos, ${}^j\boldsymbol{\vartheta}$ consiste das velocidades 6D de todas as juntas, especificadas em coordenadas locais de cada uma das suas respectivas juntas.

Como mencionado na Subseção 2.3.5, a velocidade angular relativa de uma junta j é dada por: $\boldsymbol{\omega}_j = \boldsymbol{\omega}_f - \boldsymbol{\omega}_p$, onde $\boldsymbol{\omega}_f$ e $\boldsymbol{\omega}_p$ são as velocidades angulares do seu corpo filho e do seu corpo pai respectivamente. Usando a notação 6D, pode-se, então, definir a velocidade 6D relativa de uma junta j de maneira análoga:

$$\boldsymbol{\vartheta}_j = \boldsymbol{\vartheta}_{c_f} - \boldsymbol{\vartheta}_{c_p}, \quad (2.29)$$

onde $\boldsymbol{\vartheta}_{c_f}$ e $\boldsymbol{\vartheta}_{c_p}$ são as velocidades 6D do seu corpo filho e do seu corpo pai respectivamente.

A matriz Θ , de dimensão $6n_j \times 6n_c$, converte ${}^c\boldsymbol{\vartheta}$ em ${}^j\boldsymbol{\vartheta}$. Embora as várias

velocidades 6D constituindo esses dois vetores estejam definidas em diferentes sistemas de coordenadas, pode-se facilmente construir a matriz Θ usando matrizes de transformação adjuntas. Considerando o caso mais simples, em que o sistema é constituído por apenas dois corpos conectados por uma única junta, a expressão ${}^j\mathfrak{v} = \Theta {}^c\mathfrak{v}$ pode ser então apresentada na seguinte forma:

$$({}^j\mathfrak{v}_j) = \begin{pmatrix} -{}^j_{c_p}\mathbf{Ad} & {}^j_{c_f}\mathbf{Ad} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^{c_p}\mathfrak{v}_{c_p} \\ {}^{c_f}\mathfrak{v}_{c_f} \end{pmatrix}, \quad (2.30)$$

onde c_p e c_f indicam os corpos pai e filho da junta j respectivamente. Desenvolvendo a Equação 2.30, percebe-se que ela é análoga à Equação 2.29:

$$\begin{aligned} {}^j\mathfrak{v}_j &= -{}^j_{c_p}\mathbf{Ad} {}^{c_p}\mathfrak{v}_{c_p} + {}^j_{c_f}\mathbf{Ad} {}^{c_f}\mathfrak{v}_{c_f} \\ {}^j\mathfrak{v}_j &= -{}^j\mathfrak{v}_{c_p} + {}^j\mathfrak{v}_{c_f}. \end{aligned} \quad (2.31)$$

Quando existirem mais juntas e mais corpos, é preciso apenas ter o cuidado adicional de posicionar essas matrizes de transformação adjuntas, adequadamente, na matriz Θ , de acordo com as ordens das juntas e dos corpos definidas nos vetores ${}^j\mathfrak{v}$ e ${}^c\mathfrak{v}$ respectivamente. Um segundo exemplo, consistindo de três corpos e duas juntas, é provavelmente suficiente para entender como construir a matriz Θ em casos mais gerais:

$$\begin{pmatrix} {}^{j_1}\mathfrak{v}_{j_1} \\ {}^{j_2}\mathfrak{v}_{j_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -{}^{j_1}_{c_1}\mathbf{Ad} & {}^{j_1}_{c_2}\mathbf{Ad} & \mathbf{0}_{6 \times 6} \\ \mathbf{0}_{6 \times 6} & -{}^{j_2}_{c_2}\mathbf{Ad} & {}^{j_2}_{c_3}\mathbf{Ad} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^{c_1}\mathfrak{v}_{c_1} \\ {}^{c_2}\mathfrak{v}_{c_2} \\ {}^{c_3}\mathfrak{v}_{c_3} \end{pmatrix}. \quad (2.32)$$

No caso, a junta j_1 conecta seu corpo pai c_1 ao seu corpo filho c_2 , enquanto a junta j_2 conecta seu corpo pai c_2 ao seu corpo filho c_3 . Note que cada junta conecta apenas dois corpos, implicando que cada bloco de seis linhas da matriz Θ possui apenas dois blocos 6×6 não-nulos, porém não necessariamente consecutivos. Portanto, para estruturas mais complexas, constituídas de vários corpos, a maioria dos blocos 6×6 da matriz Θ corresponde a blocos nulos.

Matriz de Restrições G

A matriz de restrições G consiste principalmente das restrições impostas pelas juntas, e possivelmente de restrições envolvendo diretamente um único corpo rígido ou envolvendo algum ponto específico desse corpo. As restrições sobre as velocidades 6D dos corpos, especificadas em coordenadas dos corpos, são definidas na forma: $G {}^c\mathfrak{v} = 0$. Portanto, a matriz G possui dimensão $n_r \times 6n_c$, onde n_r é o número de restrições definidas para o sistema. Cada restrição adicionada, correspondente a uma nova linha na matriz G , elimina um dos $6n_c$ graus

de liberdade que o sistema possui, quando inicialmente definido como um conjunto de corpos rígidos independentes.

As restrições impostas pelas juntas esféricas podem ser definidas facilmente sobre as velocidades 6D das juntas, ${}^j\boldsymbol{\vartheta}$, especificadas em coordenadas das juntas. Considerando novamente o caso mais simples de apenas dois corpos conectados por uma única junta esférica, as únicas três restrições impostas podem ser escritas simplesmente como: $\mathbf{I}_{4:6} {}^j\boldsymbol{\vartheta}_j = 0$, onde $\mathbf{I}_{4:6}$ é a matriz de dimensão 3×6 consistindo das três últimas linhas (linhas 4 a 6) da matriz identidade de dimensão 6×6 . Essas restrições podem ser escritas como:

$$\mathbf{I}_{4:6} {}^j\boldsymbol{\vartheta}_j = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^j\boldsymbol{\omega}_j \\ {}^j\boldsymbol{\nu}_j \end{pmatrix} = 0, \quad (2.33)$$

onde ${}^j\boldsymbol{\omega}_j$ e ${}^j\boldsymbol{\nu}_j$ são respectivamente as velocidades angular e linear relativas da junta j , em suas coordenadas locais; $\mathbf{I}_{3 \times 3}$ é a matriz identidade de dimensão 3×3 ; e $\mathbf{0}_{3 \times 3}$ é a matriz nula de dimensão 3×3 . Desenvolvendo a Equação 2.33, obtém-se simplesmente ${}^j\boldsymbol{\nu}_j = 0$, correspondendo exatamente ao que uma junta esférica deve restringir, ou seja, a velocidade linear relativa da junta, no seu ponto de encaixe, deve ser mantida sempre igual a zero.

No caso geral, em que o sistema possui n_j juntas esféricas, as $3n_j$ restrições podem ser escritas como:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{I}_{4:6} & \mathbf{0}_{3 \times 6} & \cdots & \mathbf{0}_{3 \times 6} \\ \mathbf{0}_{3 \times 6} & \mathbf{I}_{4:6} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \mathbf{0}_{3 \times 6} \\ \mathbf{0}_{3 \times 6} & \cdots & \mathbf{0}_{3 \times 6} & \mathbf{I}_{4:6} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^{j_1}\boldsymbol{\vartheta}_{j_1} \\ {}^{j_2}\boldsymbol{\vartheta}_{j_2} \\ \vdots \\ {}^{j_{n_j}}\boldsymbol{\vartheta}_{j_{n_j}} \end{pmatrix} = 0, \quad (2.34)$$

onde $\mathbf{0}_{3 \times 6}$ é a matriz nula de dimensão 3×6 .

Entretanto, como dito anteriormente, as restrições devem ser definidas na forma: $\mathbf{G}^c \boldsymbol{\vartheta} = 0$. Portanto, para obter as $3n_j$ primeiras linhas da matriz \mathbf{G} , referentes às restrições impostas pelas n_j juntas esféricas, basta substituir, na Equação 2.34, o vetor ${}^j\boldsymbol{\vartheta}$ por $\boldsymbol{\Theta}^c \boldsymbol{\vartheta}$:

$$\mathbf{G}^c \boldsymbol{\vartheta} = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{4:6} & \mathbf{0}_{3 \times 6} & \cdots & \mathbf{0}_{3 \times 6} \\ \mathbf{0}_{3 \times 6} & \mathbf{I}_{4:6} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \mathbf{0}_{3 \times 6} \\ \mathbf{0}_{3 \times 6} & \cdots & \mathbf{0}_{3 \times 6} & \mathbf{I}_{4:6} \end{pmatrix} \boldsymbol{\Theta}^c \boldsymbol{\vartheta} = 0. \quad (2.35)$$

Restrições também podem ser definidas envolvendo diretamente um único corpo rígido, por exemplo, a fim de manter sua orientação ou sua posição fixas. Portanto, dado um determinado corpo c , essas restrições podem ser trivialmente definidas por $\mathbf{I}_{1:3} {}^c\boldsymbol{\vartheta}_c = {}^c\boldsymbol{\omega}_c = 0$ ou $\mathbf{I}_{4:6} {}^c\boldsymbol{\vartheta}_c =$

${}^c\mathbf{v}_c = 0$, respectivamente, onde $\mathbf{I}_{1:3}$ é a matriz de dimensão 3×6 consistindo das três primeiras linhas (linhas 1 a 3) da matriz identidade de dimensão 6×6 .

De maneira semelhante, embora não tão trivial, restrições também podem ser definidas envolvendo um ponto específico de um dos corpos, por exemplo, a fim de mantê-lo fixo por ser um ponto de contato com o chão. Portanto, dado um determinado corpo c e um ponto qualquer ${}^c\mathbf{p}$, definido em suas coordenadas locais, a velocidade linear ${}^c\dot{\mathbf{p}}$ nesse ponto, também definida em coordenadas locais desse corpo, pode ser mantida nula através da seguinte expressão: ${}^c\dot{\mathbf{p}} = {}^c\mathbf{v}_c + [{}^c\boldsymbol{\omega}_c]{}^c\mathbf{p} = 0$. Entretanto, essa restrição precisa ser escrita matricialmente e sobre o vetor ${}^c\boldsymbol{\mathcal{D}}_c$:

$${}^c\dot{\mathbf{p}} = {}^c\mathbf{v}_c + [{}^c\boldsymbol{\omega}_c]{}^c\mathbf{p} = {}^c\mathbf{v}_c + [{}^c\mathbf{p}]{}^c\boldsymbol{\omega}_c = \begin{pmatrix} [{}^c\mathbf{p}] & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^c\boldsymbol{\omega}_c \\ {}^c\mathbf{v}_c \end{pmatrix} = 0. \quad (2.36)$$

Matriz Espaço Nulo N

A matriz N corresponde ao espaço nulo da matriz de restrições G , organizada de tal modo que cada coluna de N equivale a um vetor da base do espaço nulo de G . Uma maneira possível de se calcular esses vetores, implementada neste trabalho, é através da decomposição QR da transposta da matriz G .

Dada a matriz G de dimensão $n_r \times 6n_c$, com $n_r < 6n_c$, primeiramente deve-se obter sua transposta G^T . Em seguida, através da fatoração QR dessa matriz G^T , obtém-se:

$$G^T P = QR = (Q_1 Q_2) R, \quad (2.37)$$

onde P é uma matriz de permutação de dimensão $n_r \times n_r$, Q é uma matriz de dimensão $6n_c \times 6n_c$, e R é uma matriz de dimensão $6n_c \times n_r$.

Ao particionar a matriz Q em dois blocos Q_1 e Q_2 , de tal maneira que a matriz Q_1 possua dimensão $6n_c \times n_r$ e consista portanto das primeiras n_r colunas de Q , a matriz Q_2 , por sua vez possuindo dimensão $6n_c \times (6n_c - n_r)$ e consistindo das últimas $(6n_c - n_r)$ colunas de Q , resulta na própria matriz N desejada, cujas colunas correspondem aos vetores de uma base do espaço nulo de G . A matriz N , de dimensão $6n_c \times (6n_c - n_r)$, é então equivalente⁴ à matriz Q_2 resultante da fatoração da matriz G^T , realizada como mostrada na Equação 2.37.

⁴ Note que: $GN = GQ_2 = 0$.

2.5 Considerações Finais

Neste capítulo, são apresentados os principais conceitos e as principais definições usadas no restante desta tese. Foram apresentados detalhes de como:

- personagens virtuais podem ser representados através de estruturas articuladas, no contexto de simulação física;
- orientações 3D são definidas tanto para os corpos rígidos quanto para as juntas, mostrando como definir também seus respectivos sistemas de coordenadas;
- vetores e matrizes, com diferentes significados físicos e usando diferentes notações, podem ser facilmente convertidos entre os vários sistemas de coordenadas definidos;
- controladores PD são utilizados para fazer com que um personagem virtual 3D atinja uma determinada pose;
- as equações de movimento de um sistema podem ser:
 - formuladas como um problema de autovalores e autovetores, correspondendo à sua análise modal,
 - desacopladas usando os modos de vibração naturais resultantes,
 - resolvidas analiticamente;
- a análise modal de um sistema, especificamente definido por uma estrutura articulada, pode ser realizada, utilizando uma notação mais geral que facilita operações envolvendo corpos rígidos.

3 *Trabalhos Relacionados*

3.1 **Controladores de Locomoção**

Como discutido no início do Capítulo 2, abordagens de animação dinâmicas possuem várias vantagens em relação a abordagens cinemáticas, principalmente por permitir que movimentos fisicamente corretos sejam obtidos de maneira automática. Dentro desse contexto dinâmico, em que controladores de movimento são necessários para guiar os movimentos dos personagens simulados, diferentes tarefas podem ser identificadas como responsabilidade desses controladores. Dentre as principais, pode-se citar a geração da locomoção, o tratamento do equilíbrio e a interação com o ambiente. Embora essas tarefas possam estar relacionadas em muitas técnicas de controle, deseja-se classificar essas várias técnicas levando em consideração principalmente o aspecto de como a locomoção propriamente dita é gerada. De fato, o principal foco de pesquisa em controle de personagens fisicamente simulados é a geração de locomoção bípede [Geijtenbeek et al. 2011], tal como caminhar e correr.

Entretanto, projetar controladores para gerar locomoção envolve pesquisa em diferentes áreas, tais como biomecânica, robótica, inteligência artificial e otimização. Além disso, não há um consenso definitivo quanto à organização e à classificação das diferentes técnicas atualmente existentes, principalmente devido à tendência de as técnicas buscarem combinar diferentes abordagens a fim de aproveitar as vantagens de cada uma. Nesta seção, sugere-se classificar controladores de locomoção em três categorias principais, de acordo com a maneira pela qual a locomoção é gerada: *controladores projetados manualmente*, *controladores gerados por otimização* e *controladores guiados por dados de movimento*.

3.1.1 **Controladores Projetados Manualmente**

As primeiras versões de controladores foram motivadas pelas áreas da robótica e da biomecânica. Algumas dessas versões usavam funções explícitas de forças e torques especificadas pelo animador, baseadas em dados medidos ou observados. O animador atuava

no nível mais baixo do projeto do controlador. Uma possibilidade mais viável é gerar controladores de locomoção proceduralmente. Nesse caso, o projeto de controle consiste em definir manualmente determinados procedimentos a fim de modelar estratégias específicas. Tais estratégias são geralmente baseadas na observação de organismos biológicos reais. O movimento desejado é então obtido como resultado da ação conjunta desses procedimentos, responsáveis por guiar a simulação física.

A fim de organizar a ação desses procedimentos, controladores também podem ser definidos através de máquinas de estados. Ao se utilizar máquinas de estados como representação de controladores, a estrutura do controlador é definida por estados e transições que os conectam. Os estados correspondem a fases do controlador, e determinam como o controlador deve agir. Transições entre estados são responsáveis por determinar qual estado deve estar ativo no decorrer da simulação dinâmica. Com essa estrutura mais organizada, definida por fases, o animador tem uma maior facilidade de construir um determinado movimento e de prever o resultado da ação de controle, o que ajuda na especificação dos parâmetros do controlador.

Um dos primeiros trabalhos em animação a sugerir essa abordagem procedural de controladores, usando máquinas de estados, foi o trabalho de [Raibert e Hodgins \[1991\]](#). O sistema de controle proposto é governado por uma máquina de estados com transições baseadas em informações de contato entre os pés do personagem e o chão. Durante cada fase, procedimentos de controle específicos são combinados para gerar uma pose cinemática adequada a ser alcançada. Uma vez que uma pose cinemática é gerada, controladores PD são usados para tentar atingi-la. Enquanto o personagem está no ar, um desses procedimentos usa um modelo de pêndulo invertido simplificado, combinado com cinemática inversa, para posicionar o pé adequadamente no momento do pouso. Essa estratégia é utilizada para controlar tanto o equilíbrio quanto a velocidade do personagem, a qual é especificada pelo animador. O posicionamento do pé do personagem depende da diferença entre as velocidades atual e desejada do seu centro de massa. Enquanto o personagem está no chão, um outro procedimento é usado para tentar manter o tronco do personagem em uma postura ereta adequada, corrigindo sua orientação atual através de torques aplicados em juntas específicas da perna de apoio. No caso, as orientações desejada e atual do tronco são definidas em coordenadas globais. Como resultado dessa técnica, animações de modelos simplificados de robôs bípedes e quadrúpedes e de um canguru correndo e pulando são geradas (Figura 3.1).

Também utilizando máquinas de estados projetadas manualmente, e ideias semelhantes às descritas em [\[Raibert e Hodgins 1991\]](#), animações de corrida, ciclismo e salto sobre cavalo são geradas em [\[Hodgins et al. 1995\]](#) (Figura 3.1). Os resultados são obtidos usando personagens

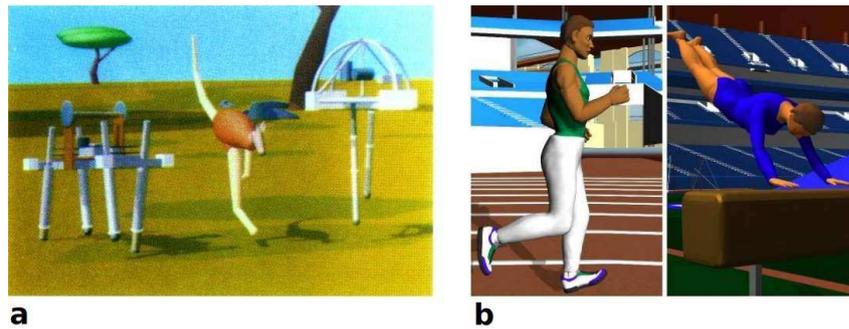


Figura 3.1: (a) Resultados de animação com controladores de personagens simplificados obtidos em [Raibert e Hodgins 1991]. (b) Resultados usando personagens humanos 3D obtidos em [Hodgins et al. 1995].

humanos 3D completos. Além disso, eles também incluem parâmetros responsáveis por controlar a direção da locomoção, permitindo que os personagens sejam capazes de fazer curvas.

Enquanto a maioria dos trabalhos focam no projeto de controladores responsáveis por tarefas individuais, alguns poucos trabalhos demonstraram que resultados interessantes podem ser obtidos através da composição de um conjunto de tais controladores projetados individualmente. A composição de controladores consiste em organizar suas respectivas ações em seqüência cronológica, possibilitando que um vasto repertório de movimentos mais complexos seja gerado com menor dificuldade. Entretanto, para que essa composição seja possível, as transições de um determinado controlador para um outro deve ser realizada de maneira adequada. O controle dessas transições é geralmente definido baseado na análise das pré-condições de sucesso de cada controlador. Essas pré-condições correspondem ao conjunto de estados iniciais do personagem em que o controlador, sob condições normais de ambiente, consegue obter sucesso na geração do seu movimento. Portanto, para iniciar a execução de um determinado controlador, o controlador atualmente ativo precisa fazer com que o personagem alcance o subespaço de configurações correspondente às pré-condições do controlador desejado.

Wooten e Hodgins [2000] implementaram quatro controladores individuais parametrizados que foram concatenados para gerar movimentos ginásticos complexos envolvendo saltos com acrobacias aéreas, tais como saltos mortais e saltos ornamentais. Esses quatro controladores correspondem às diferentes fases nas quais os movimentos completos gerados eram divididos: a fase do impulso no chão, a fase das acrobacias feitas no ar, a fase de pouso, e a fase de equilíbrio. O controlador de equilíbrio, responsável por manter o personagem em pé após o pouso no chão, funciona através da aplicação de torques nas juntas das pernas com o objetivo de manter a projeção do centro de massa próxima ao centro do polígono de suporte.

Faloutsos et al. [2001] propõem um *framework* de composição mais elaborado, em que

um controlador supervisor é responsável por decidir qual controlador individual deve estar atuando no personagem em cada instante e o momento mais apropriado para que ele comece a atuar. Com o objetivo de disponibilizar um *framework* geral o suficiente para permitir que cada vez mais controladores sejam acoplados ao repertório de movimentos do personagem, os controladores individuais funcionam como caixas pretas. Entretanto, esses controladores devem ser capazes tanto de fornecer as pré-condições em que eles funcionam apropriadamente e as pós-condições responsáveis por determinar seu sucesso, quanto de determinar, enquanto ativos, se estão operando satisfatoriamente, se obtiveram sucesso ou se falharam. Uma importante contribuição desse *framework* proposto é a utilização de uma técnica de aprendizagem, chamada *Support Vector Machine (SVM)*, para automaticamente determinar as pré-condições de sucesso de um determinado controlador.

Embora esses trabalhos discutidos acima tenham obtido bons resultados, nessas abordagens procedurais, o sucesso do controlador depende bastante das escolhas realizadas diretamente pelo animador. Gerar controladores proceduralmente é um processo trabalhoso de tentativa e erro, e exige que o animador possua habilidade, experiência e conhecimento específico do movimento a ser gerado. Além disso, a estrutura de controle é frequentemente projetada com foco em uma determinada tarefa e em um determinado personagem, ou seja, com aquele único exemplo em mente. Portanto, toda a estrutura criada para aquele controlador é também bastante específica, o que torna difícil aproveitar a ideia desenvolvida para tratar outras situações. Gerar um novo controlador para um outro estilo de locomoção, um outro personagem ou um outro ambiente pode exigir desde uma nova especificação manual e trabalhosa de vários parâmetros até a implementação de uma nova técnica de controle. Entretanto, as técnicas propostas foram gradualmente amadurecendo essa ideia de generalizar o controle, e muitas representações de controladores já generalizam bem vários aspectos. De fato, um dos principais desafios de pesquisa no controle de personagens virtuais ainda é generalizar as estruturas dos controladores a fim de que elas possam ser facilmente adaptadas para diferentes situações.

Uma representação de controladores muito utilizada atualmente, que generaliza o projeto de locomoção de maneira bastante interessante, é a representação conhecida como grafo de controle de pose (*Pose Control Graph (PCG)*) [Panne et al. 1994, Panne 1996]. Grafos de controle de pose são máquinas de estados específicas, em que cada estado possui uma pose desejada explícita associada. Assim, quando um determinado estado está ativo, controladores PD são utilizados na tentativa de atingir aquela pose correspondente. Cada pose permanece como o alvo dos controladores PD durante um certo tempo, de acordo com a estrutura definida, e a animação é obtida diretamente pela ação desses controladores PD na simulação física. A Figura 3.2 ilustra um exemplo de PCG definido para um personagem humanoide. Note que uma

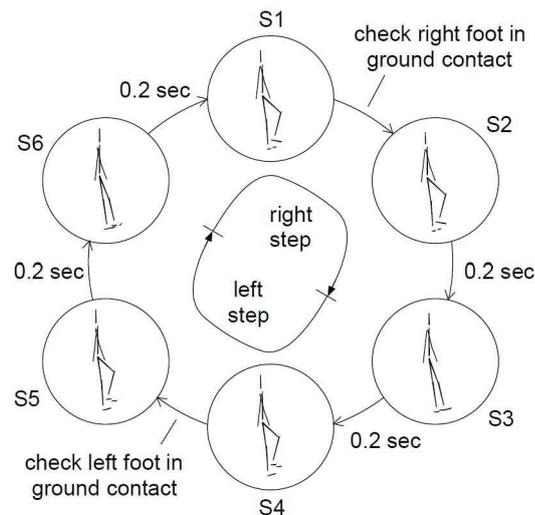


Figura 3.2: Um exemplo de PCG utilizado para simular um personagem humanoide caminhando [Laszlo et al. 1996].

pose deve ser definida para cada estado.

PCGs podem ser considerados como uma versão dinâmica da técnica de quadros-chaves (*keyframing*). Trazer essa ideia de definir poses chaves para guiar o movimento, que já era bastante difundida entre animadores que utilizavam técnicas cinemáticas, contribuiu bastante para tornar o processo de construção de controladores mais intuitivo e atrativo. Assim como na técnica de quadros-chaves, PCGs permitem que animadores possam rapidamente alterar o comportamento de um controlador através da edição direta de poses, abstraindo a física considerada em baixo nível. Entretanto, embora animações geradas em um contexto dinâmico possuam claras vantagens provenientes do uso da física, PCGs apresentam algumas desvantagens em comparação com a versão cinemática original.

Uma dessas desvantagens é que PCGs não definem restrições explícitas quanto à trajetória gerada. Enquanto um quadro-chave cinemático pode ser facilmente atingido com precisão, em um instante específico qualquer, através de simples interpolações que podem violar as leis da física; uma pose dinâmica consiste apenas em uma configuração que se deseja alcançar, e não há garantias de que ela seja atingida durante a simulação física. Portanto, para obter a animação esperada, as poses desejadas, os tempos de transição, e os parâmetros dos controladores PD devem ser ajustados adequadamente em conjunto, o que pode ser difícil e trabalhoso em muitos casos. Allen et al. [2007] propõem calcular os parâmetros dos controladores PD analiticamente para cada junta, a fim de disponibilizar uma abordagem ainda mais semelhante à técnica de quadros-chaves original. Recalculando automaticamente esses parâmetros a cada passo da simulação, o animador pode especificar o movimento de maneira mais fácil e condizente com

o resultado obtido. De fato, os resultados mostram uma melhor precisão em relação a atingir as poses escolhidas nos instantes dados, enquanto respondendo naturalmente a perturbações externas. Entretanto, assume-se que o personagem possui uma base fixa e, portanto, essa abordagem não é apropriada para locomoção.

Outra característica de PCGs é que, a fim de manter a coerência entre personagens e animais reais, que não possuem atuadores globais, uma pose desejada não inclui posição e orientação globais do personagem, e o problema de equilíbrio torna a escolha dos diversos parâmetros ainda mais complicada, principalmente quando controladores são gerados para simular locomoção. Devido a esse problema de equilíbrio, PCGs foram convenientemente propostos inicialmente utilizando personagens dinamicamente estáveis [Panne et al. 1994]. Tais personagens não exigem qualquer mecanismo sensorial ou estratégia de equilíbrio explícita. Um dos primeiros trabalhos a investigar a necessidade de incorporar uma estratégia de equilíbrio, para atuar em conjunto com PCGs, ao simular locomoção de personagens instáveis, foi o trabalho de Laszlo et al. [1996]. A estratégia proposta, chamada *limit cycle control*, corrige o ciclo do caminhar de um personagem humanoide 3D, de acordo com uma matriz que é calculada relacionando o estado do personagem a alguns sensores de controle escolhidos, considerados adequados ao equilíbrio, os quais são obtidos como função do próprio estado do personagem. Ao perceber indícios de quebra da periodicidade da locomoção através da análise dos sensores, as poses desejadas associadas aos estados do PCG são automaticamente ajustadas baseadas nessa matriz calculada. Matrizes desse tipo, conhecidas como *matrizes Jacobianas*, são formadas pelas derivadas parciais de primeira ordem de uma função vetorial. No contexto de controle de movimento, um ponto específico do personagem, por exemplo, pode ser calculado como uma função vetorial das orientações das juntas, e a Jacobiana portanto descreve o relacionamento linear entre a velocidade desse ponto específico e as velocidades das juntas. Ou seja, a Jacobiana define o quanto esse ponto se desloca, em função de um deslocamento correspondente em coordenadas das juntas. Assim, o controle das orientações das juntas pode ser substituído pelo controle da posição daquele ponto escolhido.

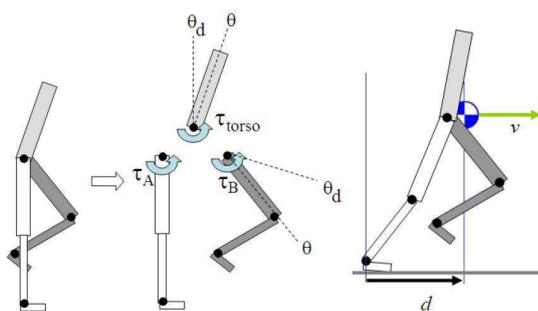


Figura 3.3: Esquema de equilíbrio SIMBICON [Yin et al. 2007].

Mais recentemente, um trabalho específico ganhou bastante notoriedade ao propor um *framework* baseado em PCGs que incorpora uma estratégia de equilíbrio bastante simples, geral e robusta [Yin et al. 2007]. Conhecido como SIMBICON (*SIM*ple *BI*ped *CON*trol), esse *framework* permite que um vasto repertório de locomoção seja gerado para personagens bípedes em geral. Enquanto executando tais locomoções, os personagens são ainda capazes de manter o equilíbrio na presença de perturbações externas. Os resultados obtidos incluem transições entre diferentes estilos de locomoção, e personagens caminhando em diferentes direções. Inspirada em trabalhos como [Raibert e Hodgins 1991, Hodgins et al. 1995], a estratégia de equilíbrio proposta consiste basicamente de duas partes (Figura 3.3). Primeiro, as orientações atuais e desejadas do tronco e da coxa desapojada são definidas em coordenadas globais. Os torques aplicados nesses corpos são compensados por torques contrários, τ_A , aplicados na coxa de apoio, os quais devem ser supostamente cancelados por torques provenientes da interação entre o pé de apoio e o chão, assumindo que o pé esteja suficientemente bem apoiado. Isso tanto permite o controle da postura global do tronco, quanto garante que o controle do posicionamento do pé desapojado seja independente da orientação atual do tronco. Segundo, as orientações desejadas de juntas específicas da perna desapojada são continuamente ajustadas para corrigir o posicionamento do pé correspondente, que deve pousar de maneira apropriada. Esses ajustes são automaticamente calculados em função da distância entre o tornozelo de apoio e a projeção do centro de massa e da velocidade do centro de massa do personagem.

Coros et al. [2010] incluem importantes melhorias no *framework* SIMBICON, contribuindo em vários aspectos. Primeiro, ao invés de usar explicitamente uma máquina de estados que define poses desejadas fixas a serem seguidas a cada estado, as poses desejadas são definidas como pontos de controle de curvas do tipo *Catmull-Rom splines*, consistindo em um gerador de movimentos que produz trajetórias desejadas contínuas, seguidas por controladores PD. Segundo, o controle de posicionamento do pé desapojado no momento do pouso é definido através do chamado *modelo de pêndulo invertido* (*inverted pendulum model* (IPM)), o qual permite um controle de equilíbrio mais geral, sem a necessidade de ajustes de parâmetros específicos para cada personagem. Terceiro, matrizes Jacobianas transpostas são calculadas continuamente a cada passo da simulação para permitir que forças virtuais sejam aplicadas ao personagem, a fim de controlar a velocidade do seu centro de massa e compensar a ação da gravidade sobre os corpos. A Figura 3.4 ilustra o processo de conversão dessas forças virtuais em torques de juntas. Resumidamente, dada uma matriz Jacobiana \mathbf{J} , relacionando um ponto \mathbf{P} e um conjunto de orientações de juntas $\boldsymbol{\theta}$,

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \boldsymbol{\theta}}, \quad (3.1)$$

uma força virtual F aplicada ao ponto P pode ser convertida em um vetor de torques τ , a ser aplicado nessas juntas, da seguinte maneira:

$$\tau = J^T F . \quad (3.2)$$

Além do uso de forças virtuais, a habilidade dos personagens em caminhar em diferentes direções e em manipular objetos enquanto caminham também é tratada. Note que esse novo *framework* possui a limitação de não tratar movimentos de corrida.

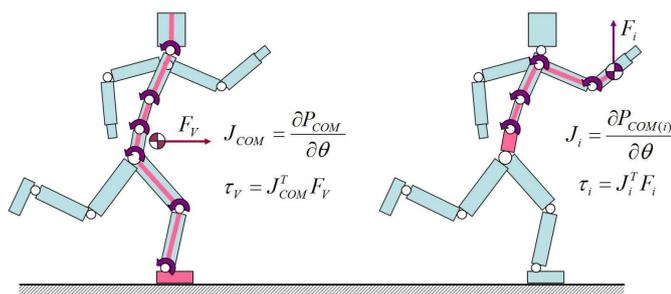


Figura 3.4: Aplicação de forças virtuais, através da transposta da matriz Jacobiana, no centro de massa do personagem para controlar sua velocidade, e em um determinado corpo para compensar seu peso correspondente, devido à ação da gravidade [Coros et al. 2010].

Inspirados em ideias semelhantes às usadas na estratégia de equilíbrio proposta em [Coros et al. 2010] para personagens bípedes, Coros et al. [2011] demonstram que controladores robustos também podem ser projetados para personagens quadrúpedes, igualmente capazes de manter o equilíbrio na presença de perturbações externas. Controladores PD são utilizados para seguir trajetórias definidas para as juntas, e forças internas virtuais também são aplicadas usando matrizes Jacobianas transpostas.

Combinar o uso de PCGs com estratégias robustas de equilíbrio tem resultado em *frameworks* de controladores capazes de produzir, de maneira generalizada, locomoções bastante atrativas. Contudo, o animador ainda é o principal responsável por definir trajetórias, o que é feito manualmente. Enquanto essa característica atribui ao animador um maior controle da trajetória final, isso também implica em algumas desvantagens. Por mais que os *frameworks* propostos busquem facilitar cada vez mais essa especificação manual, a interferência direta do animador na construção de uma trajetória ainda exige uma certa habilidade artística, por parte desse animador, para produzir locomoções que apresentem uma maior naturalidade, semelhante à apresentada em locomoções reais. Como um exemplo específico interessante, imagine uma situação em que deseja-se simular dois personagens correndo, um alto e magro, o outro baixo e gordo. Deduzir como a trajetória a ser especificada deve ser modificada a fim de destacar a influência dessas diferenças depende bastante da sensibilidade de percepção do animador e

requer uma série de tentativas e erros. O mais interessante seria que o sistema fosse capaz de alterar automaticamente as trajetórias resultantes de acordo com as diferentes especificações de dimensão e massa do personagem. De fato, de um modo geral, atingir uma naturalidade satisfatória através de ajustes manuais realizados diretamente na trajetória da locomoção pode ser um processo difícil e trabalhoso, e o que frequentemente se percebe é que os resultados obtidos por essa abordagem ainda apresentam uma certa aparência robótica.

3.1.2 Controladores Gerados por Otimização

Como discutido na Seção 3.1.1, controladores podem ser projetados de maneira completamente manual, em que todos os parâmetros da estrutura de controle são definidos pelo animador. Entretanto, deixar a especificação dos parâmetros como tarefa exclusiva do animador, independente do nível de abstração no qual os parâmetros são definidos, pode limitar a qualidade do controlador. Além disso, dependendo da natureza dos parâmetros envolvidos, a especificação manual desses valores fica inviável.

Portanto, ao invés de deixar como responsabilidade exclusiva do animador, os parâmetros do controlador também podem ser definidos automaticamente, através de um processo de otimização. Isso permite que estruturas de controle mais gerais sejam projetadas mais facilmente. Embora gerar controladores através de otimização possa ser mais demorado, controladores otimizados podem produzir animações mais naturais.

Na mesma linha de controladores gerados por otimização, existe uma outra abordagem que também trata o problema de controle de sistemas dinâmicos atuados através de otimização, mas que não utiliza controladores propriamente ditos, da maneira descrita neste trabalho. Entretanto, essa abordagem alternativa compartilha ideias e objetivos semelhantes, e discutir tais aspectos comuns é bastante relevante. Portanto, esta subseção consiste em analisar as características dessas duas abordagens principais usadas para tratar o problema de controle através de otimização, as quais são denominadas neste trabalho como: *otimização baseada em simulação* e *otimização baseada em trajetória*.

Otimização Baseada em Simulação

Na abordagem baseada em simulação, um controlador propriamente dito é responsável por determinar os torques a serem aplicados pelos atuadores do personagem. A partir de um estado inicial desse personagem, uma simulação física, guiada por esses torques, é realizada iterativamente para obter sua trajetória (Figura 2.3). A trajetória é, portanto, obtida

indiretamente, e as leis da física são implicitamente obedecidas de acordo com as equações de movimento consideradas na simulação. Como a trajetória é sempre obtida automaticamente a partir da simulação física, as variáveis da otimização são constituídas exclusivamente pelos parâmetros do controlador. Note que as forças de reação do chão também são obtidas automaticamente durante a simulação. Além disso, como a simulação física já é responsável por garantir que a trajetória obtida seja fisicamente correta, o problema de otimização formulado não precisa incluir restrições explícitas para garantir que o movimento resultante satisfaça as leis da física.

Uma desvantagem dessa abordagem de otimização baseada em simulação é que, para cada avaliação da função objetivo, uma simulação física precisa ser realizada durante um determinado tempo, o que pode tornar o processo de otimização bastante demorado. Uma consequência desse fato é que a função objetivo não é uma função explícita das variáveis da otimização. Portanto, obter informações de gradiente para ajudar a guiar melhor o otimizador no espaço de busca é complicado e geralmente inviável. Devido a essas características, é também complicado tratar restrições explícitas sobre a trajetória a ser gerada, a fim de permitir que o animador possua controle semelhante ao fornecido pela abordagem baseada em trajetória. Note que o presente trabalho propõe um novo método de otimização, combinando as técnicas *Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy* (Subseção 4.4.2) e *Method of Multipliers* (Subseção 4.4.3), que torna a abordagem baseada em simulação capaz de tratar com sucesso tais restrições explícitas.

Várias técnicas utilizam essa abordagem de otimização baseada em simulação para gerar locomoção automaticamente. Ngo e Marks [1993] propõem uma representação de controladores baseada em respostas a estímulos. Pares constituídos de uma função de estímulo e de uma resposta são projetados considerando o personagem e a locomoção desejada. A cada passo da simulação, as funções de estímulo são avaliadas, e a função vencedora ativa a resposta correspondente, influenciando a locomoção gerada. Uma resposta consiste em definir uma pose desejada a ser atingida pelo personagem, e um determinado tempo no qual essa pose levará para ser atingida. Apenas uma resposta pode estar ativa em cada passo da simulação. Os parâmetros dessa representação de controle são otimizados usando algoritmos genéticos. Note que, especificamente nesse trabalho, o personagem não é fisicamente simulado da maneira convencional. Uma simulação simplificada é responsável por obter continuamente suas novas configurações de maneira automática, iterativa e visualmente satisfatória. Embora a locomoção resultante não seja fisicamente correta, a essência da abordagem de otimização usada permite classificar essa técnica como baseada em simulação. A simplificação usada ainda permite que a simulação seja mais rápida e que o animador possua um maior controle sobre a locomoção.

Auslander et al. [1995] estendem esse trabalho para personagens 3D.

Baseado em redes neurais, Panne e Fiume [1993] representam o controlador conectando os sensores aos atuadores do personagem através de uma rede de conexões com pesos. Em cada passo da simulação dinâmica, os valores dos nós sensores são verificados e transmitidos aos nós atuadores de acordo com os pesos das conexões, através de operações realizadas pelos nós da rede. Os nós atuadores recebem os valores resultantes dessas operações internas e os mapeiam em ângulos desejados a serem assumidos pelas juntas. Controladores PD calculam os torques a serem gerados pelos atuadores a partir desses ângulos desejados. Sims [1994] utiliza uma representação de controladores semelhante, também conectando sensores a atuadores. Entretanto, além do controlador, o personagem também é projetado automaticamente. Algoritmos genéticos são utilizados para resolver o problema de otimização, permitindo que o personagem e seu controlador evoluam em conjunto.

Algumas técnicas otimizam controladores representados por PCGs. Os parâmetros da otimização são constituídos geralmente pelas poses desejadas definidas para cada estado e possivelmente pelos parâmetros relacionados às transições. Essa ideia é inicialmente proposta por Panne et al. [1994], utilizando personagens dinamicamente estáveis, os quais não exigem uma estratégia de equilíbrio explícita. Para permitir utilizar personagens mais instáveis, Panne e Lamouret [1995] utilizam forças externas para auxiliar o processo de otimização. Essas forças externas são responsáveis por manter o equilíbrio do personagem, facilitando o aprendizado da locomoção desejada. A ideia é semelhante a uma criança aprendendo a andar com o apoio dos pais para não cair. Aos poucos, os pais vão deixando de apoiá-la até que ela consiga andar sozinha. Da mesma forma, as forças externas vão sendo eliminadas em estágios posteriores. Hodgins e Pollard [1997] utilizam controladores, representados por máquinas de estados, já projetados para um determinado personagem e os adaptam automaticamente a novos personagens. Nunes et al. [2007] propõem um *framework* mais geral que permite gerar controladores através de múltiplos PCGs ativados sensorialmente. O animador também pode selecionar quais parâmetros serão otimizados em cada estágio, incluindo os parâmetros dos sensores utilizados. A estrutura generalizada proposta para os sensores também permite que o animador defina sensores arbitrários, de acordo com a necessidade da locomoção desejada e com o personagem utilizado.

O *framework* SIMBICON também motivou o surgimento de novas técnicas para gerar locomoção através de otimização. Yin et al. [2008] usam otimização para generalizar controladores de caminhada para tarefas significativamente diferentes. Essa generalização é realizada através de uma sequência progressiva de problemas que traçam um caminho desde

um problema existente já resolvido até o problema final desejado, ainda não resolvido. Ou seja, uma sequência de otimizações é realizada a fim de obter o controlador final, capaz de resolver a nova tarefa desejada. Controladores intermediários, capazes de resolver o problema parcialmente, também são obtidos durante esse processo. Uma possível alternativa é adicionar políticas de controle em um nível mais alto, sobre o *framework*, desenvolvidas previamente explorando o efeito de controladores específicos sob diferentes condições, de maneira sistemática. [Coros et al. \[2008\]](#) usam essa estratégia para permitir que personagens caminhem em terrenos com restrições, enquanto [Coros et al. \[2009\]](#) usam essa estratégia para integrar múltiplos controladores para permitir que personagens sejam capazes de navegar pelo ambiente de maneira mais robusta.

Mais recentemente, [Wang et al. \[2009\]](#) otimizam SIMBICON a fim de produzir caminhadas mais naturais para personagens humanoides. Vários termos específicos são considerados na função objetivo, com o intuito de reproduzir características importantes percebidas no caminhar humano, alguns inspirados em estudos da biomecânica. A otimização é resolvida através do método CMA, também usado no presente trabalho. [Wang et al. \[2010\]](#) adicionam à otimização variáveis responsáveis por simular fatores de incerteza, tais como forças externas. Esses fatores desconhecidos são representados por distribuições de probabilidade, e estratégias de controle otimizadas sob a influência de tais fatores de incerteza resultam em controladores mais robustos.

Otimização Baseada em Trajetória

[Witkin e Kass \[1988\]](#) introduziram a abordagem baseada em trajetória através de um método conhecido por *spacetime constraints*. Nesse método, a animação inteira a ser gerada é tratada de uma maneira global. Definido o tempo total da animação, o movimento completo é discretizado, como mostrado na Figura 3.5, e o problema de controle é mapeado em um problema de otimização com restrições. Uma importante característica da otimização baseada em trajetória é que, além de parâmetros relacionados ao controle, parâmetros diretamente relacionados à trajetória do personagem também fazem parte da otimização. Portanto, o espaço de busca é constituído pelas poses do personagem, pelos torques internos aplicados por seus atuadores, e pelas forças de reação do chão, em cada instante de tempo considerado na discretização. Ou seja, a trajetória completa, formada pelas poses definidas para cada instante discretizado, é diretamente considerada como variáveis da otimização. Já na otimização baseada em simulação, a trajetória é obtida indiretamente, a partir de uma simulação dinâmica que é realizada de acordo com os parâmetros de controle. Nesse caso, as variáveis da otimização são compostas apenas pelos parâmetros do próprio controlador.

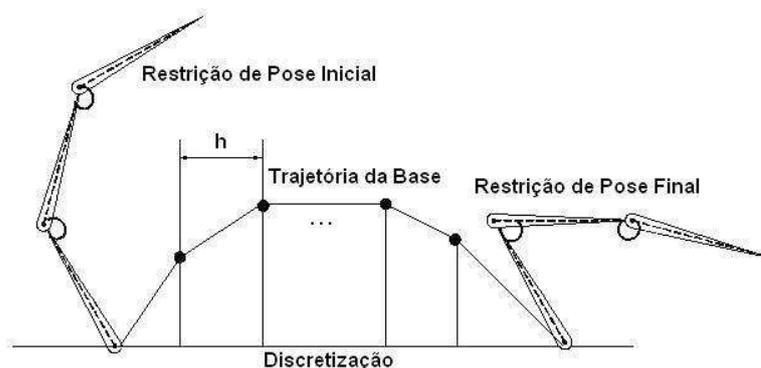


Figura 3.5: Exemplo de discretização da trajetória, necessária para a formulação do problema de otimização proposto no método *spacetime constraints* [Witkin e Kass 1988].

No método *spacetime constraints*, como a trajetória e os torques são definidos de maneira independente como variáveis da otimização, é necessário estabelecer um relacionamento entre essas variáveis, coerente com as leis da física. Esse relacionamento é estabelecido através da inclusão de restrições adequadas na formulação do problema de otimização, que são definidas baseadas nas equações de movimento do personagem. Essas restrições dinâmicas devem ser definidas para cada instante de tempo discretizado, e as derivadas da trajetória, necessárias para definir as equações de movimento, são geralmente aproximadas por diferenças finitas. Assim, as variáveis definidas para um determinado instante estão também relacionadas com as variáveis definidas para os instantes adjacentes. Uma vantagem do método *spacetime constraints* é que restrições explícitas da trajetória a ser gerada também podem ser especificadas. Especificar tais restrições cinemáticas corresponde a uma ferramenta de controle bastante útil para o animador. Por exemplo, o animador pode escolher as poses inicial e final do personagem, como ilustrado na Figura 3.5. A função objetivo desse problema de otimização, por sua vez, é definida principalmente a fim de minimizar a energia gasta pelo personagem para executar o movimento desejado.

O problema de otimização não-linear formulado é geralmente resolvido pelo método iterativo *Sequential Quadratic Programming (SQP)*, o qual é baseado em informações de gradiente. Note que, devido ao acesso a informações de gradiente, o método SQP geralmente leva menos tempo para obter o resultado otimizado do que métodos de otimização que não se baseiam em gradiente. Entretanto, por esse mesmo motivo, a otimização está facilmente sujeita a ficar presa em mínimos locais, e, conseqüentemente, depende bastante da amostra inicial usada.

De fato, o problema de otimização formulado é bastante difícil de ser resolvido. Devido à inclusão da trajetória no espaço de busca, este é constituído por várias amostras de trajetórias que nem mesmo satisfazem as leis da física, o que o torna ainda maior e mais complicado,

principalmente quando *spacetime constraints* é aplicado a personagens mais complexos. Note também que a corretude física, até mesmo da trajetória resultante da otimização, não é exatamente garantida, pois ela depende do sucesso do método de otimização em satisfazer as várias restrições adequadamente. Isso significa que se uma simulação física do personagem fosse realizada a partir do mesmo estado inicial do personagem, aplicando os torques obtidos pela otimização, a trajetória resultante provavelmente seria bem diferente da obtida pela otimização. Em contraste, usar otimização baseada em simulação física evita o problema de lidar com trajetórias fisicamente incorretas no espaço de busca, já que as equações de movimento são implicitamente impostas na própria simulação. Além disso, o controlador gerado pela otimização é capaz de reproduzir fielmente a trajetória resultante através de uma nova execução da simulação física.

Um outro problema do método *spacetime constraints* é a dificuldade de considerar a influência da interação com o chão através da especificação explícita de restrições de contato no problema de otimização. Uma consequência direta disso é que, para cada possível contato, os instantes nos quais ele ocorre precisam ser especificados previamente, o que significa que a otimização não possui a liberdade de decidir o melhor momento em que o personagem deve tocar ou impulsionar o chão, por exemplo. Em contraste, na otimização baseada em simulação, contatos surgem espontaneamente a partir da própria simulação dinâmica, em que alguma formulação clássica de contato pode ser diretamente empregada, e, portanto, não precisam ser explicitamente tratados na otimização.

Várias técnicas foram propostas com o intuito de atenuar as desvantagens do método *spacetime constraints*. Por exemplo, em relação à complexidade do personagem, em relação à sensibilidade à amostra inicial usada, e em relação à eficiência da otimização. [Popović e Witkin \[1999\]](#) mostraram que modificações significantes em dados capturados podem ser realizadas através de uma redução manual da complexidade do personagem, mantendo apenas os seus graus de liberdade mais importantes de acordo com a tarefa desejada. O movimento otimizado é então mapeado de volta para o personagem completo. Além disso, como a amostra inicial é definida de acordo com o próprio movimento capturado, ela já é adequada para achar um ótimo local satisfatório.

Definir restrições dinâmicas e considerar torques no cálculo da função objetivo frequentemente torna o problema mais difícil de ser otimizado. [Liu e Popović \[2002\]](#) utilizam restrições dinâmicas simplificadas a fim de tornar o problema de otimização mais fácil e rápido de ser tratado. Alguns efeitos dinâmicos podem ser preservados considerando apenas a conservação do momento linear e do momento angular globais, em relação ao centro de

massa do personagem, sem exigir o cálculo de forças de contato nem de torques de junta. Fang e Pollard [2003] descrevem um método para calcular as primeiras derivadas de uma grande variedade de restrições dinâmicas e de funções objetivo, de maneira bastante eficiente. Note que essas restrições dinâmicas podem envolver validade física, tais como restrições de contato com o chão. Além disso, como o termo da energia usado no cálculo da função objetivo é definido pela soma ponderada das acelerações das juntas ao quadrado, os torques das juntas não precisam ser calculados. Safonova et al. [2004] exploram espaços de busca de baixa dimensão para obter melhor convergência e movimentos resultantes mais realistas. Esses espaços de busca reduzidos são obtidos automaticamente a partir da análise dos componentes principais (*Principal Component Analysis (PCA)*) presentes em uma coleção de exemplos de movimento possuindo um mesmo estilo. Liu et al. [2005] introduzem um novo método, chamado *Nonlinear Inverse Optimization*, para estimar parâmetros de otimização a partir de movimentos capturados. Esse método permite que parâmetros físicos do personagem, tais como as elasticidades de cada junta individual, sejam extraídos a partir de sequências curtas de movimento. Uma vez conhecidos, esses parâmetros podem ser modificados para gerar novos movimentos. Note que apenas um único movimento capturado é necessário nesse caso.

Mais diretamente relacionado a este trabalho, Wampler e Popović [2009] também otimizam locomoções cíclicas de corrida para uma variedade de personagens. Uma diferença importante é que eles permitem que a otimização modifique parâmetros morfológicos do personagem, adaptando também as suas formas. Em contraste, este trabalho deseja gerar controladores para uma determinada morfologia, que é mantida fixa durante todo o processo de otimização. Mantendo a morfologia do personagem fixa, os modos naturais de vibração do personagem são explorados, de maneira energeticamente eficiente, a fim de reduzir o espaço de busca. Isso tanto facilita a otimização quanto permite que o animador seja capaz de guiar o estilo da locomoção resultante através da seleção e da combinação das vibrações independentes desejadas. Sem o uso dos modos de vibração e sem a interferência do animador, este trabalho se tornaria bastante semelhante ao trabalho proposto por Wampler e Popović [2009]. Uma outra diferença é justamente devido ao fato deles usarem *spacetime constraints*. Assim como em [Fang e Pollard 2003], as restrições dinâmicas usadas são simplificadas, envolvendo apenas momento linear e momento angular globais em relação ao centro de massa do personagem, e forças e torques de reação do chão. Ou seja, as equações de movimento, normalmente definidas explicitamente para cada um dos graus de liberdade do sistema, não são incluídas. Os torques das juntas são usados apenas no cálculo do termo principal da função objetivo, que corresponde à energia gasta pelo personagem. Note que outra simplificação é que os torques das juntas não são incluídos como parâmetros da otimização. Ao invés disso, eles são obtidos analiticamente por dinâmica inversa,

a partir da trajetória e das forças de contato. Isso evita a redundância do espaço de busca. Em contraste, considerando as análises realizadas nesta subseção, a técnica proposta no presente trabalho usa a abordagem de otimização baseada em simulação para gerar seus controladores.

3.1.3 Controladores Guiados por Dados de Movimento

Ao invés de definir trajetórias de referência manualmente (Subseção 3.1.1), dados capturados de atores reais podem ser utilizados para guiar as locomoções e torná-las mais naturais. Entretanto, embora movimentos capturados sejam fisicamente corretos por serem obtidos diretamente a partir do movimento de atores reais, simular esses movimentos diretamente em uma simulação física usando controladores PD é difícil porque eles são fisicamente corretos de acordo com a estrutura real do ator e com o mundo real. Como o personagem virtual e a simulação física são versões claramente simplificadas da realidade, os movimentos capturados não são completamente fiéis a essas versões virtuais. Outro motivo é que as forças de reação do chão não são capturadas junto com o movimento, e usar uma formulação de contato fiel o suficiente ao contato real entre o pé do ator e o chão é também bastante complicado. Portanto, seguir o movimento capturado simplesmente usando controladores PD não é suficiente para manter o equilíbrio do personagem. Para isso, outras técnicas precisam ser incorporadas ao controlador.

[Zordan e Hodgins \[2002\]](#) introduziram o uso de movimentos capturados como trajetórias de referência para controladores. Para tratar o equilíbrio, uma estratégia adicional é incorporada à simulação com o objetivo de controlar o centro de massa do personagem através de forças virtuais. [Sok et al. \[2007\]](#) desenvolveram um método capaz de ajustar trajetórias de referência para personagens 2D, usando um mapeamento de deslocamento não linear. Os parâmetros de deslocamento são encontrados através de um processo de otimização previamente realizado. Alguns dos trabalhos mencionados na Subseção 3.1.1 também permitem que dados capturados sejam utilizados como trajetórias de referência para guiar as locomoções de maneira mais natural [[Yin et al. 2007](#)]. Entretanto, esses dados possivelmente precisam ser primeiramente analisados e suavizados antes de serem utilizados.

Uma abordagem possível para seguir movimentos capturados, enquanto tratando o equilíbrio adequadamente, consiste em otimizar os torques *online*, ou seja, resolvendo um problema de otimização em cada instante da simulação dinâmica [[Geijtenbeek et al. 2011](#)]. Essa abordagem de otimização *online*, proposta mais recentemente, é inspirada em *spacetime constraints*, mas se diferencia principalmente por definir otimizações considerando apenas poucos passos da simulação, a fim de tornar a abordagem viável na prática. De fato, mesmo desconsiderando o tempo exigido por otimizações usando janelas de tempo mais longas,

ao considerar simulações interativas, possivelmente influenciadas pelo ambiente em tempo de execução, qualquer distúrbio externo inesperado já poderia invalidar os torques futuros otimizados. Portanto, o problema de otimização básico pode ser formulado como segue:

$$\arg \min_{\boldsymbol{\tau}} \{G_1, G_2, \dots, G_n\}, \text{ sujeito a } \{C_1, C_2, \dots, C_m\}, \quad (3.3)$$

onde G_i representam n objetivos de mais alto nível definindo a locomoção, e C_i representam as m restrições. O resultado de cada otimização é um vetor de torques, $\boldsymbol{\tau}$, a ser aplicado no instante atual da simulação.

A principal vantagem dessa abordagem, sobre abordagens de controladores projetados manualmente, é que os torques são obtidos considerando o personagem como um todo, ao invés de tratar cada junta individualmente, resultando em um controle coordenado. Entretanto, além de uma implementação mais complicada, essa abordagem exige mais computacionalmente, já que otimizações, embora simplificadas, são realizadas *online*. Além disso, descrever comportamentos apenas através de objetivos, embora permita uma formulação mais intuitiva do problema, pode ser difícil, pois a animação resultante pode não condizer com a descrição, caso haja interferência entre os objetivos definidos.

Diferentes objetivos podem ser definidos a fim de tratar o equilíbrio do personagem. [Abe et al. \[2007\]](#) definem um objetivo que guia a projeção do centro de massa do personagem em direção ao centro da base suporte. [Jain et al. \[2009\]](#) definem objetivos que guiam efetores finais (e.g. mãos) do personagem em direção a estruturas suporte, tais como corrimãos e paredes. [Macchietto et al. \[2009\]](#), por sua vez, definem objetivos que controlam momento angular. Além de otimizar torques considerando apenas um instante específico, o que é apropriado para objetivos incrementais, tais como os mencionados acima, algumas tarefas exigem um planejamento prévio do controle e conseqüentemente otimizações usando janelas de tempo mais amplas. Exemplos de tais tarefas consistem em seguir locomoções capturadas [[Silva et al. 2008](#), [Muico et al. 2009](#), [Kwon e Hodgins 2010](#), [Jain e Liu 2011](#)], seguir locomoções planejadas ou com restrições [[Mordatch et al. 2010](#)], ou caminhar sobre terrenos irregulares [[Wu e Popović 2010](#)]. Para manter a abordagem praticável em tempo de execução, enquanto alguns métodos exigem um pré-processamento *offline* para auxiliar a otimização *online* com algumas informações necessárias [[Silva et al. 2008](#), [Muico et al. 2009](#), [Kwon e Hodgins 2010](#), [Wu e Popović 2010](#)], outros métodos usam versões simplificadas de baixa dimensão do personagem para realizar o planejamento prévio [[Mordatch et al. 2010](#), [Jain e Liu 2011](#)]. [Jain e Liu \[2011b\]](#) realizam as otimizações *online* usando janelas de tempo mais longas, correspondentes a esse planejamento prévio exigido do controle, utilizando apenas os modos de vibração de mais baixa frequência do personagem simulado, os quais são recalculados em cada instante da simulação.

Note que a qualidade visual de muitas técnicas depende diretamente da qualidade das trajetórias de referência usadas. Entretanto, enquanto é possível utilizar tais técnicas para personagens humanoides, não se pode usá-las para personagens arbitrários. Portanto, os modos de vibração do personagem simulado também podem ser vistos como uma fonte alternativa de descrição da locomoção. Como trajetórias de referência realistas (e.g. movimentos capturados) nem sempre podem ser disponibilizadas, os modos de vibração podem ser, em muitos casos, a única fonte disponível de descrição da locomoção.

3.2 Componentes Elásticos Passivos

Pesquisas realizadas tanto na biologia [Alexander 1988, Alexander 1996, Novacheck 1998] quanto na robótica [McGeer 1990, McGeer 1990, Thompson e Raibert 1990, Collins et al. 2001, Collins et al. 2005, Poulakakis et al. 2006, Owaki et al. 2011] têm demonstrado que reutilizar a energia armazenada em componentes elásticos passivos, que constituem as estruturas de animais e que são incorporados em robôs, implica em uma estratégia bastante útil para gerar locomoção eficiente e conseqüentemente mais natural.

Mais especificamente na área da robótica, enquanto alguns robôs humanoides são capazes de apresentar movimentos suaves bastante atrativos, eles exigem um controle preciso em cada junta individual, a fim de seguir trajetórias específicas. Portanto, para o estudo de locomoção eficiente, essa abordagem de controle é insatisfatória porque esses atuadores com alto nível de precisão, usados em robôs, exigem muita energia. Com o intuito de estudar aspectos naturais relacionados a locomoção, robôs dinâmicos passivos foram propostos e inicialmente desenvolvidos por McGeer [1990b], resultando no surgimento de um novo paradigma de projeto e controle de robôs. Em contraste com abordagens em que cada junta é ativamente controlada em cada instante de tempo, experimentos com robôs completamente passivos, ou seja, sem qualquer fonte de energia e sem qualquer controle, mostram que, considerando que tais robôs sejam inicialmente posicionados de maneira apropriada em superfícies levemente inclinadas, padrões de locomoção podem ser gerados apenas sob a influência da gravidade e da inércia. Tais padrões de locomoção surpreendem pelo fato de apresentarem semelhanças com locomoções humanas, tais como andar e correr, mesmo sem qualquer existência de controle ativo.

Inspirados nas características dos modelos de robôs bidimensionais apresentados por McGeer [1990b], Collins et al. [2001] mostram que robôs dinâmicos passivos bípedes e com joelhos, mas em versões tridimensionais (Figura 3.6 à direita), também podem ser capazes de caminhar em condições semelhantes às definidas para as versões bidimensionais. A Figura



Figura 3.6: Exemplos de robôs dinâmicos projetados para caminhar passivamente em superfícies levemente inclinadas [Collins et al. 2005].

3.6 mostra vários exemplos de robôs dinâmicos projetados para caminhar passivamente em superfícies levemente inclinadas. Note que o robô “bípede” mostrado na parte central da figura corresponde a uma versão bidimensional, pois seus dois pares de pernas são projetados com o objetivo de torná-lo mais estável dinamicamente, evitando que ele caia para os lados. A fim de demonstrar que as propriedades passivas desses robôs podem ser aproveitadas para gerar locomoção eficiente nas mais diferentes condições, Collins et al. [2005] incluem simples mecanismos de controle ativo para mostrar que esses robôs são capazes de caminhar em superfícies retas com pouca influência ativa (Figura 3.7).



Figura 3.7: Robôs dinâmicos constituídos por componentes passivos apropriadamente projetados são capazes de caminhar em superfícies retas com pouca influência ativa [Collins et al. 2005].

Mais diretamente relacionado a este trabalho, modelos simulados de robôs dinâmicos elásticos bípedes, também completamente passivos, são usados para gerar locomoções de corrida, através do uso explícito de molas [McGeer 1990, Thompson e Raibert 1990]. Poulakakis et al. [2006], por sua vez, examinam como esses componentes elásticos passivos podem ser aproveitados em robôs quadrúpedes correndo. Mais recentemente, Owaki et al. [2011] apresentam um robô real completamente passivo correndo em uma esteira levemente inclinada. A figura 3.8 mostra o momento em que o robô não possui contato algum com

a esteira, comprovando que o robô está realmente correndo. As molas usadas em partes específicas do robô são mostradas à direita da figura. Esse trabalho é um forte indício de que, como em caminhada [Collins et al. 2005], pouca influência ativa é efetivamente necessária para que robôs, constituídos por componentes elásticos passivos adequados, sejam capazes de correr em superfícies retas.



Figura 3.8: Exemplos de um robô dinâmico elástico “bípede” projetado para correr passivamente em uma superfície levemente inclinada [Owaki et al. 2012].

Na área de animação de personagens virtuais, Raibert e Hodgins [1991] também reconhecem que estruturas musculoesqueléticas de animais são capazes de armazenar energia ao se locomoverem, através da compressão exercida em suas juntas elásticas. Mais recentemente, esse comportamento passivo de estruturas musculoesqueléticas foi explorado em alguns trabalhos com o objetivo de melhorar a qualidade de animações de personagens articulados geradas por otimização [Liu et al. 2005, Wampler e Popović 2009]. Note que esses trabalhos usam *spacetime constraints*, e a influência passiva é simplesmente descontada no cálculo da energia produzida, de maneira implícita. Representando o torque total em cada junta como a soma de um componente passivo e de um componente ativo, o termo passivo é calculado baseado na Equação 2.1 e subtraído do torque total:

$$\tau_{ativo} = \tau_{total} - (k_p(\theta_{relax} - \theta) - k_d\dot{\theta}), \quad (3.4)$$

onde τ_{ativo} corresponde ao componente ativo do torque total τ_{total} , θ e $\dot{\theta}$ correspondem respectivamente ao ângulo e à velocidade angular atuais da junta, θ_{relax} corresponde ao ângulo de relaxamento da mola, e k_p e k_d correspondem respectivamente à rigidez da mola e à viscosidade do amortecedor.

Enquanto considerar a influência passiva simplesmente através desse cálculo diferenciado da energia ativa, o qual é usado para determinar a função objetivo da otimização, já apresenta uma melhoria visual perceptível na locomoção resultante, no presente trabalho, deseja-se incluir um mecanismo passivo explícito, de fato incorporando molas na estrutura do personagem, as

quais serão efetivamente consideradas em uma simulação física, como em [Raibert e Hodgins 1991]. Dessa maneira, o efeito passivo possui uma influência mais direta na geração da locomoção e é mais consistente com o que ocorre em animais reais. Note que esse argumento também motiva o uso de uma abordagem de otimização baseada em simulação, ao invés do uso de *spacetime constraints*.

3.3 Modos de Vibração

Na área de animação, modos de vibração têm sido usados há bastante tempo na simulação de modelos deformáveis [Pentland e Williams 1989, James e Pai 2002, Hauser et al. 2003, Choi e Ko 2005, Yinghui et al. 2006, Barbic et al. 2009]. A ideia principal é reduzir o espaço paramétrico, usado para representar as deformações, considerando apenas os modos de vibração de mais baixas frequências. Assim, modelos de malhas constituídos por milhares de graus de liberdade podem ser simulados de maneira bastante eficiente sobre um espaço paramétrico adequadamente reduzido. É importante notar, entretanto, que apenas dois trabalhos usaram modos de vibração diretamente no controle de personagens articulados [Kry et al. 2009, Jain e Liu 2011].

O trabalho de Kry et al. [2009] possui semelhanças mais claras com a técnica proposta no presente trabalho. Uma abordagem cinemática é usada para gerar locomoção como uma combinação dos modos de vibração de mais baixas frequências. Assim como no presente trabalho, esses modos também podem ser vistos como uma paleta de movimentos eficientes. A locomoção final é produzida de acordo com a Equação 2.10, através da escolha das amplitudes, das frequências e das fases de cada modo selecionado.

O problema dessa abordagem é que nem a gravidade nem o contato com o chão são considerados. Essas locomoções fisicamente incorretas precisariam ser posteriormente processadas para considerar tais aspectos. Entretanto, modificar as trajetórias resultantes de maneira apropriada seria bastante complicado. Inspirado nas ideias sugeridas por Kry et al. [2009], a técnica proposta no presente trabalho usa uma abordagem dinâmica que permite que um esboço da locomoção desejada seja definido como uma combinação dos modos de vibração, os quais são usados para representar os torques aplicados internamente pelo personagem simulado. Uma abordagem de otimização baseada em simulação é então responsável por ajustar a combinação dos modos, além de outros parâmetros do controlador usado para guiar a simulação, a fim de produzir automaticamente uma locomoção fisicamente correta sob a influência da gravidade e do chão.

Jain e Liu [2011b], por sua vez, utilizam as vibrações naturais do personagem para permitir que movimentos de referência (e.g. movimentos capturados) sejam seguidos de maneira mais eficiente, de acordo com uma simulação dinâmica realizada analiticamente. Em cada instante da simulação, uma análise modal é realizada sobre a pose atual do personagem. Como os modos de vibração obtidos são dinamicamente independentes, cada modo pode ser resolvido separadamente. O controle é realizado usando uma abordagem de otimização *online*, em que torques são otimizados em cada instante da simulação. A eficiência decorrente do uso dos modos de vibração permite uma simulação mais estável enquanto seguindo o movimento de referência determinado, pois torques correspondentes às coordenadas modais de mais baixas frequências podem ser otimizados considerando uma janela de tempo mais ampla. Ao invés de considerar apenas o próximo passo da simulação, otimizações considerando maiores intervalos de tempo à frente podem ser realizadas.

Entretanto, movimentos de referência fisicamente corretos são necessários para o bom funcionamento dessa técnica de controle. Em contraste, ao invés de seguir uma locomoção já existente, o objetivo da técnica proposta no presente trabalho é justamente produzir uma locomoção desejada. Note que a locomoção resultante é derivada apenas a partir da definição de uma única pose de relaxamento e do esboço fornecido como entrada pelo animador através da interface modal, e nenhum dado de movimento de referência é necessário.

4 *Técnica Proposta*

4.1 Introdução

Este trabalho propõe um método para guiar o controle de personagens virtuais fisicamente simulados. Mais especificamente, o método proposto consiste em construir automaticamente controladores de locomoção, resolvendo um problema de otimização. Motivado pelas discussões realizadas na Seção 1.2, o controle é construído através de uma combinação adequada dos modos naturais de vibração de mais baixas frequências do personagem, o qual é explicitamente representado por uma estrutura elástica. Os modos de vibração são usados basicamente para aproveitar essa dinâmica elástica passiva da estrutura. Em outras palavras, considerando que o comportamento de uma estrutura elástica seja previamente conhecido, é possível que ela seja excitada de maneira mais eficiente, sincronizando a excitação com sua resposta passiva. Como consequência, a otimização do controlador é também facilitada. Este capítulo, portanto, tem como objetivo apresentar detalhadamente essa técnica de controle proposta.

As seções deste capítulo são organizadas baseadas no processo de construção do controlador, o qual é ilustrado na Figura 4.1 e pode ser resumido de acordo com os seguintes passos:

- **Especificação do personagem**, que consiste em definir a estrutura hierárquica de corpos rígidos usada para representar o personagem, com suas propriedades geométricas e físicas;
- **Definição da pose de relaxamento**, que consiste em escolher a pose neutra do personagem de acordo com a locomoção desejada, a qual será usada internamente na estrutura do controlador (Seção 4.2);
- **Análise modal**, que consiste em calcular, a partir da pose de relaxamento e das rigidezes passivas escolhidas pelo animador, os modos de vibração na fase do ar (Φ^a) e os modos

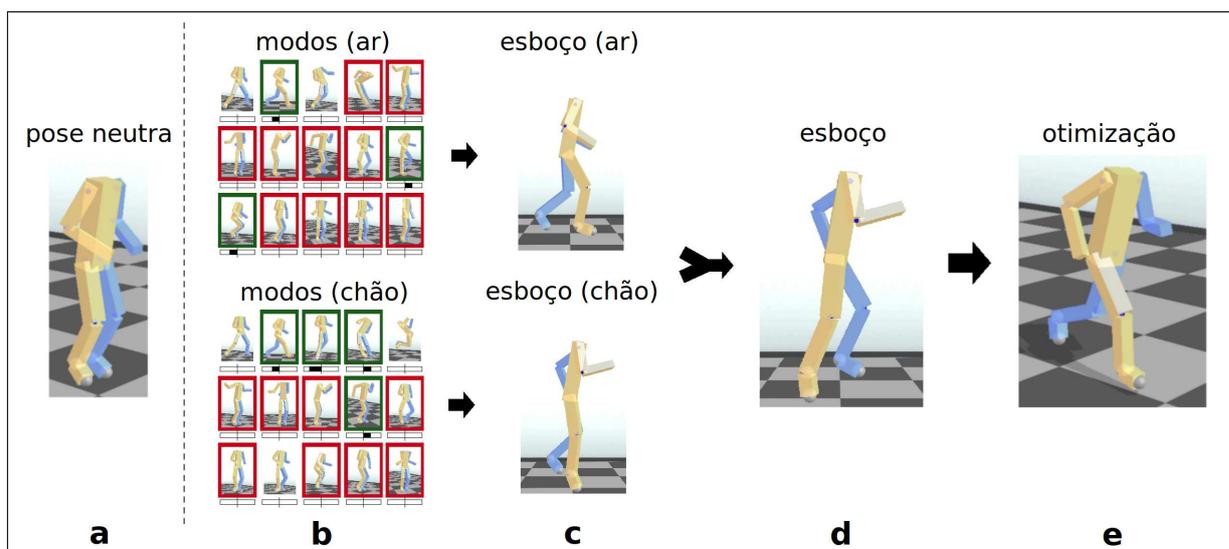


Figura 4.1: Uma visão geral do método proposto para a construção do controlador: (a) especificação do personagem e definição da pose de relaxamento; (b) análise modal e definição das paletas de modos de locomoção; (c) especificação dos modos para construção do esboço de locomoção; (d) esboço da locomoção; e (e) otimização do controlador para obtenção automática da locomoção final.

de vibração na fase do chão (Φ^c), os quais também serão usados internamente na estrutura do controlador (Seção 4.2);

- **Construção do esboço da locomoção**, que consiste em especificar a locomoção desejada a partir de uma combinação dos modos de vibração, fornecida através do uso de uma interface visual disponibilizada para o animador (Seção 4.3);
- **Otimização do controlador**, que consiste em obter um controlador capaz de gerar uma locomoção cíclica fisicamente simulada, a partir do esboço da locomoção desejada fornecida como entrada pelo animador (Seção 4.4).

4.2 Estrutura do Controlador

A estrutura do controle de locomoção utilizada consiste basicamente de uma simples máquina de estados cíclica. Entretanto, mantendo em mente o intuito de aproveitar a dinâmica passiva do personagem, dois mecanismos de conservação de energia são incorporados a essa estrutura básica. O primeiro mecanismo consiste em calcular, previamente, os modos naturais de vibração do personagem em relação a uma determinada pose neutra, e utilizar essa base modal resultante para indicar as direções naturais em que o personagem pode ser internamente excitado, a fim de gerar locomoção eficiente. O segundo mecanismo consiste em simular

explicitamente o próprio efeito elástico passivo da estrutura definida para o personagem, explorando assim a energia potencial elástica que é ora armazenada, ora convertida em energia cinética.

Note que essa troca de energia é realizada gratuitamente, ou seja, sem gasto de energia por parte do personagem. Ao invés de integralmente produzida pelo personagem, parte da energia necessária para locomoção é de fato eficientemente reutilizada, imitando o efeito involuntário passivo de alongamento e compressão dos músculos, tendões e ligamentos presentes em animais reais. Portanto, a estrutura do personagem funciona como um dispositivo restaurador energético, no qual energia potencial elástica é armazenada, à medida que o personagem se afasta da sua pose neutra, e gratuitamente convertida em energia cinética, à medida que o personagem se aproxima da sua pose de relaxamento. Além disso, como os modos naturais de vibração estão diretamente relacionados à maneira pela qual essa troca energética é realizada na estrutura elástica como um todo, é intuitivo perceber que esses dois mecanismos agem naturalmente em conjunto, com o intuito de sincronizar a atuação interna da estrutura com sua resposta passiva e, conseqüentemente, aproveitar ao máximo essa reutilização energética.

4.2.1 Controlador Básico de Locomoção

O controlador de locomoção consiste basicamente de uma simples máquina de estados cíclica. A máquina de estados utilizada é projetada para permitir duas possíveis fases, presentes em vários tipos de locomoção: a *fase do ar*, em que o personagem não possui contato com o chão e se prepara para pousar adequadamente; e a *fase do chão*, em que o personagem deve ser capaz de interagir corretamente com o chão a fim de lançar-se novamente ao ar da maneira desejada.

Como ilustrado na Figura 4.2, a atuação do controlador é discretizada na forma de um *trem de pulsos* correspondentes aos impulsos aplicados internamente pelos atuadores localizados nas juntas do personagem. Por questão de simplicidade, em cada fase de locomoção, um único impulso é aplicado. Esses torques internos, dados por um vetor $\boldsymbol{\tau}$, voluntariamente aplicados pelo personagem durante um determinado intervalo de tempo, δ , são chamados de torques *ativos*. A máquina de estados é portanto definida com o simples objetivo de gerenciar os instantes em que cada impulso inicia e termina. Cada estado é responsável por guardar as informações dos impulsos, enquanto as transições definem quando cada um dos estados deve estar ativo. Para cada estado ativo, $\boldsymbol{\tau}$ é aplicado desde o instante em que o estado se torna ativo até o final do intervalo δ . Note que cada estado deve conter seu próprio vetor $\boldsymbol{\tau}$ com seu intervalo associado δ , e que apenas um estado pode estar ativo por vez.

O número de estados depende do número de pés que o personagem possui, e é definido de

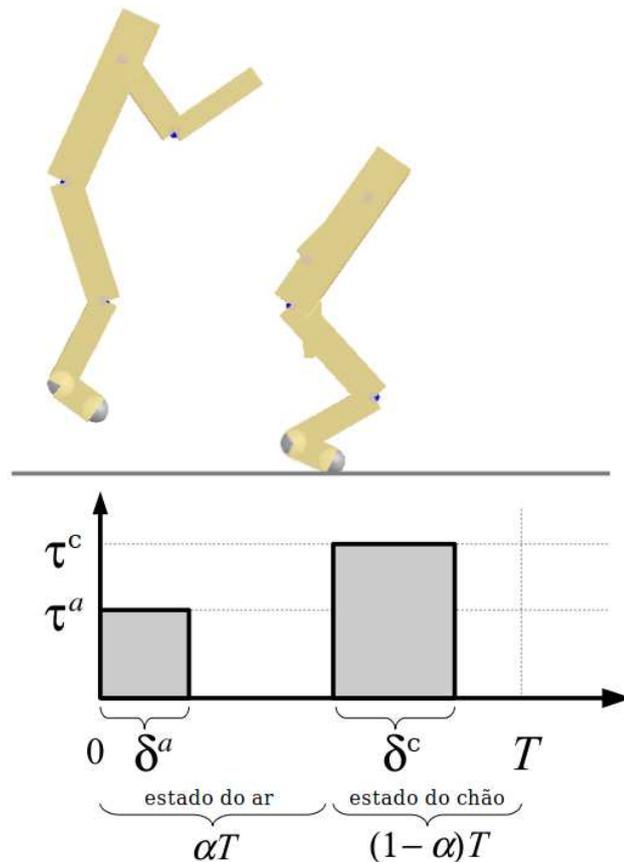


Figura 4.2: Controlador básico de locomoção definido para um personagem monópode. A partir de um determinado estado inicial do personagem, os torques definidos na fase do ar, τ^a , são aplicados durante δ^a segundos. Em seguida, após completados αT segundos, os torques definidos na fase do chão, τ^c , são aplicados durante δ^c segundos. Após completado o período total de um ciclo, T segundos, o controlador repete sua execução. Note que, já que os torques aplicados são definidos por vetores, para simplificar a ilustração, apenas uma versão escalar do trem de pulsos é mostrada.

acordo com as fases de locomoção. No caso mais simples, quando definida para um personagem que possui apenas um pé, a máquina de estados possui apenas dois estados: um referente à fase do ar e outro referente à fase do chão. Para um personagem que possui dois pés, por sua vez, mais dois estados são incluídos para permitir simular as fases de pouso e interação com o chão, referentes ao segundo pé, de maneira independente. Note que, por questão de simplicidade, o estado ativo é inicialmente escolhido como sendo um estado do ar, referente a algum pé específico do personagem. Além disso, a ordem de ativação dos estados, a qual é fixa e realizada continuamente de maneira cíclica, é definida da seguinte maneira: um estado do ar, referente a um determinado pé, é sempre seguido por seu respectivo estado do chão (i.e. referente ao mesmo pé); e um estado do chão referente a um dos pés é sempre seguido pelo estado do ar referente ao outro pé do personagem. Uma vez definidos os estados e a ordem em que cada estado deve ser ativado, as transições são responsáveis, simplesmente, por definir o

instante exato em que o estado consecutivo é ativado.

Todas as transições são baseadas em tempo, ou seja, um simples contador é utilizado para marcar o tempo passado desde o início da ativação de cada estado. De maneira semelhante à duração do intervalo δ , assim que um determinado tempo é atingido, a transição é realizada. Entretanto, ao invés de determinar as durações dos estados em valores absolutos, eles são determinados em relação ao período total de um ciclo, o qual é dado por T segundos. No caso de um personagem monópode, por exemplo, os tempos de duração de cada estado são definidos com base em um parâmetro $\alpha \in [0, 1]$: αT corresponde à duração do estado do ar, enquanto $(1 - \alpha)T$ corresponde à duração do estado do chão.

Note que para personagens bípedes simétricos, os parâmetros do controlador podem ser obtidos apenas para os estados referentes a um único pé. Os parâmetros dos estados referentes ao outro pé são obtidos por simetria, ou seja, refletindo τ^a e τ^c ; repetindo δ^a , δ^c e α ; e dividindo igualmente o período total de T segundos, de modo que a fase de cada pé dure exatamente $T/2$ segundos.

A fim de obter uma locomoção cíclica, na direção do eixo x global por exemplo, os parâmetros do controlador devem ser adequadamente escolhidos para que o personagem seja capaz de atingir, no exato instante em que o período T se completa, a mesma pose e a mesma velocidade que possuía no exato instante inicial do ciclo, com exceção apenas da posição global do personagem referente ao próprio eixo x global. Para permitir tal flexibilidade, o estado inicial do personagem é também incluído como parte dos parâmetros do controlador, ou seja, o personagem pode começar o ciclo a partir de um estado inicial qualquer, determinado por sua pose inicial, q_0 , e por sua velocidade inicial, \dot{q}_0 .

Apesar de a estrutura de controle utilizada ser relativamente simples, ela é suficiente para atingir os objetivos de cada fase, assim como é também apropriada para evidenciar a contribuição do uso proposto dos modos naturais de vibração, assunto discutido na Subseção [4.2.2](#).

4.2.2 Modos Naturais de Vibração

A estrutura do controlador básico de locomoção é adequada à abordagem de utilização dos modos naturais de vibração do personagem, que é proposta neste trabalho com o objetivo de facilitar a geração de uma locomoção eficiente desejada. A ideia geral dessa abordagem consiste em permitir que a atuação voluntária do personagem seja reduzida a um conjunto apropriado de ativações possíveis, ou seja, permitir que os torques ativos a serem aplicados nas juntas

sejam diretamente definidos em um espaço vetorial que já implique naturalmente em locomoção eficiente.

Representar a atuação voluntária do personagem através de seus modos naturais de vibração significa excitar o personagem, como um todo, em sincronia com a resposta física produzida por sua estrutura elástica passiva, a qual se propaga naturalmente por todo o personagem. Assim, quando os torques ativos são aplicados propositalmente na direção das vibrações naturais do personagem, em cada fase de locomoção, eles funcionam em conjunto com o efeito elástico da sua estrutura. A vantagem é que esse efeito elástico passivo ocorre sem gasto de energia por parte do personagem, de maneira espontânea e involuntária, agindo simplesmente para restaurar sua pose de relaxamento.

Note que a maneira mais direta de representar os torques ativos $\boldsymbol{\tau}$, descritos na Subseção 4.2.1, é através da base vetorial canônica clássica, chamada apenas de *base canônica*. Cada componente do vetor $\boldsymbol{\tau}$, definido na base canônica, corresponde diretamente ao torque individual aplicado em cada junta específica, de acordo com alguma ordem pré-estabelecida para as juntas. Em contraste, neste trabalho, os torques ativos são convenientemente representados através de uma base vetorial formada pelos modos naturais de vibração do personagem, chamada de *base modal*. Primeiramente, os modos naturais de vibração do personagem são previamente calculados, a partir da pose de relaxamento e das rigidezes passivas escolhidas, e armazenados na forma de uma matriz, Φ , chamada de *matriz de transformação modal*, onde cada coluna ϕ_i corresponde a um modo natural de vibração. Calculada a matriz de transformação modal, os torques ativos podem ser representados por um vetor $\boldsymbol{\psi}$, onde cada elemento ψ_i corresponde à ativação do respectivo modo de vibração ϕ_i . Como os torques ativos são representados através da base modal, ainda é necessário que esses torques sejam convertidos para a base canônica, para que eles possam ser aplicados por cada atuador individualmente. De acordo com a própria definição do vetor $\boldsymbol{\psi}$, essa conversão é simplesmente realizada através da matriz de transformação modal Φ , calculada para cada estado, da seguinte forma:

$$\boldsymbol{\tau} = \Phi \boldsymbol{\psi}, \quad (4.1)$$

onde $\boldsymbol{\tau}$ é o vetor de torques ativos em coordenadas das juntas, e $\boldsymbol{\psi}$ é o vetor de torques ativos em coordenadas modais. Tanto os modos naturais de vibração presentes na matriz Φ quanto os elementos do vetor $\boldsymbol{\psi}$ são ordenados de acordo com suas frequências naturais correspondentes. A análise modal é realizada de acordo com a mesma abordagem baseada em restrições usada em [Kry et al. 2009], a qual encontra-se detalhadamente descrita na Subseção 2.4.3.

Um ponto importante a ser discutido é que os modos de vibração a serem usados nos estados

do chão, Φ^c , devem ser diferentes dos modos de vibração a serem usados nos estados do ar, Φ^a , devido à influência do contato com o chão. Portanto, os torques ativos são definidos, e também convertidos, de maneira diferente para cada estado. Para os estados do ar e do chão, respectivamente, $\tau^a = \Phi^a \psi^a$ e $\tau^c = \Phi^c \psi^c$. A vantagem de se usar uma abordagem baseada em restrições é que os modos de vibração do chão podem ser facilmente calculados através da simples inclusão de uma restrição extra. A escolha dessa restrição corresponde portanto a escolher como o contato com o chão deve ser considerado na análise modal. A restrição usada é simplesmente definida de modo a manter a ponta do pé de apoio fixa, assumindo portanto que, ao entrar em contato com o chão, o pé pode apenas girar em torno desse ponto de contato previsto. Entretanto, apesar de ser possível definir restrições mais elaboradas, a restrição usada é suficiente para obter novos modos de vibração interessantes, visualmente coerentes com a influência do contato com o chão. Como um exemplo, um dos primeiros modos de vibração do chão, não existente dentre os modos de vibração do ar, corresponde ao personagem utilizando seu corpo inteiro para impulsionar o chão de maneira natural e eficiente. Essas diferenças entre os modos de vibração do ar e do chão, devido à inclusão dessa simples restrição usada, são provavelmente causadas pela redistribuição global da inércia, já que a origem dos eixos principais de rotação, que antes correspondia exclusivamente ao centro de massa, agora está também relacionada à ponta do pé.

Além do relacionamento natural entre os modos de vibração e o efeito elástico passivo da estrutura, representar os torques ativos na base modal permite que o controle seja definido sobre um conjunto reduzido de modos de vibração, selecionados pelo animador de acordo com a locomoção desejada. Isso ocorre devido às propriedades ortogonais (Subseção 2.4.2) dos modos de vibração, que implicam no controle independente de cada um deles. Intuitivamente, essa propriedade permite usar os modos de vibração como uma paleta de oscilações naturais em torno da pose de relaxamento definida. Essa paleta é portanto disponibilizada para o animador através de uma interface visual que permite a construção interativa de um esboço da locomoção desejada, discutida com mais detalhes na Seção 4.3.

4.2.3 Estrutura Elástica Passiva

Qualquer estrutura física inanimada, tal como uma ponte ou um prédio, possui algum tipo de natureza elástica, de acordo com o material do qual ela consiste. Da mesma forma, o corpo de um animal, constituído pelo material formado por sua própria estrutura física (ossos, fibras musculares, tendões, ligamentos, cartilagens, pele etc), também consiste, por si só, de uma estrutura elástica passiva. A diferença é que, em animais, existem também mecanismos de

inserção de energia, os quais consistem da ação ativa dos músculos.

A existência de propriedades elásticas em animais talvez não seja percebida tão claramente como em outros tipos de estrutura, devido à necessidade de que os tecidos que constituem suas juntas e que influenciam seus movimentos sejam suficientemente flexíveis, para que o movimento voluntário possa ser realizado sem exigir grandes esforços. Assim, devido à flexibilidade de suas juntas, se um animal, parado em pé, simplesmente relaxar todos os seus músculos para que sua estrutura aja apenas de maneira passiva, ele não será capaz de sustentar sua postura, como no caso de um prédio, por exemplo. Isso ocorre porque suas juntas não são rígidas o suficiente para suportar passivamente a ação da gravidade. Portanto, uma outra maneira, talvez mais convincente, de se perceber essas propriedades elásticas em animais seja imaginar uma situação em que um animal é colocado em um ambiente sem gravidade. Uma vez que ele consiga manter seus músculos totalmente relaxados, o material da sua estrutura funcionará como um conjunto de molas agindo a fim de alcançar uma determinada configuração de relaxamento, na qual há um equilíbrio entre as forças elásticas que são aplicadas exclusivamente pelo próprio material. Por esse motivo, a *pose de relaxamento* ou *pose neutra* pode ser também chamada de *pose de equilíbrio*. A ideia de que o efeito passivo de músculos, tendões e ligamentos pode ser pensado como o efeito de molas é suportado por [Novacheck 1998].

De fato, todo animal possui uma única pose realmente passiva, correspondente à sua pose neutra, a qual é obtida na ausência total de gravidade e de todas as forças musculares ativas. A existência de uma pose neutra única é também evidente em humanos, e experimentos realizados pela NASA [2012] obtiveram uma estimativa média para a pose neutra humana (Figura 4.3), considerando as medidas de doze diferentes pessoas em um ambiente de microgravidade. Entretanto, o movimento de uma única junta é influenciado por vários músculos, os quais são capazes de agir em direções opostas. A disposição desses vários músculos agindo aos pares em direções opostas, como por exemplo bíceps e tríceps, permite que os músculos possam ser atuados de modo a facilmente modificar a pose de equilíbrio da estrutura, dependendo da tarefa de locomoção. Assim, embora todos os músculos estejam sendo atuados, desde que essa atuação seja mantida constante, implicando na tentativa de manter o corpo em uma pose de equilíbrio fixa, a estrutura inteira pode ainda ser vista como uma estrutura passiva [Liu et al. 2005]. Novacheck [1998] alimenta essa ideia ao sugerir que os tendões é que, na verdade, fazem o papel das molas, e que os músculos funcionam apenas como os tensores dessas molas. Tendões são, de fato, excelentes molas biológicas, capazes de retornar aproximadamente 95% da energia armazenada. Os tendões de aquiles, localizados nos tornozelos, podem ser citados como exemplo.

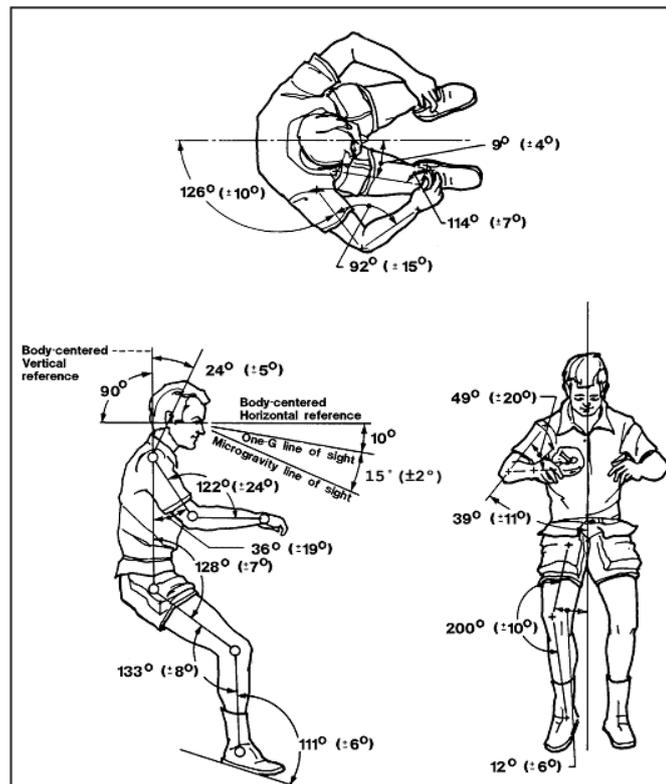


Figura 4.3: Postura neutra humana. Os ângulos mostrados correspondem a valores médios. Valores entre parênteses são desvios padrões. Os dados mostrados foram obtidos a partir de estudos realizados na estação espacial americana Skylab, e são baseados nas medidas de doze diferentes pessoas [NASA 2012].

Portanto, uma vez convencido de que animais podem ser considerados como estruturas elásticas passivas, é importante analisar as vantagens de tal fato. Primeiramente, enquanto o material elástico constituindo as juntas precisa ser menos rígido a fim de fornecer uma maior flexibilidade ao movimento, a elasticidade existente, na medida adequada para cada junta, é eficientemente usada em benefício do movimento voluntário. Essa elasticidade nas juntas ajuda a economizar energia através da reutilização da energia potencial elástica, que é simplesmente armazenada e convertida em energia cinética. Em um movimento de corrida, esse mecanismo de troca entre energia potencial elástica e energia cinética conserva em torno de 20-30% da energia que teria que ser integralmente fornecida pelos músculos [Liu et al. 2005, Alexander 1988]. Note que algumas juntas, como por exemplo os tornozelos, possuem mais elasticidade do que outras, apresentando assim uma maior contribuição passiva. Além da economia de energia, as propriedades elásticas e amortecedoras dos elementos passivos da estrutura ainda contribuem para aumentar a estabilidade de seus movimentos, e para conseqüentemente simplificar o controle.

Para aproveitar as vantagens da reutilização de energia potencial elástica, o efeito elástico

passivo da estrutura do personagem é explicitamente simulado através de molas e amortecedores lineares posicionados em suas juntas. Controladores PD *passivos* (Subseção 2.2.4) são usados para calcular os torques passivos, $\boldsymbol{\tau}_p$, a partir de uma pose de relaxamento e de um conjunto de rigidezes passivas escolhidas, exatamente as mesmas usadas para calcular os modos de vibração do personagem, como discutido na Subseção 4.2.2. Esses torques passivos devem ser aplicados gratuitamente no personagem e são calculados de acordo com a Equação 2.1:

$$\boldsymbol{\tau}_p = \mathbf{k}_p(\boldsymbol{\theta}_{relax} - \boldsymbol{\theta}) - \mathbf{k}_d(\dot{\boldsymbol{\theta}}), \quad (4.2)$$

onde $\boldsymbol{\tau}_p$ corresponde ao vetor de torques passivos a serem aplicados nas juntas, $\boldsymbol{\theta}$ e $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ representam respectivamente a pose e a velocidade atual do personagem, $\boldsymbol{\theta}_{relax}$ representa a pose de relaxamento do personagem a ser atingida pela ação passiva das molas amortecidas, e \mathbf{k}_p e \mathbf{k}_d representam respectivamente as rigidezes das molas e as viscosidades dos amortecedores. Note que tanto a pose neutra quanto as rigidezes passivas são parâmetros definidos pelo animador, e a escolha desses parâmetros influencia o movimento resultante. Por questão de simplicidade, todos os testes realizados neste trabalho usam $\mathbf{k}_d = 0.1 \mathbf{k}_p$. Além disso, como discutido na Subseção 2.3.5, que mostra como juntas esféricas podem ser controladas por controladores PD, a Equação 4.2 corresponde apenas a uma versão intuitiva do controle. Assim, a implementação detalhada desses controladores PD pode ser realizada de acordo com a Equação 2.9.

Resumidamente, em cada passo da simulação física, o controle de locomoção funciona da seguinte maneira: os torques passivos, $\boldsymbol{\tau}_p$, calculados através dos controladores PD, e os torques ativos, $\boldsymbol{\tau}$, gerenciados pela máquina de estados de locomoção (Subseção 4.2.2), são simplesmente somados e aplicados em cada junta do personagem. Entretanto, já que os torques passivos são aplicados no personagem sem qualquer gasto de energia, simplesmente convertendo energia potencial elástica armazenada em energia cinética, eles não devem ser considerados no cálculo da energia gasta pelo personagem, a qual consiste apenas dos torques ativos.

4.3 Construção do Esboço da Locomoção

Como discutido na Subseção 4.2.1, definir o controlador consiste essencialmente em definir um vetor de torques $\boldsymbol{\tau}$ para cada fase de locomoção, os quais devem ser internamente aplicados na estrutura do personagem, como um todo, através de atuadores posicionados em suas juntas. Entretanto, o espaço vetorial completo de $\boldsymbol{\tau}$, formado por todas as combinações de torques possíveis de serem aplicados, é muito extenso e certamente inclui muitas amostras

que são inúteis na geração de locomoção eficiente. Assim, uma possibilidade bastante vantajosa é reduzir de maneira automática esse espaço vetorial, eliminando antecipadamente as combinações de torques inúteis. Note que é importante que essa redução do espaço de controle restrinja a locomoção de maneira responsável, ou seja, de modo que o espaço reduzido ainda contenha todas as combinações de torques potencialmente úteis à locomoção específica desejada.

A possibilidade de redução do espaço de controle está diretamente ligada à sua representação e, neste trabalho, o espaço de controle é representado através dos modos naturais de vibração do personagem, possibilitando a redução adequada do controle de maneira fácil e direta. No caso, essa redução consiste em excluir (i.e. manter zeradas) as coordenadas de ψ (Equação 4.1) correspondentes aos modos de vibração identificados como inapropriados a uma determinada tarefa de locomoção. Note que a exclusão simples e direta de tais coordenadas é possível devido às propriedades ortogonais (Subseção 2.4.2) dos modos de vibração, que implicam no controle independente de cada um deles. Além disso, ela é também adequada e coerente devido ao relacionamento natural entre os modos de vibração e as propriedades elásticas passivas da estrutura, que implica em economia de energia. Em contraste, quando o espaço de controle é representado na base canônica, excluir diretamente as coordenadas individuais das juntas em τ implica em um controle claramente deficiente, em que os impulsos gerados não envolvem o corpo como um todo, diferente do que se percebe em locomoção animal eficiente. Entretanto, embora qualquer modo de vibração inadequado possa ser facilmente excluído, a tarefa de escolher *quais* modos de vibração são apropriados ainda precisa ser discutida com mais cuidado.

Uma propriedade importante e bastante útil dos modos de vibração é que suas respectivas frequências naturais funcionam como indicadores de suas relações de custo e benefício energéticos. Ou seja, para uma quantidade fixa de energia excitando um único modo de vibração específico, quanto menor for sua frequência natural, maior será sua amplitude de deslocamento [Pentland e Williams 1989, Pentland 1990]. Isso significa que, ao excitar uma estrutura de acordo com seus modos de vibração de mais baixa frequência, movimentos mais amplos são obtidos com um menor gasto de energia. Do ponto de vista contrário, pode-se perceber que modos de vibração associados a altas frequências geralmente possuem pouco efeito na estrutura. Essa relação pode ser percebida na equação da energia potencial elástica, $U_e = \frac{1}{2}kx^2$. Para melhor demonstrar isso, assumamos, por exemplo, que, em um ambiente sem gravidade, uma estrutura elástica sem amortecimento se encontra em repouso. Considerando que essa estrutura é excitada em apenas um dos seus modos naturais de vibração ϕ_i , com uma determinada quantidade fixa de energia E , toda essa energia inserida será armazenada na forma

de energia potencial elástica, $U_e = E$, no momento em que a estrutura atingir a amplitude de deslocamento A_i :

$$E = U_e = \frac{1}{2}k_i A_i^2. \quad (4.3)$$

Portanto, como a rigidez generalizada k_i é diretamente proporcional ao quadrado da frequência angular natural ω_i ($\omega_i^2 = k_i/m_i$), para cada modo de vibração ϕ_i sendo excitado individualmente por uma energia E (custo) fixa, quanto menor a sua frequência ω_i (menor k_i), maior será a sua amplitude de deslocamento A_i (benefício), correspondendo a um melhor custo-benefício na geração de locomoção.

De acordo com essa propriedade, para gerar locomoções eficientes (e.g. corrida), uma simples heurística inicial para escolher automaticamente os modos de vibração se baseia apenas nas suas frequências naturais correspondentes. Ou seja, os n primeiros modos de vibração, ordenados de acordo com suas frequências, são essencialmente os mais apropriados para serem considerados, já que são os mais eficientes energeticamente. De fato, a maioria dos modos, de mais altas frequências, podem ser facilmente descartados em todos os testes definidos na base modal. Entretanto, o gasto de energia não é o único critério envolvido em locomoção animal. No caso em que se deseja simular um personagem bípede realizando um movimento de corrida, por exemplo, um importante aspecto a se considerar consiste em saber como colisões entre o pé que não é o de apoio e o chão podem ser evitadas de maneira natural, a fim de impedir uma topada. Assim, ao mesmo tempo que um menor gasto de energia é buscado, essa restrição deve também ser obedecida. Portanto, a escolha de quais modos de vibração devem ser considerados não depende exclusivamente de quão energeticamente eficiente eles são, mas também de outros aspectos relacionados tanto à natureza do ambiente físico simulado quanto ao próprio estilo de locomoção desejada. Isso significa que, mesmo em locomoção eficiente, algum modo de vibração de mais alta frequência pode também estar envolvido, e a influência dos modos de vibração não necessariamente deve obedecer estritamente à ordem de suas frequências naturais. Note que a principal dificuldade relacionada à escolha automática dos modos de vibração, assim como à geração automática de locomoção de um modo geral, é devido ao fato de que a maioria desses aspectos envolvidos, geralmente abstratos, são na verdade mais intuitivos para o animador do que propriamente fáceis de serem definidos automaticamente.

Devido à natureza intuitiva da especificação de uma locomoção, ao invés de propor um processo totalmente automático, a abordagem proposta neste trabalho permite que o animador participe diretamente da tarefa de especificação da locomoção desejada. Portanto, mais do que apenas escolher quais modos de vibração devem ser considerados na geração da locomoção, o animador também pode construir um esboço da locomoção desejada, através da combinação

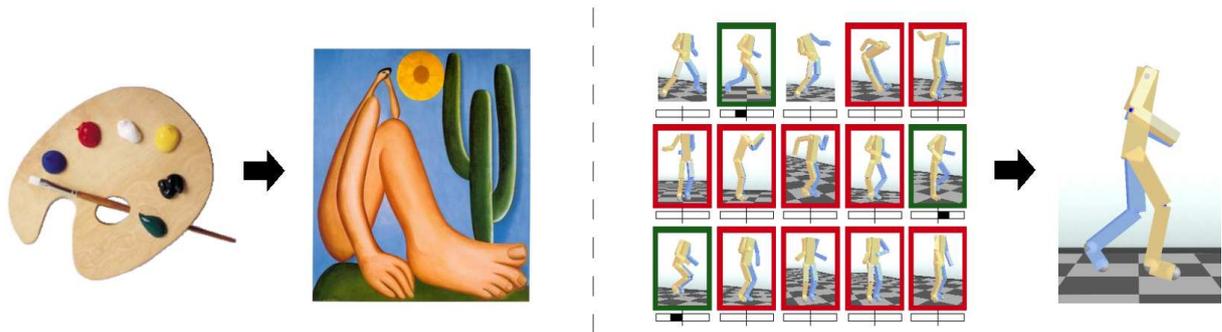


Figura 4.4: Analogia entre uma aquarela de pintura e a interface proposta para a construção do esboço da locomoção. Os modos naturais de vibração do personagem especificado pelo animador são disponibilizados na forma de uma paleta de movimentos básicos, apropriados à geração de locomoção eficiente para esse personagem específico. Dados da obra artística mostrada como ilustração: *Abaporu*, Tarsila do Amaral, 1928, óleo sobre tela.

linear desses modos de vibração. A construção desse esboço é realizada através de uma interface amigável, em que o animador explicitamente escolhe os modos de vibração mais apropriados e o quanto cada um deles deve influenciar a locomoção desejada. O animador realiza essas escolhas a partir da simples visualização das animações individuais de cada um desses modos de vibração, diretamente mostradas na tela do computador. Além de mostrar essas animações individuais, a interface também permite que o animador combine esses modos de vibração e facilmente visualize o efeito dessa combinação em tempo real. A Figura 4.4 faz uma analogia entre a interface proposta e uma aquarela de pintura. Assim como uma aquarela de pintura é usada como uma maneira de facilmente disponibilizar nas mãos do pintor uma paleta de cores individuais básicas, a interface visual proposta pode ser equivalentemente pensada como uma forma de disponibilizar “nas mãos” do animador uma paleta de movimentos individuais básicos. Também, da mesma maneira que uma aquarela de pintura já disponibiliza as cores adequadas a uma pintura específica, a interface proposta já disponibiliza os movimentos adequados à locomoção eficiente de um personagem específico, os quais são convenientemente ordenados por eficiência energética. Além disso, enquanto as cores são selecionadas e combinadas no processo de pintura de um quadro, os modos de vibração também devem ser selecionados e combinados a fim de gerar um esboço da locomoção desejada.

Permitir que o próprio animador construa um esboço da locomoção desejada, além de motivado pela natureza intuitiva da especificação de uma locomoção, é motivado também por outros fatores. O principal benefício da possibilidade de intervenção do animador é disponibilizar uma forma de controle em alto nível sobre a locomoção desejada gerada. Embora, em alguns casos, seja interessante automatizar o processo por completo, a especificação totalmente automática dos modos de vibração implicaria na perda desse controle. Note que,

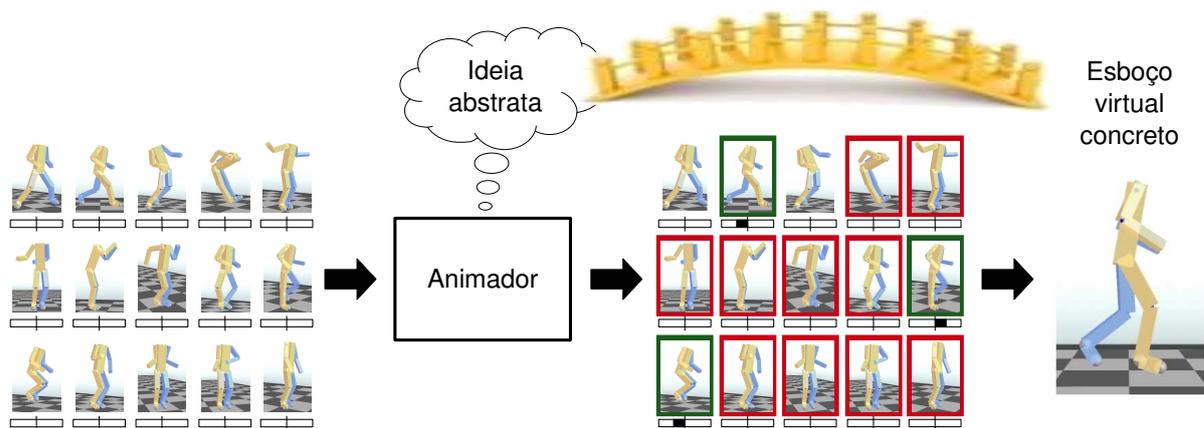


Figura 4.5: Intervenção do animador na construção do esboço da locomoção desejada. A interface proposta funciona como uma ponte entre a ideia abstrata da locomoção desejada, na mente do animador, e a representação virtual dessa ideia, definida através do esboço gerado. Ao mostrar as animações dos modos naturais de vibração do personagem, essa interface disponibiliza portanto uma maneira intuitiva de o animador traduzir sua ideia de locomoção desejada, discretizando-a na forma de uma combinação linear dessas vibrações.

ao disponibilizar visualmente os modos naturais de vibração do personagem para o animador, ele pode mais intuitivamente associar algumas dessas vibrações observadas a uma locomoção específica desejada, possivelmente ainda abstrata em sua mente. Além disso, a avaliação visual dessas vibrações não é exaustiva, pois o animador precisa analisar apenas um pequeno número de modos de vibração de mais baixa frequência. Portanto, enquanto heurísticas detalhadas deveriam ser adequadamente definidas para que fosse possível automatizar totalmente o processo de especificação dos modos de vibração, a simples interferência direta do animador nesse processo pode também ser interpretada como um atalho fácil para essa especificação, em que a interface funciona como uma ponte direta entre a ideia abstrata da locomoção desejada e o esboço dessa locomoção, resultante da especificação concreta dos modos de vibração (Figura 4.5). Em outras palavras, embora a especificação da locomoção desejada possa ser muito abstrata ou possa exigir muitos detalhes para ser descrita automaticamente, ao analisar a paleta ordenada dos modos de vibração do personagem simulado, naturalmente adequados à sua locomoção eficiente, o animador é capaz de traduzir sua ideia de locomoção desejada de maneira mais fácil e mais intuitiva. Por exemplo, ao visualizar as vibrações, o objetivo de evitar uma topada é facilmente relacionado a um modo de vibração específico, intuitivamente identificado por ser coerente com a ideia abstrata desse objetivo.

Mais especificamente, a construção do esboço da locomoção consiste em simplesmente definir o vetor de torques ativos ψ (definidos na base modal), tanto no estado do ar quanto no estado do chão, com a ajuda de uma interface apropriada (ilustrada na Figura 4.1). Para

isso, primeiramente um controlador padrão inicial é definido com $\psi^a = \psi^c = 0$. Em seguida, para que as coordenadas de ψ^a e ψ^c possam ser modificadas de maneira interativa, permitindo facilmente visualizar o efeito da combinação dos respectivos modos de vibração, o personagem é inicialmente simulado sem gravidade. Note que, como apenas poucos modos de vibração são geralmente necessários para construir um esboço da locomoção desejada, apenas poucas coordenadas em ψ^a e ψ^c precisam ser atualizadas nesse controlador inicial. Tais modos de vibração são chamados de *modos prioritários*, e são marcados de *verde* na interface. Entretanto, embora simular o personagem sem gravidade seja adequado para o propósito de visualizar o esboço da locomoção desejada, uma *otimização* deve ser realizada sobre os parâmetros desse controlador inicial para que o personagem seja capaz de executar essa locomoção de maneira cíclica, quando simulado dinamicamente na presença da gravidade e conseqüentemente influenciado pelas forças de contato com o chão (Seção 4.4).

Além do benefício do uso dos modos de vibração como uma maneira de facilitar a especificação da locomoção desejada, a qual é discretizada na forma de uma combinação linear dessas vibrações (esboço), outro importante benefício de se representar o espaço de controle através da base modal, como já discutido, é facilitar também a redução adequada do controle. Conseqüentemente, a otimização do controlador pode ser realizada sobre um espaço de busca convenientemente reduzido. Portanto, depois que o esboço da locomoção é gerado através da combinação dos modos prioritários, o animador também pode excluir quaisquer coordenadas de ψ^a e ψ^c , correspondendo a desconsiderá-las como parâmetros da otimização e mantê-las sempre iguais a zero. Os modos de vibração correspondentes a essas coordenadas excluídas são chamados de *modos excluídos*, e são marcados de *vermelho* na interface. Todos os outros modos de vibração, cujas respectivas coordenadas serão otimizadas, são chamados de *modos permitidos*, e correspondem a todos os modos considerados potencialmente úteis à locomoção desejada. Note que os modos prioritários também fazem parte do conjunto de modos permitidos. Além de facilitar o trabalho da otimização devido à redução do controle, a exclusão desses modos também permite que o animador possa impedir o uso de alguns movimentos que não sejam desejados. Note também que mesmo os modos de mais baixa frequência podem ser excluídos. Isso pode ser interpretado como uma ferramenta direta e intuitiva de controle, que pode ser usada para facilmente restringir a animação final. Porém, um determinado modo de vibração do ar, por exemplo, pode ser excluído e ainda assim aparentemente influenciar a animação final. Isso pode acontecer caso algum modo de vibração do chão semelhante continue sendo permitido. Embora isso possa ser desejado, de qualquer maneira, as duas fases de locomoção devem ser analisadas.

Na prática, a maioria dos modos de alta frequência são facilmente excluídos, e portanto

os modos permitidos consistem apenas dos modos prioritários mais alguns modos adicionais potencialmente recrutáveis durante a otimização para tratar o equilíbrio do personagem, permitindo que ele seja capaz de alcançar o mesmo estado inicial no final do ciclo. Além disso, para que a animação resultante da otimização mantenha as mesmas características apresentadas no esboço gerado pelo animador, os intervalos permitidos na otimização para as coordenadas de ψ^a e ψ^c , correspondentes aos modos prioritários, são redefinidos de modo que seus valores não possam ter seus sinais trocados, nem possam ser menores em módulo do que os valores inicialmente definidos no esboço.

4.4 Otimização

Embora seja razoavelmente fácil atribuir manualmente valores adequados aos parâmetros do controlador quando o personagem é simulado sem gravidade, apenas para o propósito de visualizar o esboço da locomoção desejada; a presença da gravidade torna o controle da locomoção bastante instável, principalmente porque o controle passa a depender também das forças de reação do chão. Note que enquanto não há necessidade de se controlar os graus de liberdade globais do personagem para a simples visualização do esboço, a influência da gravidade exige esse controle global, o qual é difícil porque esses graus de liberdade globais devem ser controlados indiretamente através da interação física da estrutura do personagem com o chão, já que não existem atuadores diretamente associados a eles.

Portanto, enquanto, na ausência da gravidade, o controlador inicial pode ser manualmente obtido e modificado pelo animador de maneira interativa, uma otimização desse controlador inicial, envolvendo um grande número de parâmetros, é inevitavelmente exigida para que a locomoção esboçada possa ser apropriadamente realizada sob a influência da gravidade.

4.4.1 Problema de Otimização

Antes de ser resolvido, o problema de otimização exigido deve ser descrito em detalhes. Para isso, tanto a função objetivo quanto a lista dos parâmetros a serem otimizados devem ser formalmente especificadas.

Função Objetivo

Para gerar locomoção natural, existe sempre envolvido um custo-benefício entre a energia gasta e o desempenho obtido, o qual geralmente consiste em quão rápido o personagem se desloca.

Portanto, já que a locomoção gerada deve ser ao mesmo tempo rápida e energeticamente eficiente, a função objetivo deve ser definida com o intuito de adequadamente administrar esses dois objetivos conflitantes, para que a otimização encontre soluções que possuam um equilíbrio satisfatório entre eles. Cada um desses dois objetivos principais são definidos individualmente, como se segue.

Velocidade da locomoção. Neste trabalho, a velocidade da locomoção é medida pela velocidade média do centro de massa do personagem, em uma determinada direção específica. Visto que o problema de otimização é posteriormente formulado como uma minimização, ela é premiada de acordo com a seguinte equação:

$$E_{vel_loc} = 1/v_x^2, \quad (4.4)$$

onde v_x é a componente horizontal de \mathbf{v} na direção do eixo x global; e \mathbf{v} é a velocidade média do centro de massa, a qual é dada por:

$$\mathbf{v} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n {}^t\dot{\mathbf{C}}, \quad (4.5)$$

onde ${}^t\dot{\mathbf{C}}$ é a velocidade do centro de massa no instante t ; e n é o número de passos de tempo executados pela simulação, o qual é obtido dividindo o tempo total de avaliação da simulação pelo tamanho do passo de tempo usado.

Energia gasta. Animais naturalmente tendem a utilizar o mínimo de energia possível ao se locomoverem. Assim, o gasto de energia é um importante critério a se considerar na simulação física de locomoções naturais. Note porém que, enquanto a velocidade da locomoção é incentivada, o gasto de energia deve ser penalizado. Neste trabalho, a energia gasta é medida pela média da soma dos quadrados dos torques ativos aplicados em cada instante, durante o tempo total de avaliação da simulação, de acordo com a seguinte equação:

$$E_{energia} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \sum_j {}^t\tau_j^2, \quad (4.6)$$

onde ${}^t\tau_j^2$ é o quadrado do torque ativo aplicado na junta j , no instante t . Note que, como os torques passivos não estão incluídos nessa soma, penalizá-la encoraja a sincronização dos torques ativos com a resposta passiva. Isso acontece porque, como os torques passivos são obtidos de graça, a melhor maneira de minimizar os torques ativos é sincronizá-los com os passivos, a fim de usar ao máximo essa resposta passiva gratuita.

Parâmetros

O espaço de busca usado para otimizar o controlador de locomoção inicial consiste da seguinte lista de parâmetros:

- q_0 e \dot{q}_0 , correspondentes ao estado inicial (posição, velocidade) do personagem no início do ciclo da locomoção;
- ψ^a e ψ^c , correspondentes aos torques ativos em coordenadas modais, em cada fase da locomoção (apenas as coordenadas correspondentes aos modos permitidos);
- δ^a e δ^c , correspondentes às durações dos impulsos em cada fase;
- T , correspondente ao período total do ciclo;
- α , correspondente à razão entre a duração do estado do ar e o período total do ciclo.

Para personagens bípedes, apenas controladores de locomoção simétricos foram testados neste trabalho. Nesses casos, apenas os parâmetros correspondentes a um dos pés são otimizados, e os parâmetros correspondentes ao outro pé são simplesmente obtidos por simetria. Entretanto, para personagens bípedes não simétricos, seria necessário incluir alguns parâmetros adicionais na otimização, a fim de considerar suas assimetrias.

Note que informações de posição e velocidade são diretamente consideradas como parâmetros da otimização, mas apenas para definir o estado inicial do personagem. A partir do seu estado inicial, seus próximos estados são obtidos diretamente a partir da simulação dinâmica. Consequentemente, diferente de abordagens baseadas em *spacetime constraints*, tais como [Liu et al. 2005, Wampler e Popović 2009], que realizam otimizações sobre um espaço de busca contendo amostras de trajetórias fisicamente incorretas, gerar a locomoção diretamente a partir de uma simulação dinâmica permite definir um espaço de busca que já é convenientemente constituído apenas por trajetórias fisicamente corretas.

Formulação do Problema de Otimização

O problema de otimização é formulado como um problema de minimização sobre o conjunto dos parâmetros de controle descritos, aqui denotado por um vetor Ω . Note que minimizar o simples produto das equações correspondentes aos dois objetivos principais discutidos pode ser uma alternativa apropriada para administrar o custo-benefício entre a energia gasta e a velocidade da locomoção. Além disso, para que a locomoção possa ser simulada

continuamente, ela deve ser definida de maneira cíclica. Assim, a otimização deve ser restrita de modo que o estado inicial do personagem, \mathbf{q}_0 e $\dot{\mathbf{q}}_0$, seja exatamente atingido no final do ciclo definido pelo controlador, em que o estado do personagem é representado por \mathbf{q}_T e $\dot{\mathbf{q}}_T$. É importante perceber, contudo, que, para que a locomoção seja possível, a posição do corpo raiz referente ao eixo x global não deve ser restrita. Portanto, apenas essa coordenada do estado do personagem não é considerada nas restrições cíclicas definidas. Assim, considerando que esse detalhe é tratado, o problema de otimização pode ser formalizado simplesmente como:

$$\begin{aligned} \min_{\Omega} \quad & E_{vel_loc} \quad E_{energia} \\ \text{sujeito a} \quad & \mathbf{q}_0 = \mathbf{q}_T \\ & \dot{\mathbf{q}}_0 = \dot{\mathbf{q}}_T \end{aligned} .$$

Solução do Problema de Otimização

Embora o problema de otimização possa ser formalizado de maneira simplificada, a solução desse problema não é igualmente simples. Para resolver tal problema de otimização com restrições, este trabalho propõe um método que combina duas técnicas de otimização: *Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy* (Subseção 4.4.2) e *Method of Multipliers* (Subseção 4.4.3).

Na prática, para empregar esse método, a função objetivo não é definida simplesmente como em sua formalização. A função objetivo portanto consiste da combinação ponderada de vários termos, os quais são computados durante a execução da simulação dinâmica, possivelmente considerando informações de cada passo de tempo. Esses termos podem ser classificados em três categorias: o *objetivo principal*, as *restrições rigorosas* e as *restrições fáceis*. Resumidamente, enquanto as restrições rigorosas são incluídas para garantir que as restrições propriamente ditas (i.e. aquelas às quais a otimização está sujeita, segundo sua formalização) sejam atingidas; as restrições fáceis são definidas com o intuito de “eliminar” regiões do espaço de busca muito mal comportadas de acordo com o objetivo principal. No caso, enquanto as restrições rigorosas são todas definidas por restrições de igualdade, as restrições fáceis são todas baseadas em inequações.

Neste trabalho, as únicas restrições rigorosas usadas são as restrições definidas a fim de garantir o comportamento cíclico da locomoção, em que o estado inicial do personagem deve ser exatamente atingido no final do ciclo. Por esse motivo, essas restrições também podem ser chamadas de *restrições cíclicas*. Note que garantir que a otimização produza um ciclo bem definido é essencial para que a simulação dinâmica possa posteriormente reproduzir a

locomoção de maneira contínua. As restrições fáceis usadas, por sua vez, precisam ser definidas mais detalhadamente, e são melhor discutidas na Subseção 4.4.4.

Uma característica importante a ser mencionada, em relação ao problema de otimização aqui formulado, é que, como a locomoção é gerada a partir da execução de uma simulação dinâmica, a função objetivo não é uma função explícita dos parâmetros da otimização. Isso implica que fornecer informações de gradiente seria complicado. Portanto, é conveniente que o método de otimização proposto seja capaz de adequadamente amostrar o espaço de busca, sem informações explícitas de gradiente.

Além disso, para avaliar cada amostra Ω individual, uma nova simulação dinâmica é exigida. Ou seja, para cada vetor Ω amostrado, seus valores são atribuídos aos parâmetros do controlador e, a partir do estado inicial do personagem, uma simulação dinâmica deve ser executada. O tempo de simulação exigido, chamado de *tempo de avaliação*, deve ser suficiente para que uma avaliação adequada da amostra Ω seja realizada, de acordo com a função objetivo definida.

Note que, devido à restrição cíclica definida para a otimização, um único ciclo do controlador precisa ser avaliado. Assim, cada simulação dinâmica é somente executada durante exatamente T segundos. Contudo, para personagens bípedes simétricos, apenas meio ciclo precisa ser otimizado, já que a outra metade do ciclo é simplesmente obtida por simetria. Isso implica que o tempo de avaliação pode ser reduzido de modo que cada simulação dinâmica apenas precise ser executada durante $T/2$ segundos. Nesse caso, o estado do personagem obtido na metade do ciclo, $\mathbf{q}_{T/2}$ e $\dot{\mathbf{q}}_{T/2}$, deve ser primeiramente refletido antes de ser comparado com o seu estado inicial.

4.4.2 *Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy*

O método proposto para solucionar o problema de otimização descrito é principalmente baseado na técnica de otimização *Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy* (CMA-ES) [Hansen 2006], também conhecida simplesmente como *Covariance Matrix Adaptation* (CMA). CMA é usada por ser apropriada a problemas de otimização não lineares e irregulares, envolvendo um grande número de parâmetros, como é o caso do problema formulado neste trabalho. Além disso, CMA não usa nem aproxima informações de gradiente, e nem mesmo supõe ou exige que gradientes existam, o que implica que CMA é também apropriada a problemas descontínuos. Note que a elaboração da função objetivo proposta neste trabalho está sujeita tanto a apresentar descontinuidades quanto a possuir muitos mínimos locais. Assim, CMA se mostra mais uma vez como uma boa escolha. Essas características têm levado a um número

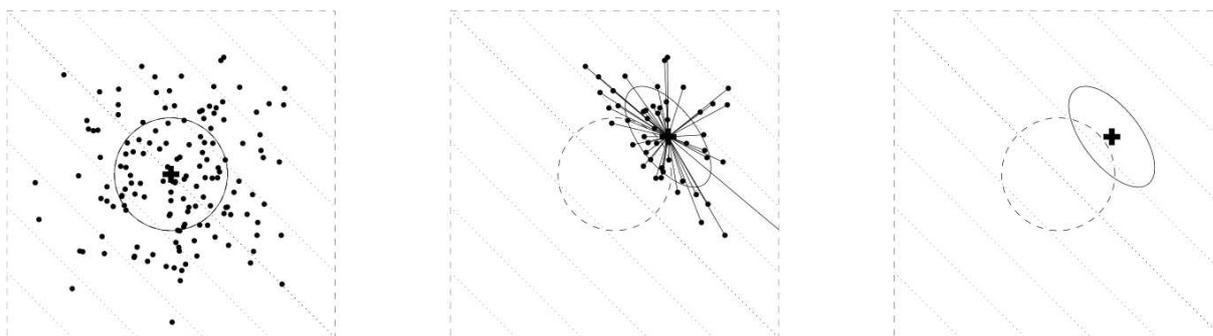


Figura 4.6: Processo iterativo da atualização da distribuição Gaussiana [CMA-ES 2012]. Em cada iteração, primeiramente uma amostragem randômica é realizada, baseada na distribuição Gaussiana atual (esquerda). Em seguida, as melhores amostras, avaliadas de acordo com a função objetivo, são escolhidas e usadas para estimar uma nova distribuição Gaussiana (meio). A nova Gaussiana torna-se então a Gaussiana atual, a ser utilizada na próxima iteração (direita). As linhas pontilhadas indicam que a função objetivo ilustrada diminui linearmente em direção ao canto superior direito. A média da Gaussiana é indicada por uma cruz.

razoável de aplicações dessa técnica de otimização em animação de personagens virtuais, como se pode ver em algumas publicações recentes [Wampler e Popović 2009, Wang et al. 2009].

CMA é uma abordagem de otimização de segunda ordem, na qual uma distribuição Gaussiana multivariável, definida sobre os parâmetros da otimização, é continuamente estimada dentro de um processo iterativo. Essa distribuição Gaussiana é definida por uma média, correspondendo ao seu centro, e uma matriz de covariância, correspondendo à sua orientação e à sua escala. Mais especificamente, a escala da Gaussiana depende de um vetor σ , que é definido para cada parâmetro da otimização. A média é inicializada com os próprios valores iniciais definidos para os parâmetros da otimização, enquanto que a matriz de covariância é inicializada com uma matriz diagonal, o que significa que a Gaussiana é definida inicialmente alinhada com os eixos dos parâmetros. O vetor σ , por sua vez, é definido inicialmente com um mesmo valor, escolhido pelo usuário, para todos os parâmetros.

Como ilustrado na Figura 4.6, em cada iteração, uma nova população composta por Λ indivíduos é gerada através de uma amostragem randômica, baseada na distribuição Gaussiana atual. Em seguida, cada uma dessas Λ novas amostras é avaliada de acordo com a função objetivo definida, e a Gaussiana (i.e. média, matriz de covariância e σ) é então atualizada a partir das μ amostras melhor avaliadas. À medida que novas populações são geradas e avaliadas, a Gaussiana tende a encolher e a se mover em direção a uma região do espaço de busca cuja função objetivo possui valores mais baixos, convergindo assim para uma solução desejada. Note que a avaliação das amostras geradas, usada para atualizar a distribuição Gaussiana, pode ser interpretada como uma estimativa implícita das informações de gradiente.

Na prática, note que CMA automaticamente escolhe os valores de Λ e de μ , baseado no número de parâmetros da otimização. Note também que CMA assume que todos os parâmetros são previamente normalizados, já que seus valores são mantidos estritamente entre 0 e 1.

Para os propósitos deste trabalho, a principal desvantagem é que CMA não permite que restrições sejam explicitamente definidas para a otimização e, conseqüentemente, é incapaz de tratar restrições tais como as restrições cíclicas desejadas. Portanto, a fim de superar essa desvantagem e permitir que as restrições rigorosas possam ser obedecidas, o método de otimização proposto combina CMA e uma outra técnica de otimização, chamada *Method of Multipliers*. Em contraste, enquanto Wang et al. [2009] não tratam essas restrições ditas rigorosas, Wampler e Popović [2009] também permitem que tais restrições possam ser consideradas, através do uso de uma abordagem de otimização híbrida, mas combinando CMA e *spacetime constraints*.

4.4.3 Method of Multipliers

O *Method of Multipliers* (MoM) [Miele et al. 1972], também conhecido como *Augmented Lagrangian Method*, é usado para resolver problemas de otimização com restrições. Pertencente a uma classe de métodos que utilizam funções de penalidade para tratar as restrições (*penalty function methods*), o MoM permite que um problema de otimização com restrições possa ser resolvido como uma sequência de problemas de otimização sem restrições.

Considere o problema de minimizar a função objetivo $f(\mathbf{x})$, sujeito à restrição $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) = 0$,

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{x}) \\ \text{sujeito a } \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) = 0, \end{aligned}$$

onde $f(\mathbf{x})$ é um escalar, \mathbf{x} é um vetor de dimensão n , e $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x})$ é um vetor de dimensão q ($q < n$). Numa possível tentativa de resolver tal problema restrito, uma simples opção seria penalizar o quão $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x})$ é diferente de zero, adicionando à função objetivo $f(\mathbf{x})$ um termo $f_{\varphi}(\mathbf{x})$ equivalente a essa penalização, e resolvê-lo como um problema sem restrições. $f_{\varphi}(\mathbf{x})$ é chamada *função de penalidade* e pode ser definida de diferentes maneiras. A função de penalidade clássica, por exemplo, é obtida definindo $f_{\varphi}(\mathbf{x})$ como uma função quadrática sobre a restrição, resultando na seguinte nova função objetivo: $U(\mathbf{x}, k) = f(\mathbf{x}) + k\boldsymbol{\varphi}^T(\mathbf{x})\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x})$, onde $k > 0$ é conhecida como a *constante de penalidade*.

O principal problema com essa abordagem é o conflito que existe entre os termos $f_{\varphi}(\mathbf{x})$ e $f(\mathbf{x})$, e a conseqüente dificuldade em definir apropriadamente seus respectivos pesos. Enquanto

é necessário que $f_\varphi(\mathbf{x})$ possua uma altíssima influência para que a restrição $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x})$ seja respeitada, isso implicaria em desprezar a influência da função objetivo principal $f(\mathbf{x})$. Assim, a ideia para solucionar esse conflito é inicialmente priorizar $f(\mathbf{x})$ e gradualmente atualizar os pesos dos termos com o intuito de ir adequadamente aumentando a influência de $f_\varphi(\mathbf{x})$. O problema de minimização com restrições é portanto substituído por uma sequência de problemas de minimização sem restrições, possuindo, no limite, uma solução mínima \mathbf{x} coincidente com a solução do problema de minimização restrito original.

Entretanto, a fim de contornar as dificuldades numéricas associadas aos valores extremamente altos de k , exigidos na convergência, quando definindo $f_\varphi(\mathbf{x})$ apenas como em $U(\mathbf{x}, k)$, o MoM considera um termo adicional na definição da sua função de penalidade, a chamada *função de penalidade aumentada*. O MoM considera portanto a seguinte nova função objetivo:

$$W(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, k) = f(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\lambda}^T \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) + k \boldsymbol{\varphi}^T(\mathbf{x}) \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}), \quad (4.7)$$

na qual o termo adicional é linear em relação à restrição $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x})$. Aqui, o vetor $\boldsymbol{\lambda}$, de dimensão q , corresponde a uma estimativa dos chamados *multiplicadores de Lagrange*, cuja precisão tende a melhorar a cada otimização. Em cada otimização, $W(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, k)$ é minimizado em relação a \mathbf{x} , para um dado $\boldsymbol{\lambda}$ e um dado k fixos. A solução resultante da otimização atual é então usada como a amostra inicial para a otimização seguinte. Note que, ao invés de aumentar o valor de k como quando se usa $U(\mathbf{x}, k)$, o MoM mantém k fixo e a restrição $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x})$ tende a ser gradualmente satisfeita através da atualização de $\boldsymbol{\lambda}$. De acordo com Miele et al. [1972], $\boldsymbol{\lambda}$ deve ser automaticamente atualizado por $\boldsymbol{\lambda} + 2k \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x})$ para cada otimização seguinte. Assim, devido a esse termo adicional linear, o MoM converge mesmo definindo valores moderadamente baixos para k .

Neste trabalho, $f(\mathbf{x})$ consiste do objetivo principal e das restrições fáceis, enquanto que $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x})$ é definido pelas restrições rigorosas (cíclicas):

$$f(\mathbf{x}) = w_p E_{vel_loc} E_{energia} + \sum_r w_r E_r, \quad (4.8)$$

$$\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \mathbf{q}_T \\ \mathbf{q}'_T \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \mathbf{q}_0 \\ \mathbf{q}'_0 \end{pmatrix}, \quad (4.9)$$

onde w_p corresponde ao peso associado ao objetivo principal; e E_r e w_r correspondem respectivamente ao termo referente a cada uma das restrições fáceis, a serem definidas posteriormente na Subseção 4.4.4, e ao seu respectivo peso associado. Note que $w_p = 10^{-5}$ e $w_r > 10^{10} w_p$ foram usados em todos os testes realizados neste trabalho. Vale lembrar que a posição do corpo raiz referente ao eixo x global não é considerada nas restrições cíclicas que

definem $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x})$.

O algoritmo de otimização completo é realizado combinando MoM e CMA. Primeiramente, uma otimização de inicialização é realizada a partir de qualquer amostra inicial dada, possivelmente escolhida de maneira aleatória, com o intuito principal de atingir as restrições fáceis e obter uma amostra inicial razoável. Essa primeira otimização é realizada, usando CMA, com $\boldsymbol{\lambda} = 0$ e $k = 0$, o que significa que as restrições cíclicas são completamente desconsideradas inicialmente. Assim, após obtida essa primeira amostra mais razoável, o MoM é inicializado ainda com $\boldsymbol{\lambda} = 0$, mas com k igual a algum valor positivo, escolhido pelo usuário ($k = 0.1$ foi usado em todos os testes realizados neste trabalho). Mais detalhes em relação à escolha de k podem ser encontrados em [Miele et al. 1972]. CMA é então usada para resolver cada otimização sem restrições individual. O critério de parada usado em cada otimização individual consiste em atingir $stopTolX = 10^{-4}$ ou um número máximo de 1000 gerações permitidas. O algoritmo completo, por sua vez, é finalizado quando, no final de cada otimização individual, $|\boldsymbol{\varphi}(x)_i| < \boldsymbol{\varphi}_{tol_i}, \forall i$ correspondente a cada uma das q restrições cíclicas, ou um número máximo de 20 otimizações individuais for atingido. $\boldsymbol{\varphi}_{tol}$ é um vetor de dimensão q , definido pelo usuário. Note que um $\sigma = 0.3$ inicial é definido para a otimização de inicialização, e é atualizado por 0.7σ a cada nova otimização individual, desde que σ não fique abaixo de 0.001.

4.4.4 Restrições Fáceis

Motivado pelo trabalho de Wang et al. [2009], além das restrições rigorosas, o método de otimização proposto ainda permite definir um tipo diferente de restrição. As chamadas *restrições fáceis* são mais flexíveis e possuem esse nome pela exigência de serem facilmente atingidas na prática. Influenciando diretamente a função objetivo da otimização, elas são basicamente responsáveis por evitar regiões do espaço de busca muito mal comportadas de acordo com o objetivo principal. Ou seja, elas evitam que CMA mantenha a busca em regiões de mínimos locais indevidos, facilmente guiando a Gaussiana em direção a regiões apropriadas. Embora a especificação de tais restrições forneça ao animador uma opção adicional de restringir a locomoção gerada de maneira mais específica e detalhada, seu maior benefício é permitir que o otimizador seja capaz de encontrar soluções adequadas de locomoção mesmo a partir de amostras iniciais inapropriadas, evitando assim o problema de ter que fornecer uma amostra inicial viável.

Assim como o objetivo principal e a função de penalidade adicionada devido ao MoM, as restrições fáceis também são definidas como termos da função objetivo. Entretanto, essas restrições devem ser definidas de modo que seus respectivos termos possam ser facilmente

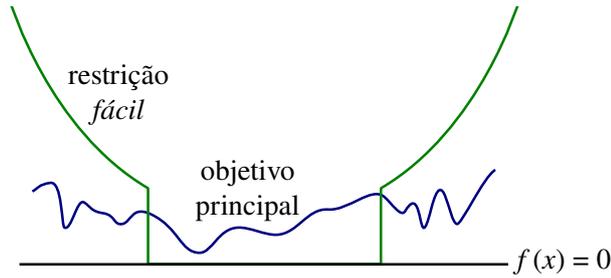


Figura 4.7: Ilustração de uma restrição fácil (verde), de apenas uma dimensão, representada através de uma função quadrática condicional bilateral. Restrições fáceis são adicionadas ao objetivo principal (azul) para ajudar o otimizador a encontrar o mínimo global.

zerados por completo. Mais especificamente, definir uma restrição fácil corresponde a determinar uma região do espaço de busca, supostamente mal comportada, em que a função objetivo é piorada com a adição de um termo específico equivalente. Por outro lado, esse termo deve ser igual a zero para qualquer amostra obtida fora dessa região, significando que tal restrição fácil está satisfeita. Intuitivamente, restrições fáceis representam declives íngremes de penalidade, posicionados sobre as regiões mal comportadas do espaço de busca, em direção às regiões apropriadas, com o intuito de melhorar o comportamento da função objetivo principal. Assim, com uma função objetivo mais bem comportada, o otimizador pode encontrar as regiões desejadas mais facilmente. A Figura 4.7 ilustra uma restrição fácil definida em uma única dimensão. Baseado no trabalho de Wang et al. [2009], as restrições fáceis são definidas através de funções quadráticas condicionais. Contudo, uma versão unilateral, Q_u , da função bilateral original, Q_b , é também definida:

$$Q_u(d, \varepsilon) = \begin{cases} (\varepsilon - d)^2 + h, & \text{se } d < \varepsilon \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (4.10)$$

onde h corresponde à altura de cada restrição fácil, ou seja, ao menor valor diferente de zero assumido pela função Q_u . Note que $Q_u(-d, -\varepsilon)$ pode ser usado, caso se deseje penalizar $d > \varepsilon$, ao invés de $d < \varepsilon$. Além disso, a função bilateral original pode ser facilmente definida a partir da definição de Q_u : $Q_b(d, \varepsilon) = Q_u(-d, -\varepsilon) + Q_u(d, -\varepsilon)$. Assim, enquanto $Q_u(d, \varepsilon)$ penaliza $d < \varepsilon$, $Q_b(d, \varepsilon)$ penaliza $|d| > \varepsilon$. Note também que, já que a altura efetiva de cada restrição fácil é igual a h multiplicado por seu peso correspondente, w_r , pode-se convenientemente definir $h = 1$ para todas as restrições fáceis. Assim, a altura efetiva é diretamente determinada por w_r .

Intuitivamente, uma vez que o termo correspondente a uma determinada restrição fácil é zerado, isso significa que a Gaussiana já foi levada de uma região mal comportada, segundo tal restrição, para uma região apropriada para a busca. Assim, como o propósito desse termo

já foi atingido, ele não é mais usado para guiar a otimização. Ao invés disso, ele passa a funcionar apenas como uma barreira, impedindo que CMA mova a Gaussiana de volta para regiões mal comportadas do espaço de busca. Como pode-se perceber na Figura 4.7, a influência das restrições fáceis na função objetivo é gradualmente diminuída e bruscamente zerada nas fronteiras, correspondendo a essas barreiras. Note que as fronteiras são propositalmente definidas de maneira explícita, para que a escolha dos pesos w_r possa ser simplificada. Essa simplificação é possível porque cada termo permanece exatamente igual a zero entre tais barreiras, indicando que, quando uma restrição fácil é atingida, seu termo correspondente não possui mais qualquer influência sobre os outros termos.

Portanto, assumindo que cedo ou tarde as restrições fáceis serão todas zeradas, qualquer w_r muito maior do que w_p (Equação 4.8) deveria funcionar (e.g. $w_r > 10^{10} w_p$). Assim, as restrições fáceis devem ter alta prioridade sobre o objetivo principal. Consequentemente, apenas depois de todas as restrições fáceis serem atingidas, ou seja, após obter uma amostra inicial viável, é que o objetivo principal terá uma influência efetiva na otimização. Além disso, como as restrições fáceis, quando zeradas, não precisarão mais competir nem com o objetivo principal nem entre elas mesmas, seus pesos w_r podem ser simplesmente definidos como prioridades, ao invés de escolhidos cuidadosamente como *trade-offs*. No restante desta subseção, as diferentes restrições fáceis usadas neste trabalho são individualmente descritas. Note que as mesmas restrições fáceis são usadas para todos os experimentos realizados.

Velocidade do COM. Visto que o personagem deve deslocar-se continuamente para frente, não se permite que a velocidade do centro de massa (COM) na direção do eixo x global seja muito pequena em nenhum dos instantes da simulação. Também, lembrando que v corresponde à velocidade média do COM, v_x é penalizada caso seja menor do que um determinado valor. Além disso, v_y (vertical) e v_z (lateral) são também penalizadas caso não sejam próximas de zero:

$$E_{vel_min} = \sum_{t=1}^n Q_u({}^t\dot{C}_x, 0.5), \quad (4.11)$$

$$E_{vels_med} = Q_u(v_x, 2.0) + Q_b(v_y, 0.25) + Q_b(v_z, 0.25), \quad (4.12)$$

onde ${}^t\dot{C}_x$ corresponde à velocidade do COM, na direção do eixo x global, no instante t .

Velocidades das juntas. Em locomoção eficiente, visto que a energia é inserida no personagem de maneira suave e sincronizada, as juntas geralmente não atingem altas velocidades. Portanto, juntas com velocidades muito altas são penalizadas em cada instante da simulação:

$$E_{vels_ang} = \sum_{t=1}^n \sum_j Q_b({}^t\dot{\theta}_j, 20.0), \quad (4.13)$$

onde ${}^t\dot{\theta}_j$ corresponde à velocidade angular da junta j no instante t .

Energia máxima permitida. Um valor máximo permitido de energia ativa é determinado a fim de evitar regiões do espaço de busca correspondentes a um grande gasto de energia, já que tais regiões mais energéticas são mais propícias a serem menos bem comportadas:

$$E_{energia_max} = Q_u(-E_{energia}, -500000.0) . \quad (4.14)$$

Modos prioritários. Para garantir que o esboço fornecido pelo animador através dos modos prioritários seja respeitado, durante a otimização, os outros modos permitidos não devem adquirir mais influência do que os próprios modos prioritários. Para isso, em cada estado s , a soma dos módulos das coordenadas de $\boldsymbol{\psi}$, correspondentes aos modos prioritários, deve ser maior do que a soma dos módulos das coordenadas de $\boldsymbol{\psi}$, correspondentes aos outros modos permitidos:

$$E_{modos_prior} = \sum_s Q_u \left(\sum_p |\psi_p^s| - \sum_o |\psi_o^s|, 0.0 \right) , \quad (4.15)$$

onde $\boldsymbol{\psi}^s$ corresponde ao vetor de torques ativos do estado s , em coordenadas modais; ψ_p^s corresponde a cada elemento de $\boldsymbol{\psi}^s$, correspondente a algum modo prioritário; e ψ_o^s corresponde a cada elemento de $\boldsymbol{\psi}^s$, correspondente a algum dos outros modos permitidos.

Postura vertical. O personagem deve ser penalizado caso esteja de cabeça para baixo. Essa medida é realizada através de uma simples comparação entre a altura do seu torso, ${}^t p_{torsoy}$, e a altura do seu COM, ${}^t C_y$, em cada instante t . O personagem é portanto penalizado caso ${}^t C_y > {}^t p_{torsoy}$:

$$E_{post_vert} = \sum_{t=1}^n Q_u({}^t p_{torsoy} - {}^t C_y, 0.0) . \quad (4.16)$$

Pé de apoio. Para que o personagem possa impulsionar o chão, o seu pé de apoio deve estar em contato com o chão durante certo intervalo de tempo, sincronizado com a aplicação de $\boldsymbol{\tau}^c$. Assim, o personagem é penalizado caso uma distância mínima entre a ponta do seu pé de apoio e o chão não seja obedecida, pelo menos desde o início do estado do chão até $\delta^c/2$ segundos depois:

$$E_{pe_apoio} = \sum_{t=t'}^{t'+n'} Q_u(-{}^t d_{min}, -0.001) , \quad (4.17)$$

onde t' corresponde ao instante em que o estado do chão inicia; n' corresponde ao número de passos da simulação executados durante $\delta^c/2$ segundos; e ${}^t d_{min}$ corresponde à distância mínima entre a ponta do pé de apoio e o chão no instante t .

Altura do pé de apoio. Para que o personagem seja capaz de mover-se continuamente

para frente, devido à influência da gravidade, é necessário que seu COM seja adequadamente impulsionado também para cima. Especificamente em uma corrida, para que a fase do ar possa ocorrer, τ^c deve ser aplicado de modo que seu pé de apoio perca totalmente o contato com o chão. Essa medida é realizada através do cálculo da distância vertical positiva percorrida pela ponta do seu pé de apoio, δ_{pe} , sob algumas condições específicas:

$$\delta_{pe} = \sum_{t=1}^n {}^t c_{pe} ({}^t p_{pe_y} - {}^{t-1} p_{pe_y}), \quad (4.18)$$

onde ${}^t c_{pe}$ define se as seguintes condições específicas, referentes ao pé de apoio considerado, são satisfeitas no instante t : \dot{C}_y já deve ter sido negativa, em algum instante anterior a t , desde o início do estado do ar; ${}^t \dot{C}_y > 0$; ${}^t \dot{C}_y - {}^t \dot{p}_{pe_y} > -0.1$; ${}^t p_{calc_y} > {}^t p_{pe_y}$; e ${}^t p_{pe_y} > {}^{t-1} p_{pe_y}$. Portanto, se todas essas condições forem satisfeitas, ${}^t c_{pe} = 1$, caso contrário, ${}^t c_{pe} = 0$. Note que ${}^t p_{pe_y}$ e ${}^t \dot{p}_{pe_y}$ correspondem respectivamente à posição vertical e à velocidade vertical da ponta do pé de apoio; e ${}^t p_{calc_y}$ corresponde à posição vertical do calcanhar do pé de apoio. Enfim, após ser calculado, δ_{pe} é penalizado caso não atinja um valor mínimo determinado:

$$E_{altura_pe_apoio} = Q_u(\delta_{pe}, 0.02). \quad (4.19)$$

Evitando tropeçar. Em uma corrida, apenas o pé de apoio deve ter contato com o chão. No caso de personagens bípedes, a cada passada, o outro pé deve ser movido para a frente do pé de apoio com o cuidado de não bater no chão, consequentemente evitando que o personagem tropece no próprio chão. Para tratar esse caso, durante cada fase do chão, o personagem é penalizado caso a distância da ponta do seu pé de apoio até o seu quadril, d_{apoio} , seja menor do que a distância da ponta do seu outro pé até o seu quadril, d_{outro} :

$$E_{evit_trop} = \sum_{t=t_c}^{t_a} Q_u(d_{apoio} - d_{outro}, 0.0), \quad (4.20)$$

onde t_c corresponde ao instante em que o pé de apoio toca o chão, e t_a corresponde ao instante em que o pé de apoio perde o contato com o chão.

4.5 Considerações Finais

Este capítulo apresenta uma técnica de controle de personagens virtuais em que suas propriedades elásticas passivas são exploradas com o objetivo de automaticamente produzir locomoção eficiente. Entretanto, um certo grau de controle é também fornecido ao animador, permitindo que ele tenha alguma liberdade para conduzir o processo de construção da animação.

Note, por exemplo, que o animador pode influenciar alguns aspectos relacionados ao estilo da locomoção gerada.

Todo o processo de construção do controlador de locomoção é também explicado em detalhes. A partir da especificação de um personagem, representado por uma estrutura articulada de corpos rígidos, e de suas propriedades elásticas, uma análise modal é realizada sobre uma determinada pose de relaxamento específica. Os modos naturais de vibração resultantes são então disponibilizados para o animador na forma de uma paleta de movimentos básicos, através de uma interface visual. Usando essa interface, o animador pode criar interativamente um esboço da locomoção desejada, através da combinação de alguns poucos modos de vibração de mais baixa frequência. A partir desse esboço, um procedimento de otimização é finalmente realizado a fim de gerar automaticamente uma locomoção cíclica fisicamente simulada, incluindo a influência da gravidade e as forças de reação do chão. Note que a otimização resulta em uma locomoção final que mantém os aspectos desejados fornecidos pelo animador.

Representar os torques ativos através dos modos de vibração permite que a otimização seja convenientemente realizada em um espaço de busca reduzido e apropriado para locomoção eficiente. Baseado nessa propriedade, o animador também pode excluir os modos de vibração que ele considera inadequados à locomoção desejada. Assim, esses modos não possuirão influência sobre o resultado final da animação. Os benefícios desse controle são disponibilizar uma ferramenta intuitiva de restrição do movimento e facilitar a otimização através da redução adequada da representação do controlador.

Por último, para resolver o problema de otimização com restrições gerado, um método de otimização que combina CMA e MoM é apresentado.

5 *Resultados e Discussões*

5.1 Introdução

A fim de avaliar a técnica proposta descrita no Capítulo 4, vários exemplos de locomoção são produzidos, utilizando três diferentes personagens (Figura 5.1): um bípede humanoide, um monstro bípede com quatro braços e um canguru com uma única perna¹. Todos os personagens utilizados neste trabalho são definidos em 3D, através de simples corpos rígidos conectados por juntas esféricas. Os personagens mencionados possuem respectivamente 30, 42 e 36 graus de liberdade internos, além dos seis graus de liberdade globais não atuados.

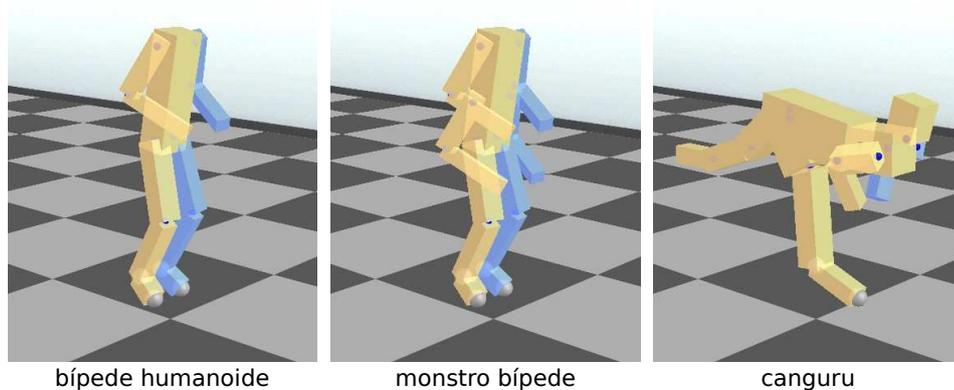


Figura 5.1: Personagens utilizados nos experimentos. As juntas esféricas são representadas por pequenas esferas azuis. Duas esferas cinzas, consideradas no tratamento de colisão entre o personagem e o chão, são incluídas para cada pé do personagem. Essas esferas representam a ponta do pé e o calcanhar.

¹ Para melhor visualizar e avaliar os resultados deste trabalho, um vídeo contendo as animações discutidas neste capítulo é também disponibilizado para o leitor. Favor verificar o vídeo que acompanha este documento. Entretanto, embora o vídeo seja sugerido, várias imagens contendo sequências de animação correspondentes aos resultados são ainda mostradas ao leitor no decorrer deste capítulo.

5.2 Exemplo Básico de Locomoção

Primeiramente, é interessante que um exemplo básico de locomoção seja descrito mais detalhadamente, para que o funcionamento da interface baseada nos modos de vibração do personagem seja compreendido mais claramente. O personagem escolhido para tal descrição mais detalhada foi o personagem bípede mais simples, o qual é utilizado na maioria dos experimentos realizados neste trabalho. A partir da pose neutra do personagem, especificada pelo animador, os seus modos de vibração são calculados e visualmente disponibilizados na forma de uma paleta de movimentos oscilatórios, os quais são combinados a fim de produzir um esboço da locomoção desejada. Usando a mesma pose neutra mostrada na Figura 5.1, a Figura 5.2 ilustra todos² os modos de vibração do personagem bípede humanoide, resultantes tanto da análise modal referente à fase do ar quanto da análise modal referente à fase do chão, ordenados de acordo com suas respectivas frequências naturais. Note que cada análise modal resulta em 30 modos de vibração, número correspondente aos 30 graus de liberdade atuados do personagem.

Na análise modal referente à fase do chão, uma restrição adicional é definida na ponta do pé de apoio do personagem. Essa restrição extra implica em modos de vibração diferentes, mais apropriados para a fase do chão, cujo objetivo é fazer com que o personagem impulsione corretamente o chão a fim de lançar-se novamente ao ar de maneira eficiente e adequada para o próximo passo. De fato, ao comparar os modos de vibração em cada fase, pode-se perceber, já nos primeiros modos, que os modos do chão tendem a “utilizar” o suposto chão. Isso pode ser percebido claramente, por exemplo, no terceiro modo de vibração do chão.

Entretanto, embora essa restrição extra mantenha a ponta do pé de apoio fixa na análise modal, nenhuma restrição com o objetivo de manter o pé de apoio fixo é explicitamente imposta durante a simulação física do personagem. Assim, tanto as animações individuais dos modos de vibração do ar e do chão quanto a animação do esboço final da locomoção, as quais são geradas a partir da simulação física do personagem sem gravidade, podem ser mostradas na interface para o animador de maneira consistente. Note que as animações individuais de todos os modos de vibração (inclusive os do chão), ilustradas na Figura 5.2, são geradas com o pé de apoio livre. No processo de otimização, quando a gravidade é considerada, a influência do chão no pé de apoio do personagem ocorre espontaneamente durante a simulação dinâmica, devido às forças de reação que surgem a partir do contato entre o pé e o chão. Note também que os modos de vibração de mais alta frequência envolvem, predominantemente, movimentos de torção nas juntas, ou seja, movimentos de rotação nos eixos y locais das juntas, e, por isso, podem não

² Os modos de vibração de corpo rígido são ignorados.

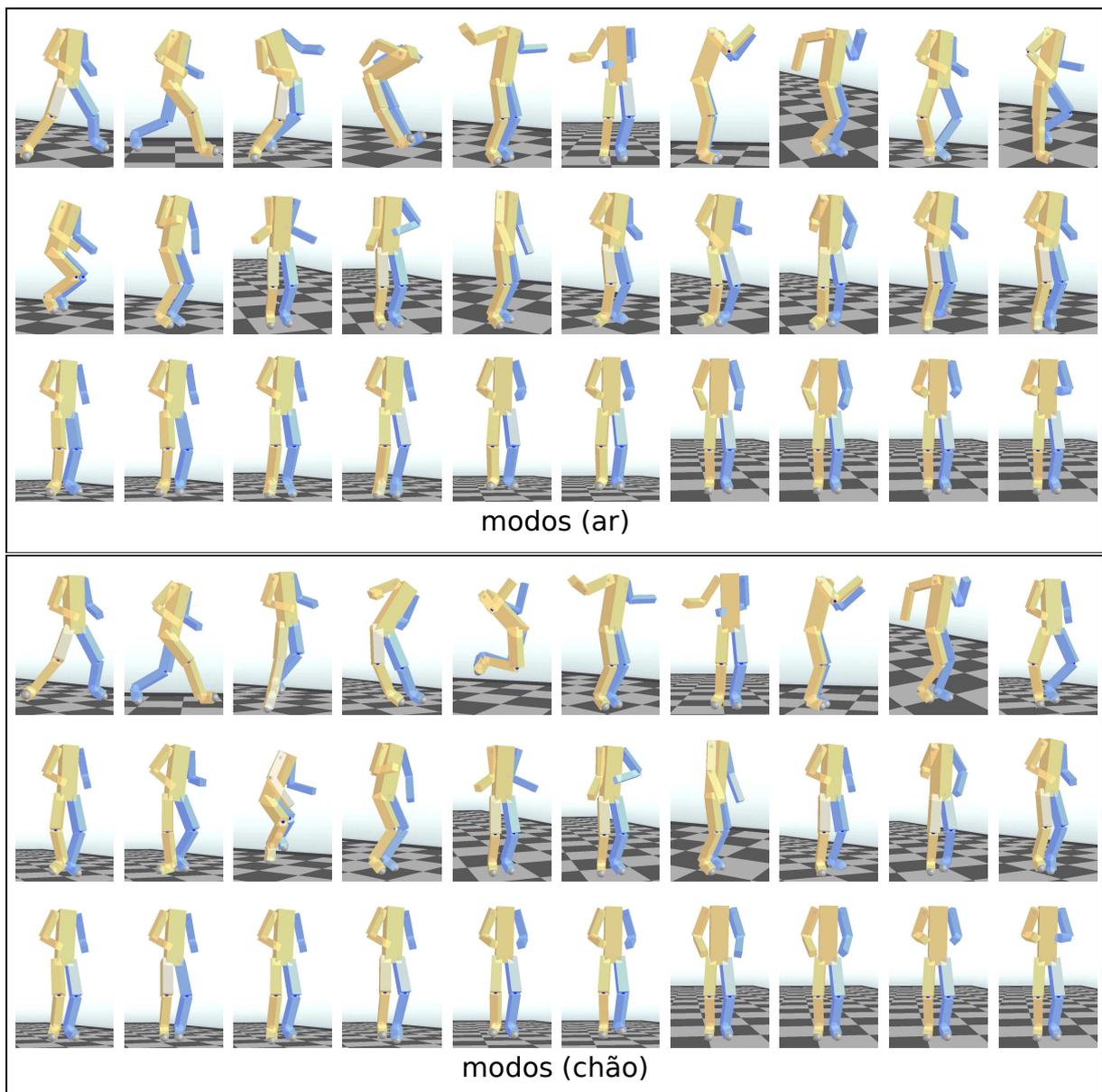


Figura 5.2: Todos os modos naturais de vibração do personagem bípede humanoide.

estar tão evidentes nas ilustrações.

De posse dos modos de vibração calculados e disponibilizados na forma de uma paleta, o animador é então responsável por gerar o esboço da locomoção desejada através da combinação dos modos. Além disso, ele também pode excluir do processo de otimização os modos que não interessarem. A Figura 5.3 mostra a seleção e a combinação dos modos de vibração do personagem bípede humanoide, a fim de gerar o esboço de um exemplo básico de locomoção, o qual corresponde a um movimento de corrida. Esse exemplo de locomoção é idêntico ao exemplo mostrado na Figura 4.1, mas aqui as ilustrações dos modos de vibração são apresentadas em imagens maiores, padrão usado nos demais exemplos de locomoção discutidos

posteriormente. Note que, como a maioria dos modos de vibração de mais alta frequência é efetivamente excluída em todos os experimentos, as paletas podem ser convenientemente mostradas neste documento de maneira reduzida, composta apenas pelos primeiros modos de vibração do personagem. Nesse caso básico, pode-se perceber que apenas a primeira metade dos modos é mostrada. Portanto, todos os modos que não são mostrados podem ser considerados excluídos, ou seja, marcados de vermelho.

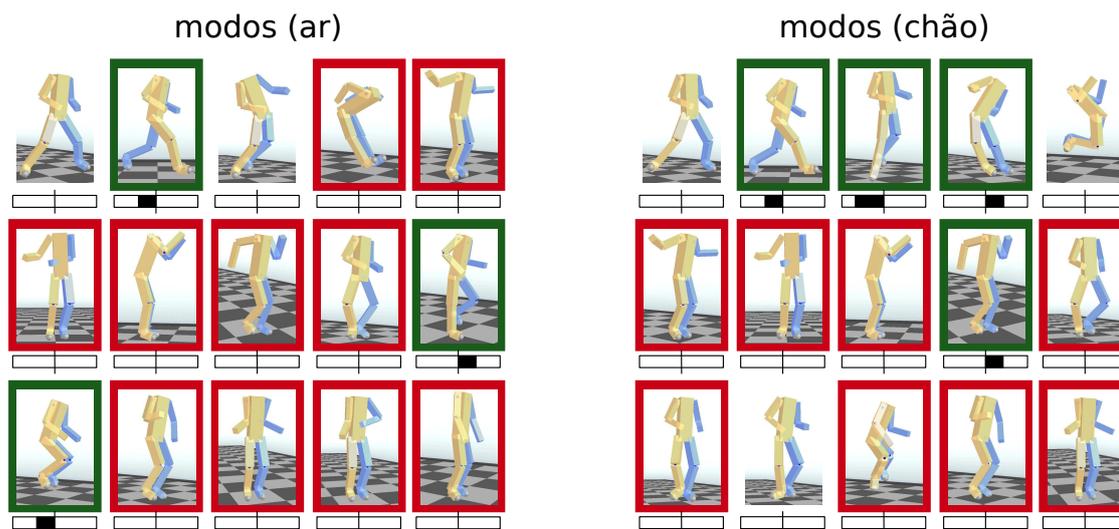


Figura 5.3: Especificação dos modos de vibração para o exemplo básico de locomoção. Apenas alguns poucos modos de vibração são suficientes para gerar o esboço de um movimento de corrida básico. Os modos de vibração combinados estão marcados de verde e os excluídos de vermelho.

No caso desse exemplo básico de corrida, a combinação de apenas sete modos de vibração foi suficiente para gerar o esboço da locomoção desejada: três na fase do ar e quatro na fase do chão. Em ambas as fases, pode-se perceber que o segundo modo corresponde claramente à abertura das pernas apropriada para um movimento de corrida. Na fase do ar, o décimo modo, também marcado de verde, é responsável por dobrar o joelho da perna de trás, e é usado para que o pé de trás não toque o chão durante a passada, evitando assim uma possível topada no chão. Entretanto, como o décimo modo, enquanto dobra o joelho da perna de trás, também estica o joelho da perna da frente, achou-se conveniente usar também o décimo primeiro modo, o qual dobra os joelhos das duas pernas ao mesmo tempo, para permitir compensar essa esticada do joelho da perna da frente. Na fase do chão, o terceiro modo é claramente responsável por impulsionar o chão. Note como o corpo do personagem contribui para o impulso, como um todo, de maneira visualmente eficiente; quadril, joelho e tornozelo são esticados simultaneamente. Entretanto, esse terceiro modo também apresenta uma pequena curva lateral na estrutura do personagem como um todo, e, por isso, é conveniente usar também

o quarto modo para permitir compensar esse desvio lateral. Além disso, o movimento dos braços é apropriadamente definido pelo nono modo.

Além dos modos prioritários, alguns modos adicionais também podem ser incluídos na otimização, a fim de aumentar a liberdade do otimizador para que o equilíbrio do personagem possa ser tratado durante o ciclo avaliado. Assim, o personagem pode atingir, mais facilmente, um estado final suficientemente próximo ao estado inicial, resultando em uma locomoção cíclica. Excluir alguns dos modos, por sua vez, permite que o animador impeça a utilização de vibrações indesejadas, restringindo a locomoção resultante otimizada de uma maneira apropriada e intuitiva.

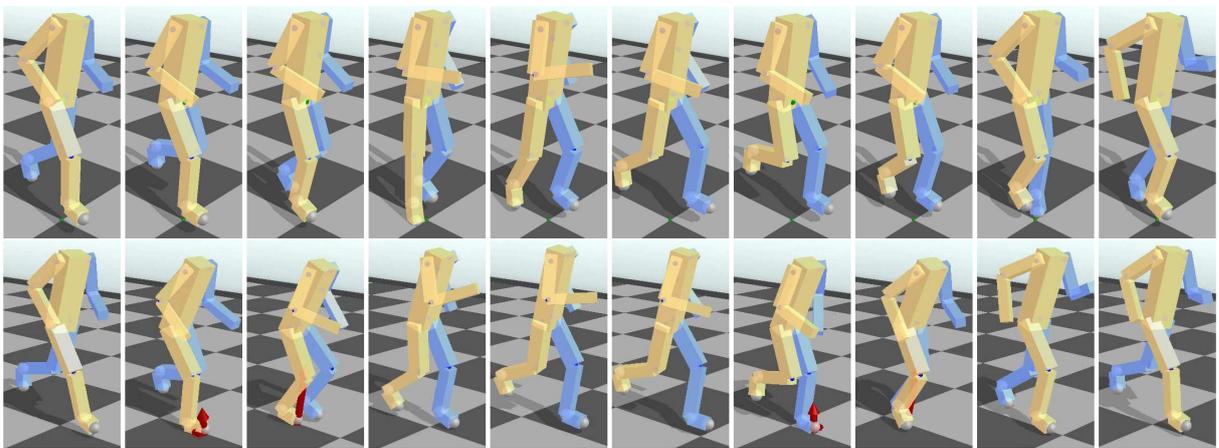


Figura 5.4: A primeira sequência de animação corresponde ao esboço produzido pelo animador, simulado sem o efeito da gravidade. A segunda corresponde ao resultado final obtido através da otimização do controlador. As setas vermelhas correspondem às forças de reação do chão.

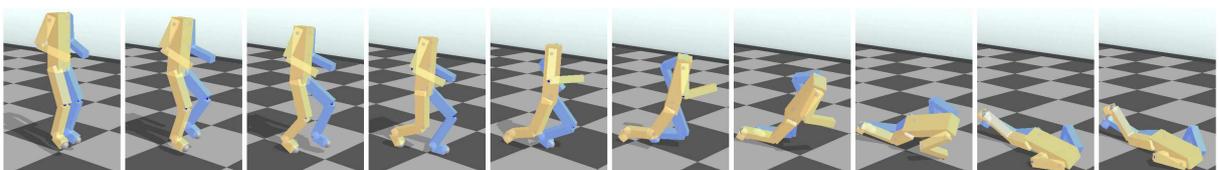


Figura 5.5: Simulação física do personagem bípede humanoide utilizando o controlador inicial e considerando o efeito da gravidade. O controlador inicial, utilizado na inicialização da otimização, é definido baseado no esboço produzido pelo animador.

Após o animador produzir o esboço da locomoção desejada, uma otimização sobre os parâmetros do controlador é realizada. A Figura 5.4 ilustra tanto o esboço produzido pelo animador, obtido a partir da seleção e da combinação dos modos mostrada na Figura 5.3, quanto o resultado obtido através da otimização do controlador, realizada a partir do esboço gerado. A primeira sequência de animação mostrada, referente ao esboço gerado, é obtida através da simulação física do personagem, mas sem considerar o efeito da gravidade. Note que, ao considerar a gravidade na simulação, ao mesmo tempo em que a interação com o chão

deve ser tratada, é desejado que a animação resultante da otimização mantenha as principais características presentes no esboço produzido, correspondentes às escolhas realizadas pelo animador, de acordo com a locomoção idealizada, através do uso da paleta dos modos de vibração do personagem. As duas sequências de animação mostradas lado a lado permitem perceber a semelhança existente entre o esboço da locomoção desejada e a locomoção resultante otimizada, como desejado. A Figura 5.5, por sua vez, ilustra a simulação física do personagem realizada utilizando o controlador inicial, ainda não otimizado. O controlador inicial, utilizado na inicialização da otimização, é definido baseado no esboço produzido pelo animador. A diferença em relação à geração dessa nova sequência de animação, quando comparada à primeira sequência de animação da Figura 5.4, é que o efeito da gravidade é considerado na simulação física. Note que a otimização do controlador é essencial para que uma locomoção cíclica fisicamente correta, simulada sob o efeito da gravidade, possa ser obtida. Caso contrário, o personagem não é capaz de se locomover apropriadamente.

Note que não existe uma maneira única, e nem mesmo uma maneira rigorosa, de se gerar o esboço da locomoção desejada. Assim como alguns detalhes desejados podem ser incluídos, outros detalhes não desejados podem ser desconsiderados, de acordo com o que o animador almeja. Note que, qualquer que seja o esboço produzido, resultados otimizados finais adequados podem ser obtidos. De maneira semelhante, não existe uma única solução para definir os modos permitidos e aqueles que serão excluídos. Portanto, resultados similarmente adequados de um movimento de corrida básico poderiam ser ainda obtidos com escolhas e especificações semelhantes, porém diferentes, tanto em relação aos modos prioritários quanto em relação aos modos permitidos e excluídos. A interface proposta fornece liberdade de controle ao animador para que ele influencie o resultado final de acordo com suas escolhas. É importante perceber que escolhas diferentes das realizadas no exemplo mostrado não são escolhas erradas, e devem ser simplesmente interpretadas como especificações diferentes de locomoção desejada. Uma vez descrito em detalhes o primeiro exemplo de como o esboço da locomoção desejada é produzido, e compreendido mais claramente o funcionamento da interface utilizada, as seções seguintes mostram as diferentes abordagens usadas para avaliar a capacidade e os benefícios da técnica proposta.

5.3 Diferentes Estilos de Locomoção

O objetivo desta primeira abordagem de avaliação é mostrar que o animador pode realizar diferentes combinações dos modos de vibração, e que essas diferentes escolhas são efetiva e coerentemente refletidas na locomoção final resultante da otimização, e não apenas

diretamente no esboço visualizado. Para mostrar essa capacidade da técnica proposta, novos experimentos são realizados utilizando o mesmo personagem bípede humanoide, a mesma pose de relaxamento escolhida no cálculo dos modos, e conseqüentemente uma paleta idêntica à usada no exemplo básico de locomoção. A diferença é que, nesses novos experimentos, diferentes modos de vibração podem ser selecionados e combinados a fim de especificar diferentes estilos de locomoção, através dos respectivos esboços produzidos. O primeiro e segundo experimentos desta seção são bastante semelhantes ao exemplo básico de corrida discutido na seção anterior. De fato, é possível alterar o estilo da locomoção modificando apenas um modo de vibração. Enquanto esses primeiros experimentos correspondem a pequenas modificações sobre a especificação dos modos do exemplo básico, o terceiro experimento mostra que o animador é também capaz de produzir locomoções mais elaboradas com a técnica proposta.

5.3.1 Balanço Lateral

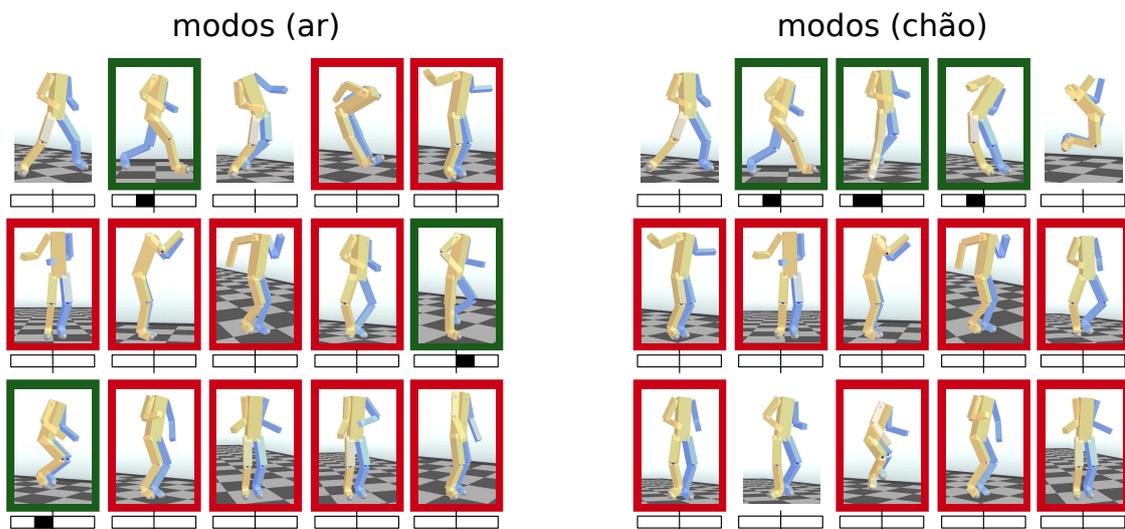


Figura 5.6: Especificação dos modos para o exemplo de corrida com balanço lateral. Este exemplo é bastante semelhante ao exemplo básico de locomoção, com a diferença que uma oscilação lateral do corpo, como um todo, é acrescentada ao esboço produzido.

O primeiro experimento consiste em adicionar um balanço lateral ao movimento de corrida básico. A Figura 5.6 mostra que esse aspecto da locomoção pode ser facilmente controlado, no esboço produzido, através do quarto modo de vibração do chão. Portanto, ao invés de compensar o pequeno desvio lateral inserido pelo uso do terceiro modo de vibração do chão, como no exemplo básico de locomoção, esse desvio lateral é ainda mais explorado com o quarto modo, a fim de que o balanço lateral seja bem realçado. Uma outra diferença é que o movimento

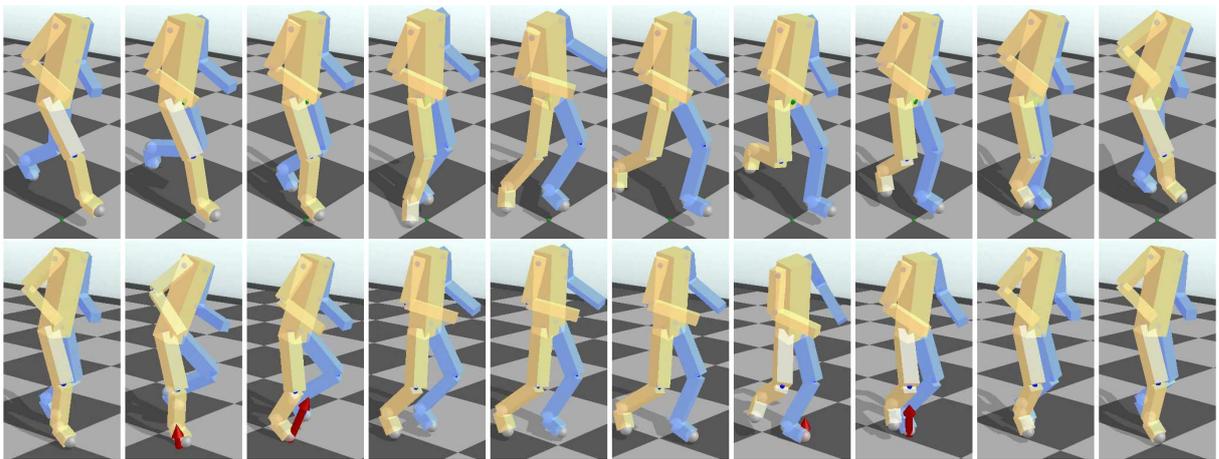


Figura 5.7: Em cima, esboço produzido para o exemplo de corrida com balanço lateral. Embaixo, locomoção final correspondente, resultante da otimização do controlador.

dos braços correspondente ao nono modo, usado no exemplo básico de locomoção, é definido como excluído nesse caso. Também para esse experimento, tanto o esboço produzido quanto a locomoção final resultante da otimização são novamente mostradas lado a lado (Figura 5.7).

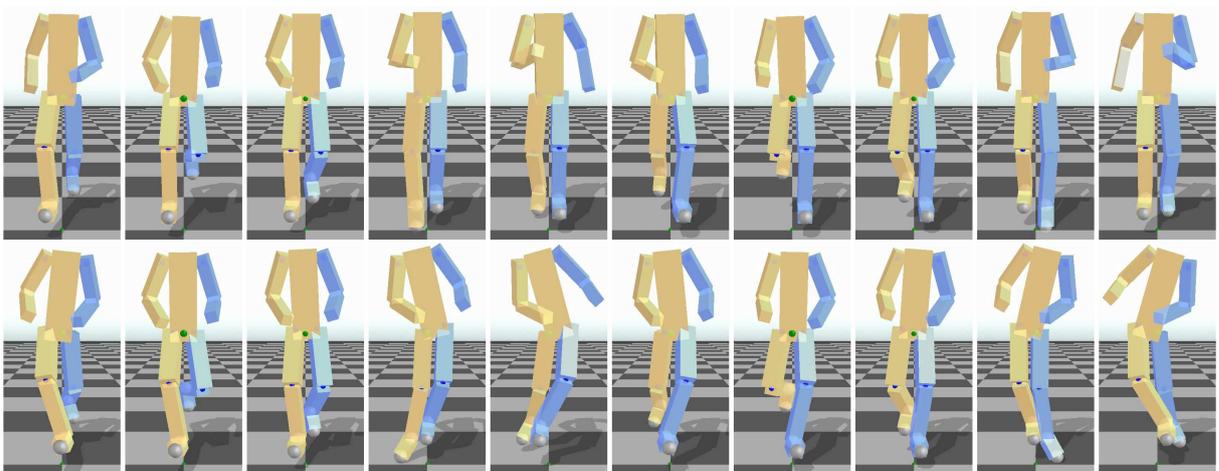


Figura 5.8: Comparação entre os esboços mostrados em uma visão frontal. Em cima, esboço do exemplo de corrida básico. Embaixo, esboço do exemplo de corrida com balanço lateral.

É também interessante analisar diretamente a diferença entre o esboço do exemplo de corrida básico e o esboço do exemplo de corrida com balanço lateral (Figura 5.8). A fim de enfatizar o balanço lateral, as sequências de animação são geradas agora usando uma câmera frontal, ou seja, posicionada à frente do personagem. A Figura 5.9, por sua vez, compara as respectivas locomoções otimizadas, também usando uma câmera frontal. Por essa visão frontal, pode-se perceber que o terceiro modo do ar, também correspondente ao desvio lateral do corpo, foi convenientemente recrutado pelo otimizador e automaticamente usado no sentido oposto ao especificado no esboço para o quarto modo do chão, a fim de dividir o balanço lateral entre as

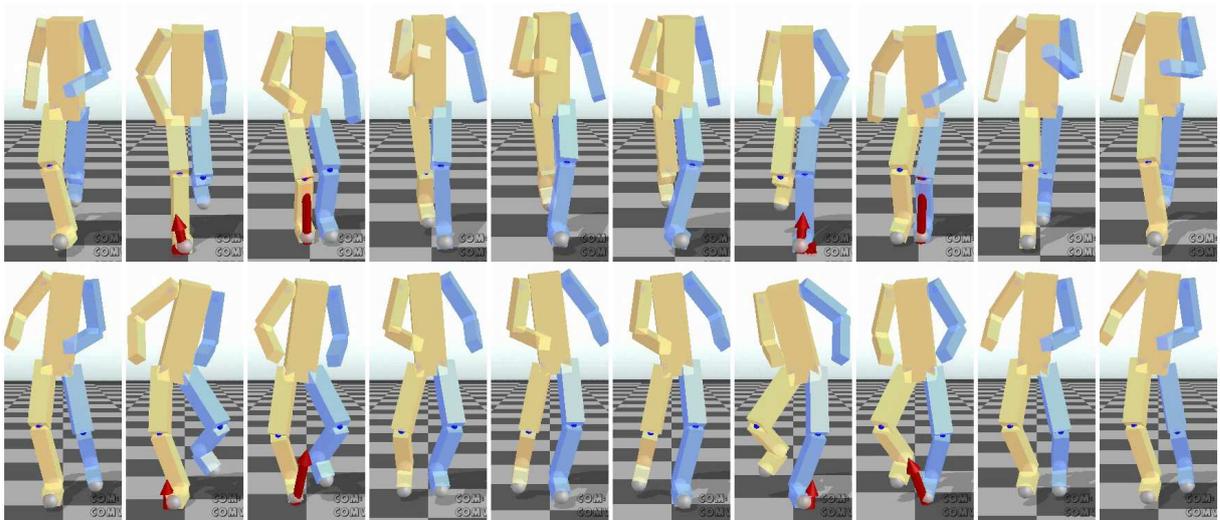


Figura 5.9: Comparação entre os resultados otimizados mostrados em uma visão frontal. Em cima, exemplo de corrida básica. Embaixo, exemplo de corrida com balanço lateral.

duas fases da locomoção (ar e chão).

5.3.2 Rotação Vertical

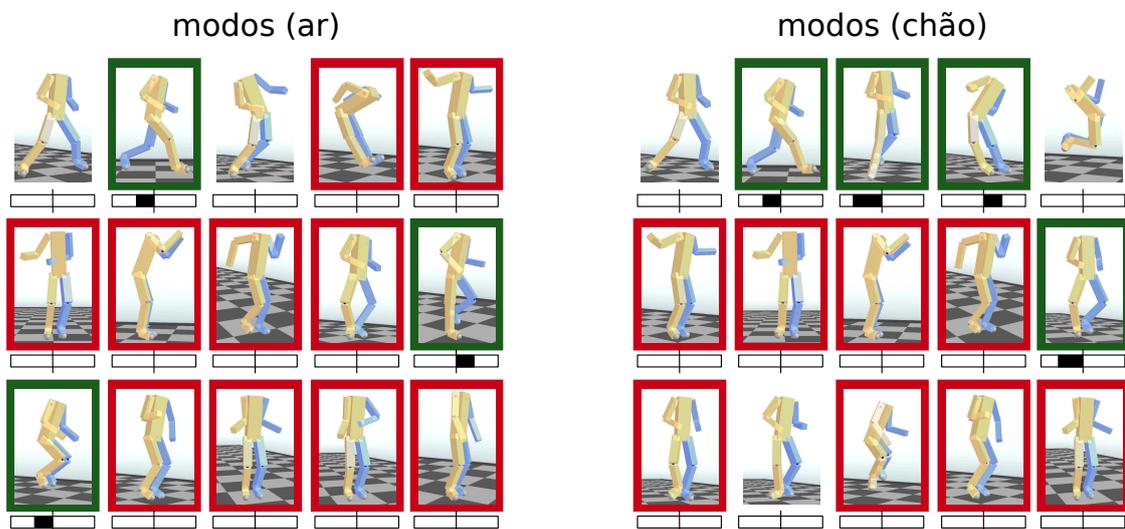


Figura 5.10: Especificação dos modos para o exemplo de corrida com rotação vertical. Este exemplo é também bastante semelhante ao exemplo básico de locomoção, com a diferença que uma rotação vertical do corpo, como um todo, é acrescentada ao esboço produzido.

Enquanto o balanço lateral corresponde a uma rotação no corpo do personagem em relação ao seu eixo frontal, o segundo experimento consiste em adicionar ao movimento de corrida básico uma rotação em relação ao seu eixo vertical. A Figura 5.10 mostra que a combinação dos modos nesse caso é também bastante semelhante ao exemplo básico de locomoção. Além de

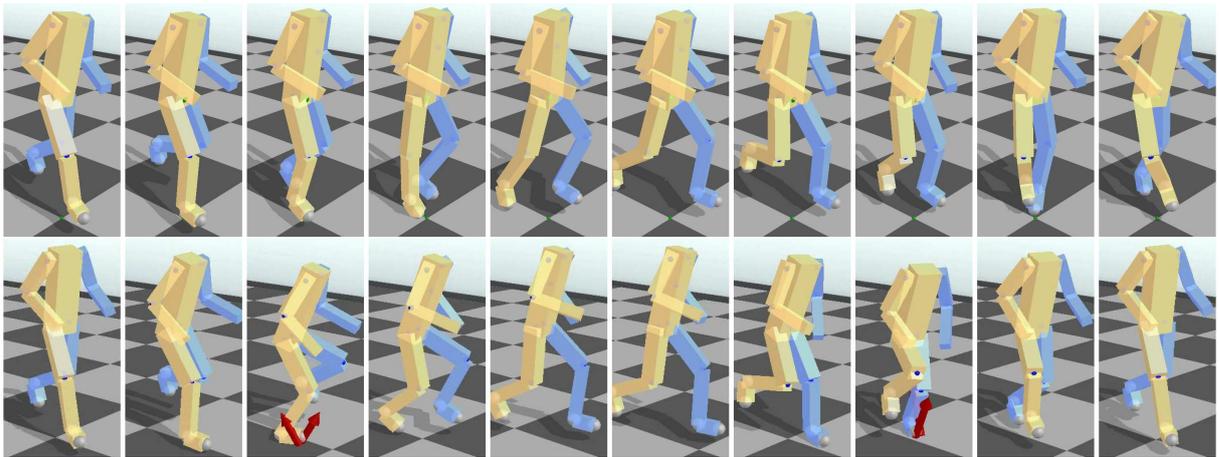


Figura 5.11: Em cima, esboço produzido para o exemplo de corrida com rotação vertical. Em baixo, locomoção final correspondente, resultante da otimização do controlador.

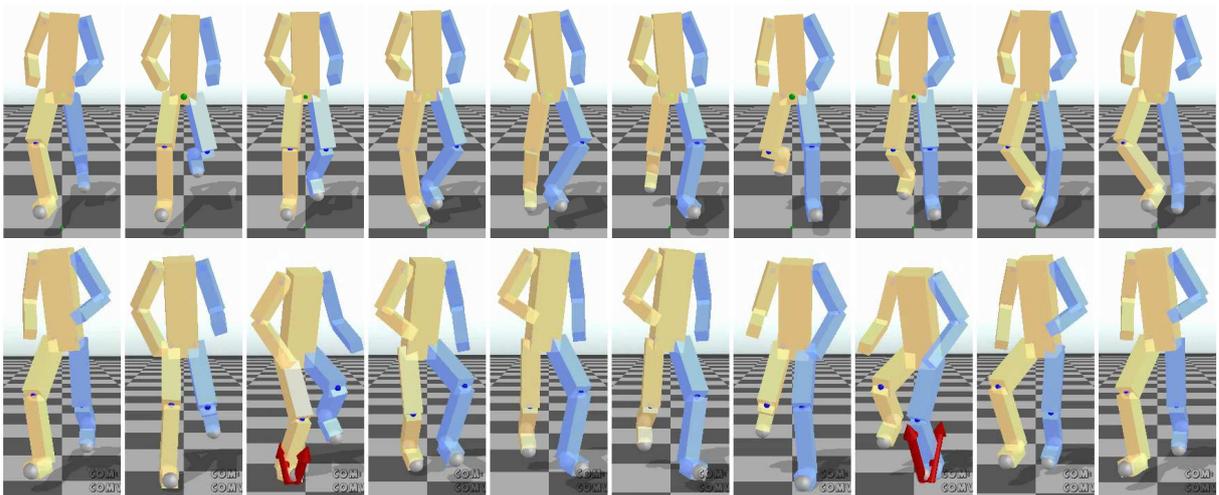


Figura 5.12: Versão da Figura 5.11 mostrada em uma visão frontal.

também excluir o movimento dos braços correspondente ao nono modo, como no experimento anterior, o uso de apenas um modo adicional, o décimo modo, é suficiente para definir esse novo estilo de locomoção desejado. A comparação entre o esboço produzido e sua respectiva locomoção otimizada é novamente permitida através da Figura 5.11. Essa comparação é também mostrada em uma visão frontal (Figura 5.12). É interessante notar que, embora o modo adicionado não rotacione verticalmente o corpo do personagem como um todo quando simulado sem o efeito da gravidade, pode-se prever que a interação com o chão proporcionará essa rotação desejada, o que é de fato percebido na locomoção resultante otimizada. Esse experimento enfatiza como a otimização encontra uma locomoção que respeita o esboço produzido pelo animador e que ao mesmo tempo é fisicamente válida.

5.3.3 Saltitar

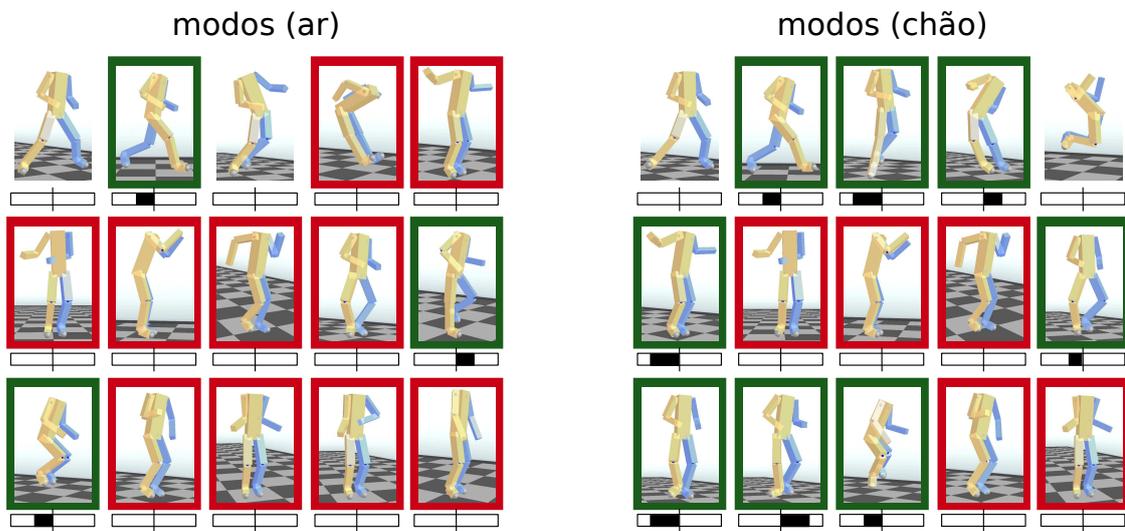


Figura 5.13: Especificação dos modos para o exemplo do personagem saltitando.

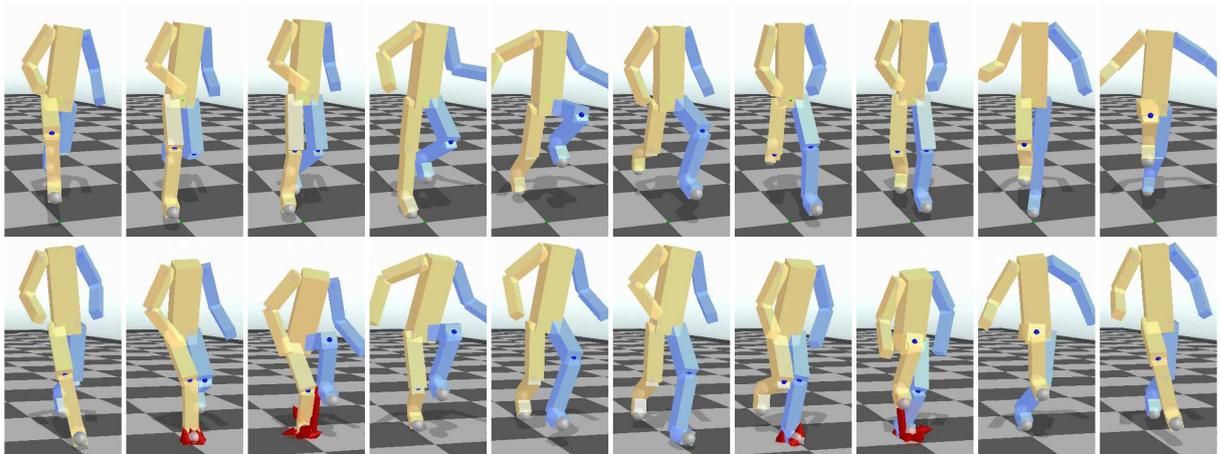


Figura 5.14: Em cima, esboço produzido para o exemplo do personagem saltitando. Embaixo, locomoção final correspondente, resultante da otimização do controlador.

Esse terceiro experimento consiste em um estilo de locomoção mais diferente do movimento de corrida básico. A Figura 5.13 mostra uma combinação mais elaborada dos modos, com o objetivo de gerar um esboço do personagem saltitando. Ao invés de apenas adicionar uma característica incremental ao movimento de corrida, como nos experimentos anteriores, nesse caso, o personagem é capaz de executar um tipo mais notoriamente diferente de locomoção. Note que a propriedade interativa da interface, usada para a geração do esboço da locomoção desejada, facilita a combinação dos modos. Ou seja, enquanto o animador vai modificando a paleta dos modos, o esboço da locomoção mostrado na tela do computador é alterado em tempo real, tornando suas escolhas bem mais intuitivas. A Figura 5.14, por sua vez,

compara o esboço produzido e sua respectiva locomoção otimizada.

5.3.4 Estilos de Locomoção Aleatórios

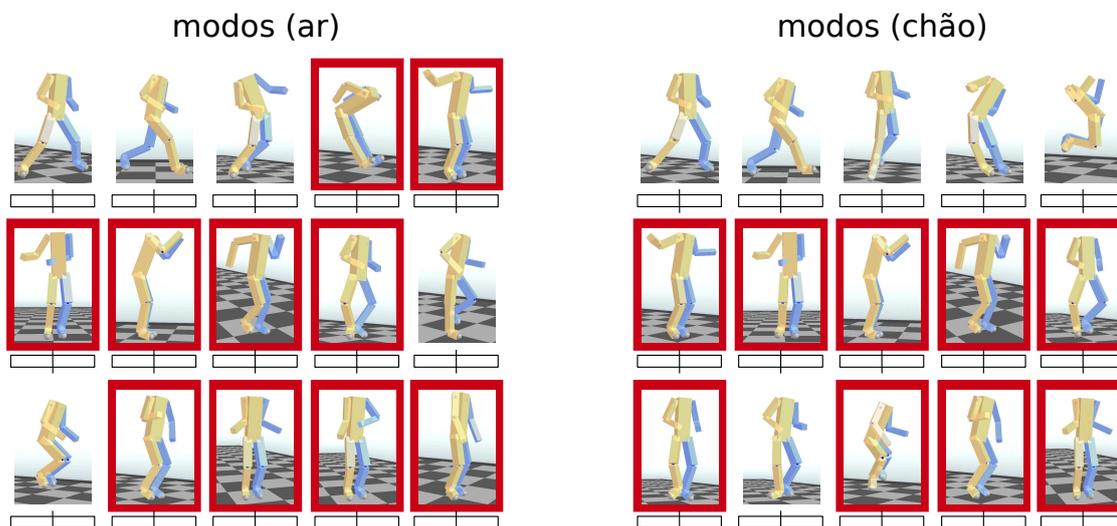


Figura 5.15: Escolha padrão inicial dos modos usada para os dois experimentos randômicos.

A fim de demonstrar que o processo de otimização não está apenas encontrando uma solução ótima arbitrária, mas sim produzindo uma locomoção que, além de fisicamente válida, esteja de acordo com o esboço construído pelo animador, dois novos experimentos cujos esboços são produzidos aleatoriamente são discutidos nesta subseção. Baseado nos esboços produzidos anteriormente, apenas alguns modos são antecipadamente definidos como permitidos, servindo como uma escolha padrão inicial dos modos que poderão ser otimizados (Figura 5.15). A partir dessa escolha inicial, dois simples procedimentos randômicos foram definidos.

No primeiro experimento, três dos quinze primeiros modos do ar foram sorteados para que suas amplitudes fossem definidas com um valor normalizado pré-determinado de 0.4, definindo-os assim como modos prioritários. Depois, para os quatro modos escolhidos, os sinais de suas amplitudes também foram sorteados (0.4 ou -0.4). O mesmo foi feito para os modos do chão, com a diferença que quatro dos quinze primeiros modos foram sorteados. Note que os modos sorteados foram marcados de verde, inclusive os que estavam previamente excluídos. A Figura 5.16 mostra o resultado desse primeiro procedimento randômico, enquanto a Figura 5.17 compara o esboço resultante e a locomoção otimizada correspondente.

O segundo experimento difere do primeiro apenas porque somente dois modos do ar e três modos do chão são sorteados, e porque o valor normalizado pré-determinado de amplitude

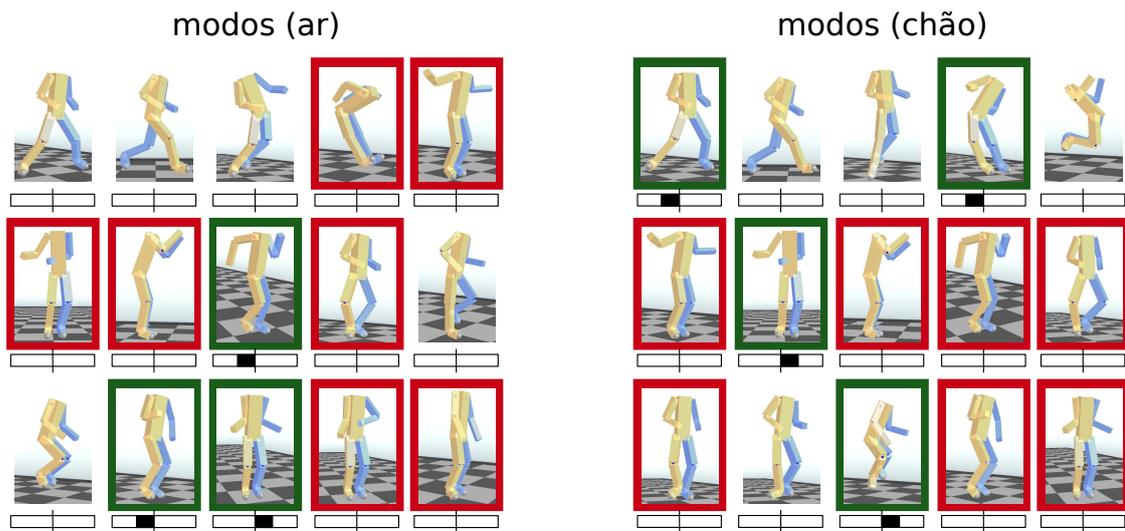


Figura 5.16: Resultado da especificação dos modos a partir do primeiro procedimento randômico.

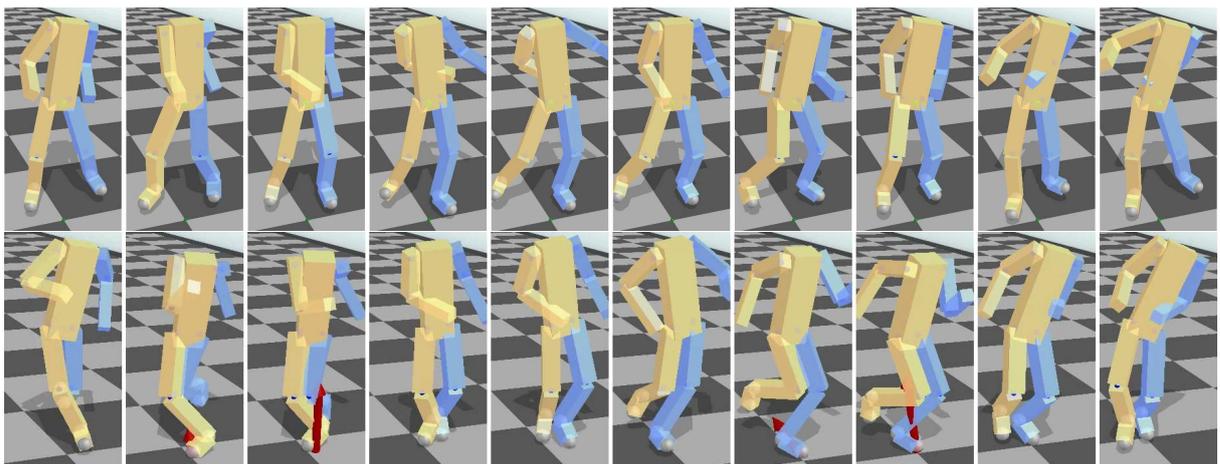


Figura 5.17: Em cima, esboço produzido a partir do primeiro procedimento randômico. Embaixo, locomoção final correspondente, resultante da otimização do controlador.

usado foi de 0.3. Da mesma maneira, a Figura 5.18 mostra o resultado do segundo procedimento randômico, enquanto a Figura 5.19 compara o esboço resultante e a locomoção otimizada correspondente.

Analisando os resultados otimizados obtidos, pode-se perceber que, mesmo quando um esboço produzido randomicamente é otimizado, o processo de otimização ainda é capaz de encontrar um resultado que segue o estilo de locomoção definido, embora esse resultado não seja tão semelhante ao esboço como nos experimentos guiados pelo animador. Ou seja, independente de quão incomum o esboço possa ser, a otimização ainda assim retorna uma locomoção funcional cíclica, embora não necessariamente natural por consequência do próprio esboço. Entretanto, mais importante do que a capacidade da otimização em obter resultados

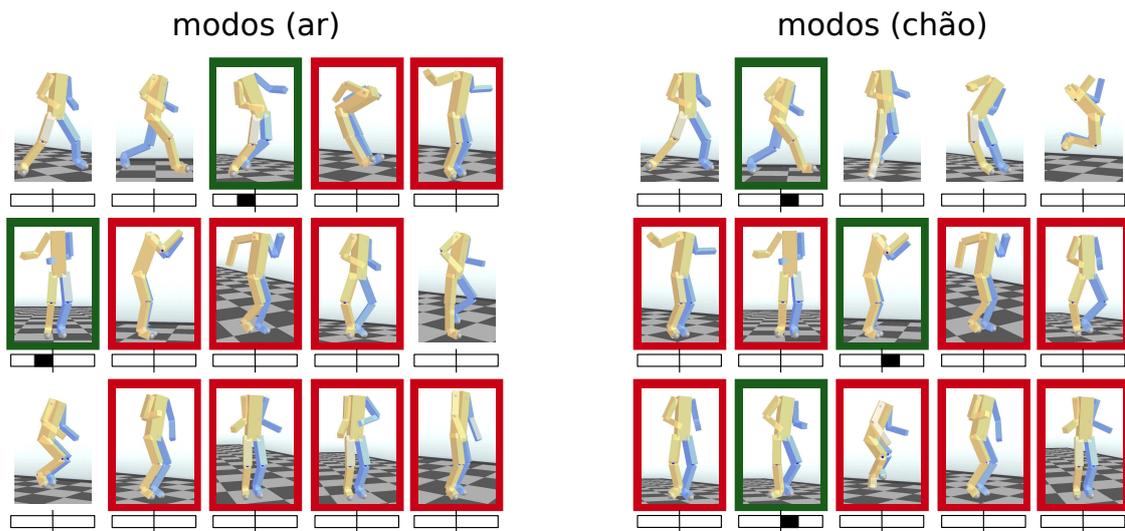


Figura 5.18: Resultado da especificação dos modos a partir do segundo procedimento randômico.

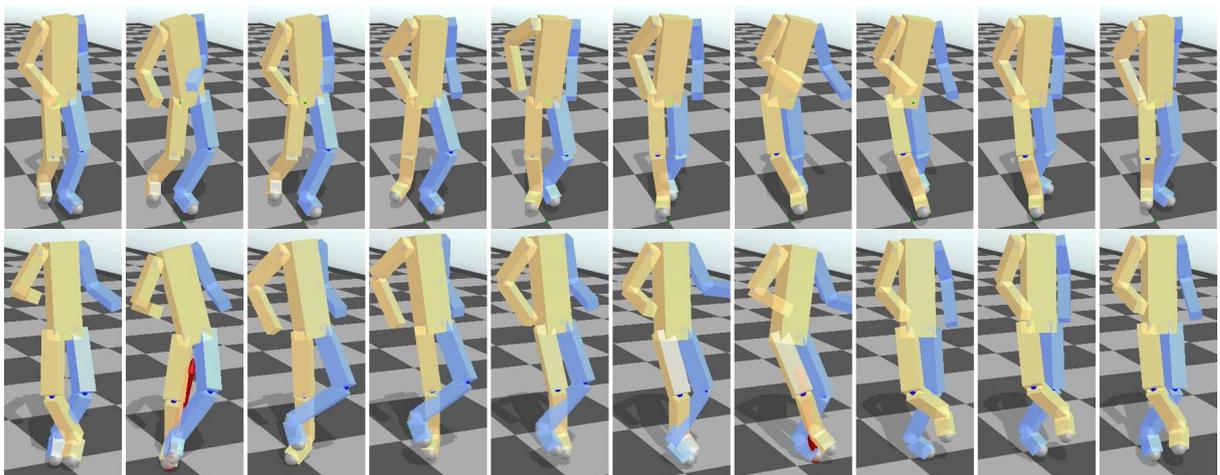


Figura 5.19: Em cima, esboço produzido a partir do segundo procedimento randômico. Embaixo, locomoção final correspondente, resultante da otimização do controlador.

funcionais a partir desses experimentos randômicos, tais experimentos indicam que os modos de vibração do personagem, fornecidos ao animador, consistem de fato de uma base efetivamente intuitiva, que disponibiliza opções de movimentos que naturalmente revelam-se úteis aos olhos do animador. Note que a influência do animador na escolha dos modos resulta em locomoções mais convincentes do que quando os resultados são obtidos a partir de tais procedimentos aleatórios. Portanto, a proposta de disponibilizar tais modos para que o próprio animador possa identificar deliberadamente quais deles são apropriados para determinada locomoção desejada mostra-se bastante conveniente.

5.4 Diferentes Poses Neutras

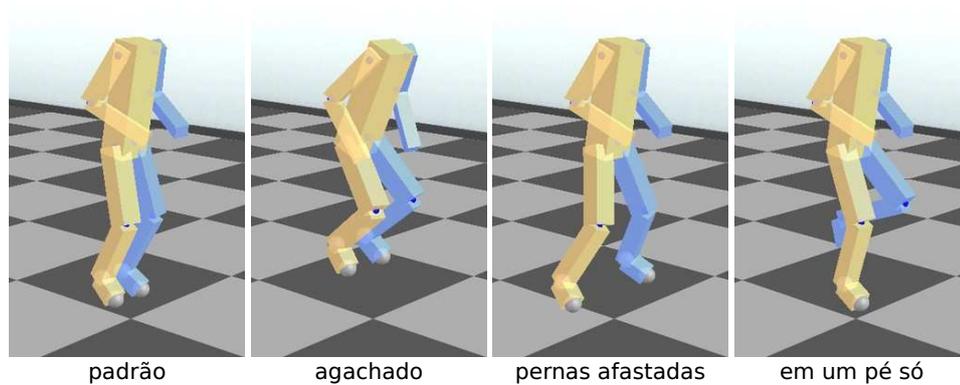


Figura 5.20: Diferentes poses de relaxamento definidas para o personagem bípede humanoide.

A técnica proposta também permite que o animador modifique a pose de relaxamento do personagem, o que corresponde a uma outra possível maneira de editar o esboço gerado e, conseqüentemente, a locomoção resultante otimizada. Novos experimentos são descritos a fim de mostrar a influência intuitiva da pose de relaxamento escolhida sobre a locomoção gerada. A Figura 5.20 compara a pose padrão do personagem bípede humanoide, usada nos experimentos anteriores, com três diferentes novas poses de relaxamento, escolhidas para serem usadas nos três experimentos descritos a seguir. Note que os modos de vibração do personagem são automaticamente atualizados na paleta disponibilizada para o animador, de acordo com a pose de relaxamento definida.

5.4.1 Agachado

O primeiro experimento consiste em simular um movimento de corrida, semelhante ao exemplo básico de locomoção, mas com o personagem correndo agachado. O objetivo aqui é mostrar que é possível obter essa nova locomoção simplesmente definindo uma nova pose de relaxamento com o personagem agachado. A Figura 5.21 mostra a nova paleta disponibilizada para o animador, resultante do cálculo automático dos novos modos de vibração correspondentes a essa nova pose agachada. Note que, neste experimento, a especificação dos modos é bastante parecida com a combinação realizada no exemplo de corrida básico. A diferença é que, como os modos de vibração estão diferentes, de acordo com a nova pose de relaxamento escolhida, o esboço é gerado implicitamente, influenciado por essa nova pose. Ou seja, os novos aspectos dinâmicos passivos da estrutura são naturalmente considerados pelo animador, já que são automaticamente disponibilizados através dos novos modos de vibração. A Figura 5.22, por

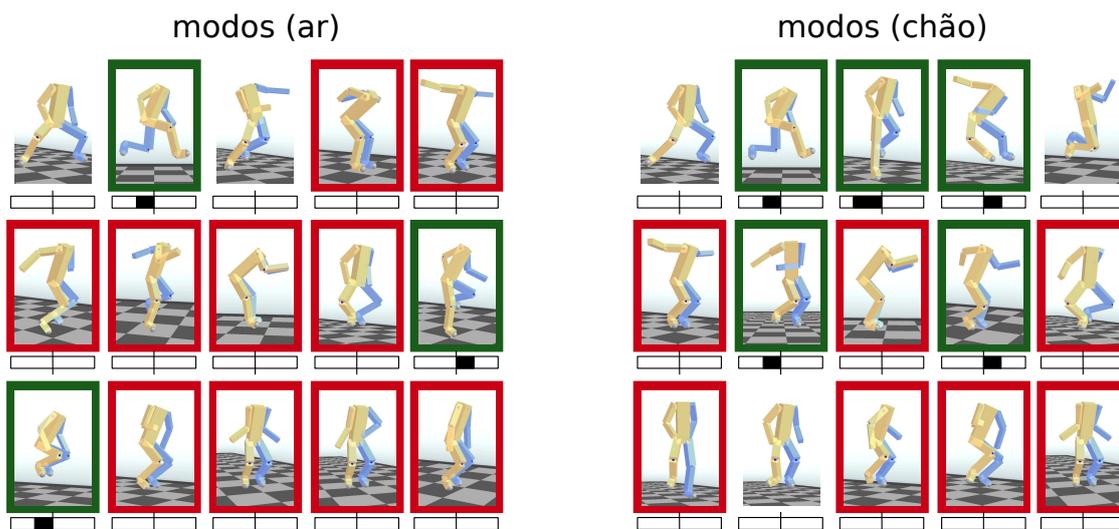


Figura 5.21: Especificação dos modos para o exemplo de corrida agachada.

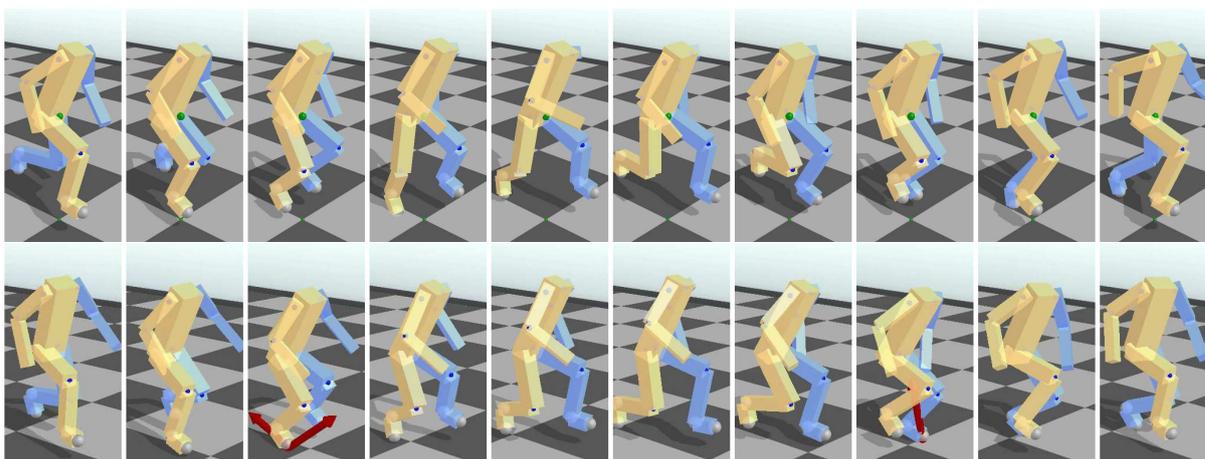


Figura 5.22: Em cima, esboço produzido para o exemplo de corrida agachada. Embaixo, locomoção final correspondente, resultante da otimização do controlador.

sua vez, compara o esboço produzido e sua respectiva locomoção otimizada.

5.4.2 Pernas Afastadas

O segundo experimento segue a mesma ideia do experimento anterior. Entretanto, ao invés da pose de relaxamento ser definida com o personagem agachado, ela é simplesmente definida com as pernas do personagem mais afastadas lateralmente, justamente com o intuito de gerar a nova locomoção desejada, a qual consiste em um movimento de corrida com as pernas analogamente afastadas. Novamente, pode-se perceber que a especificação dos modos é bastante similar à combinação realizada no exemplo de corrida básico (Figura 5.23). Isso significa que, assim como no exemplo anterior, o animador pode facilmente gerar o novo esboço, simplesmente

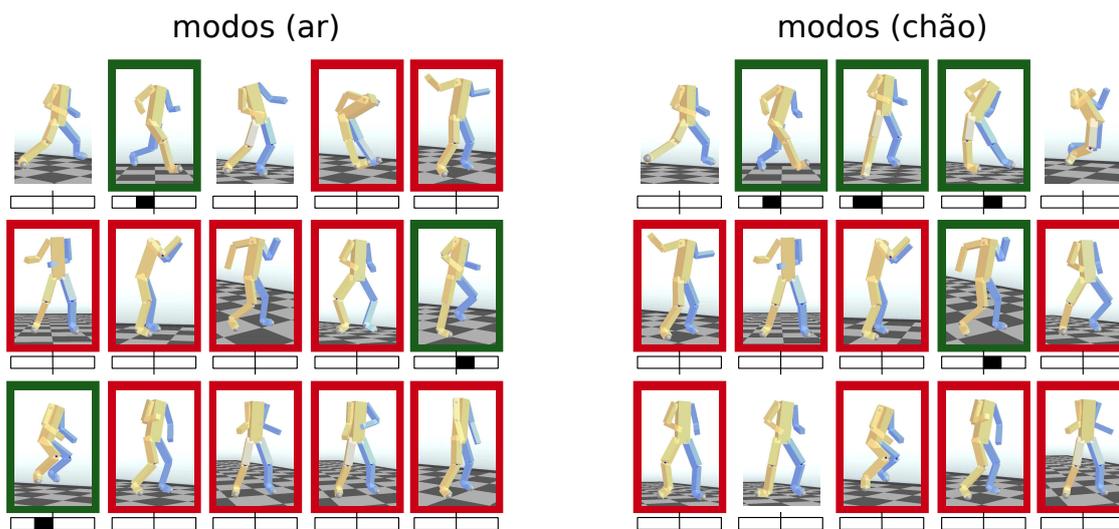


Figura 5.23: Especificação dos modos para o exemplo de corrida com as pernas afastadas.

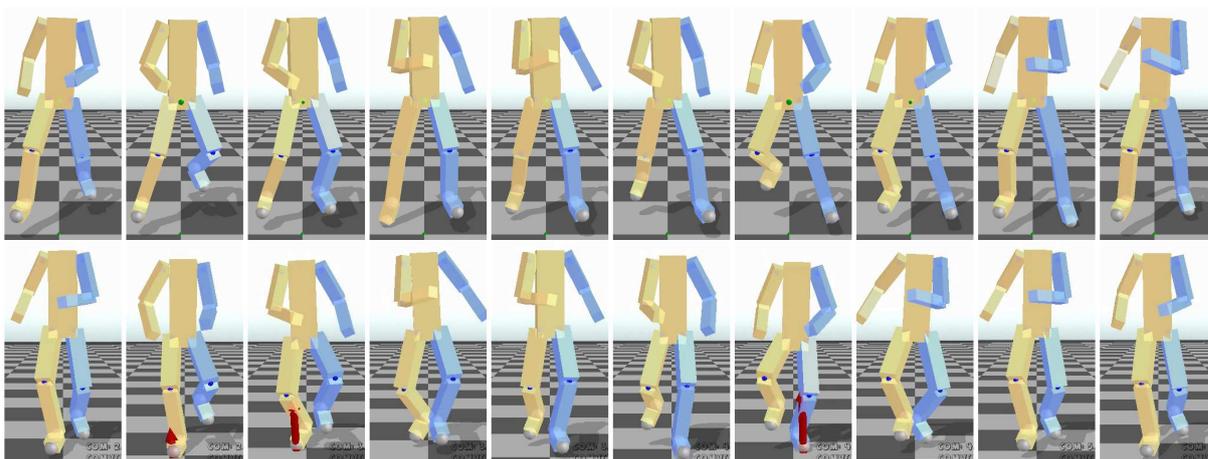


Figura 5.24: Em cima, esboço produzido para o exemplo de corrida com as pernas afastadas. Embaixo, locomoção final correspondente, resultante da otimização do controlador.

identificando a semelhança entre os novos modos e os modos correspondentes usados no exemplo de corrida básico. Uma vez identificados os modos correspondentes, tanto a classificação dos modos quanto os valores de amplitude atribuídos aos modos prioritários foram definidos diretamente baseados nas escolhas feitas para o exemplo básico. O esboço produzido e sua respectiva locomoção otimizada podem ser comparados através da Figura 5.24. Note que na locomoção resultante, embora o personagem corra com as pernas mais afastadas lateralmente do que no exemplo básico, esperava-se que seus pés também estivessem mais afastados. Essa aproximação lateral dos pés não desejada pode ter sido causada por alguma das restrições fáceis definidas na Subseção 4.4.4. A adaptação das restrições fáceis de acordo com o experimento específico provavelmente deve resultar em uma locomoção otimizada ainda mais parecida com o esboço produzido.

5.4.3 Em Um Pé Só

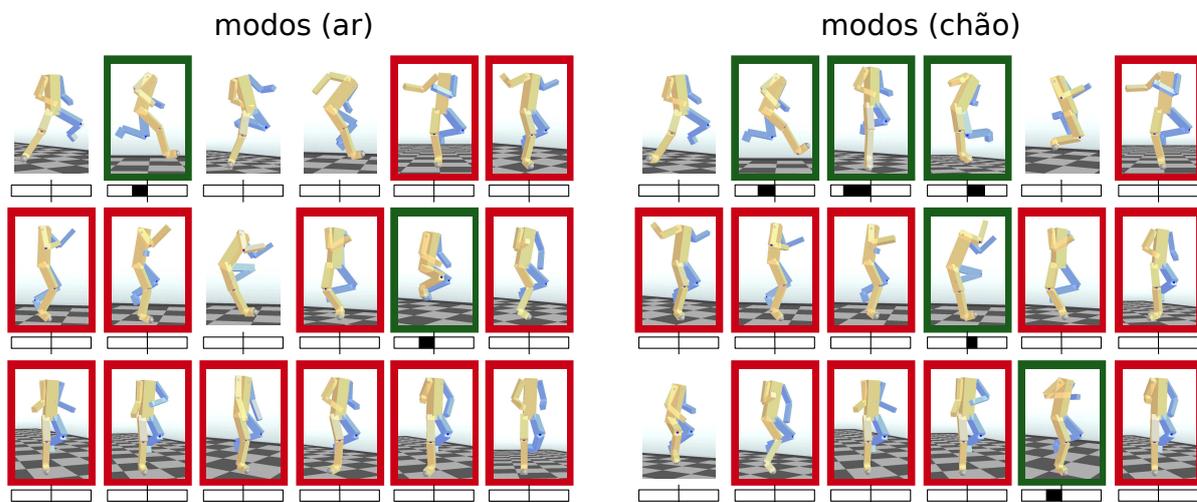


Figura 5.25: Especificação dos modos para o exemplo de corrida em um pé só.

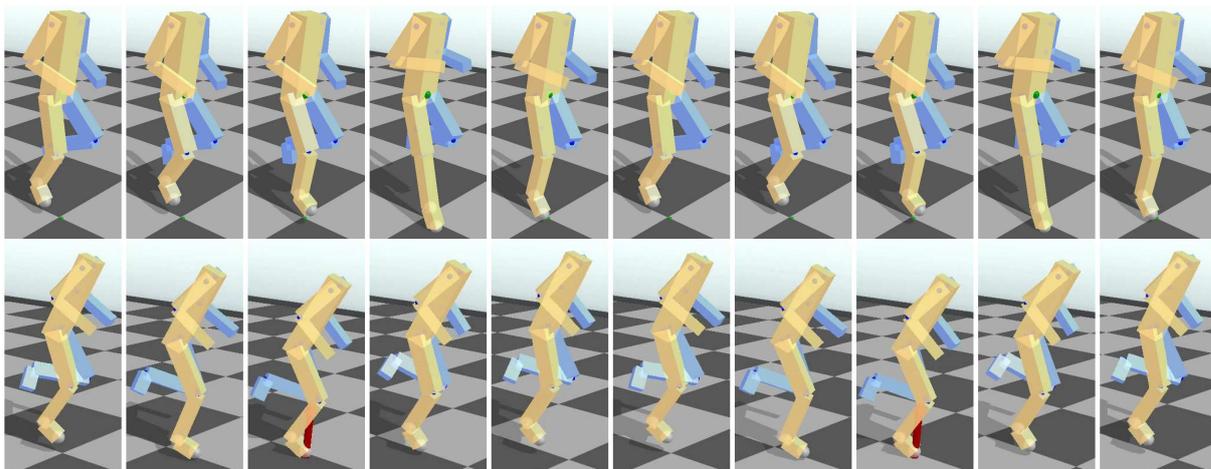


Figura 5.26: Em cima, esboço produzido para o exemplo de corrida em um pé só. Embaixo, locomoção final correspondente, resultante da otimização do controlador.

Diferente dos dois experimentos anteriores, este terceiro experimento é um pouco mais elaborado. Para que seja possível simular a nova locomoção desejada, a qual consiste na execução de sucessivos saltos em um pé só, além de modificar a pose de relaxamento do personagem, um dos seus pés deve ser desconsiderado na sua especificação. Apesar de possuir a mesma topologia do personagem bípede humanoide, a implementação precisa considerar essa nova versão do personagem, a qual possui apenas um pé, como sendo um novo personagem. Note, por exemplo, como discutido na Subseção 4.2.1, que o controlador agora deve ser definido por uma máquina de estados possuindo apenas dois estados, ao invés de quatro. Entretanto, embora a nova locomoção a ser gerada seja essencialmente diferente em relação aos dois

experimentos anteriores, a especificação dos modos nesse caso também não é difícil, apesar de não ser realizada de maneira tão direta como nos demais exemplos desta seção (Figura 5.25). Também nesse caso, apenas alguns poucos modos foram utilizados para que o esboço fosse produzido. A Figura 5.26, como nos demais exemplos, compara o esboço produzido e sua respectiva locomoção otimizada.

5.5 Diferentes Personagens

Uma das principais vantagens da técnica proposta é que ela é geral no sentido de ser aplicável a diferentes personagens com diferentes morfologias, de uma maneira fácil e direta. Devido ao fato de os modos de vibração disponibilizados para o animador através da paleta de movimentos serem intrinsicamente associados à estrutura do personagem, ao definir um personagem diferente, os seus novos aspectos dinâmicos passivos são facilmente considerados na construção do esboço da locomoção desejada, de maneira automática. Uma consequência chave dessa fácil generalização para personagens arbitrários é a proposta de uma nova e efetiva alternativa para facilmente descrever como tais personagens devem se locomover, a qual é definida através de seus modos de vibração. Enquanto Kry et al. [2009] propõem o uso de modos de vibração para esse propósito, a técnica proposta neste trabalho é nova por ser definida em um contexto dinâmico e para personagens dinamicamente instáveis. Essa técnica é bastante útil como alternativa à técnica de captura de movimentos, que é basicamente limitada a personagens humanoides. De fato, existe uma carência de possíveis técnicas de geração de movimentos para personagens arbitrários. Como já mencionado e mostrado na Figura 5.1, além do personagem bípede humanoide, dois novos personagens foram testados neste trabalho: um monstro bípede com quatro braços e um canguru com uma única perna.

5.5.1 Monstro Bípede

De maneira análoga aos experimentos que usam diferentes poses neutras, descritos na Seção 5.4, os modos de vibração do personagem são automaticamente atualizados na paleta disponibilizada para o animador, de acordo com a estrutura morfológica especificada para o personagem a ser simulado, assim como com as suas propriedades geométricas e com as suas propriedades físicas.

A Figura 5.27 ilustra a nova paleta disponibilizada para o animador, composta pelos modos de vibração do monstro bípede. Já que a locomoção desejada nesse caso também consiste em um movimento de corrida semelhante ao exemplo básico de locomoção, descrito na Seção

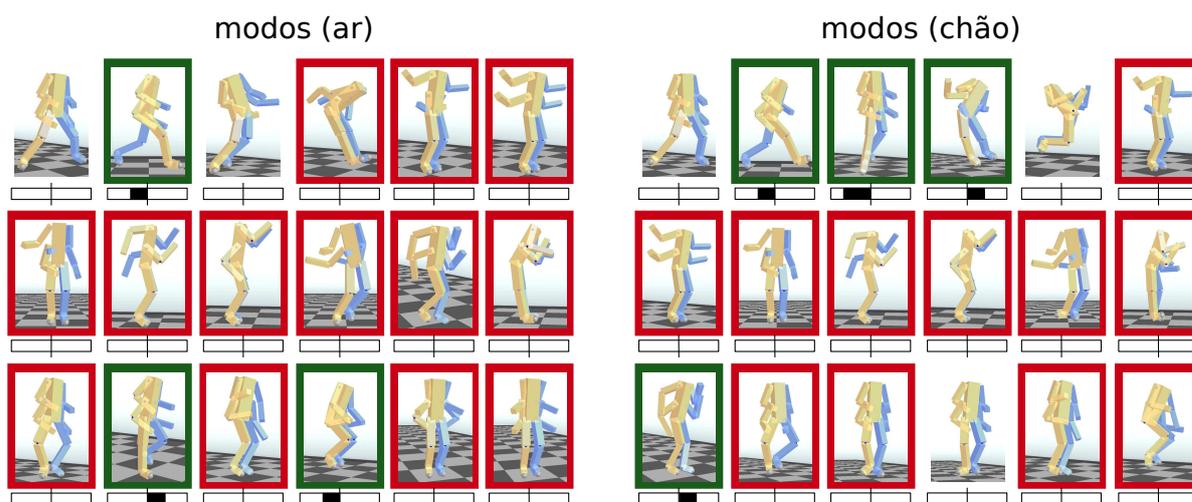


Figura 5.27: Especificação dos modos para o exemplo do monstro bípede correndo.

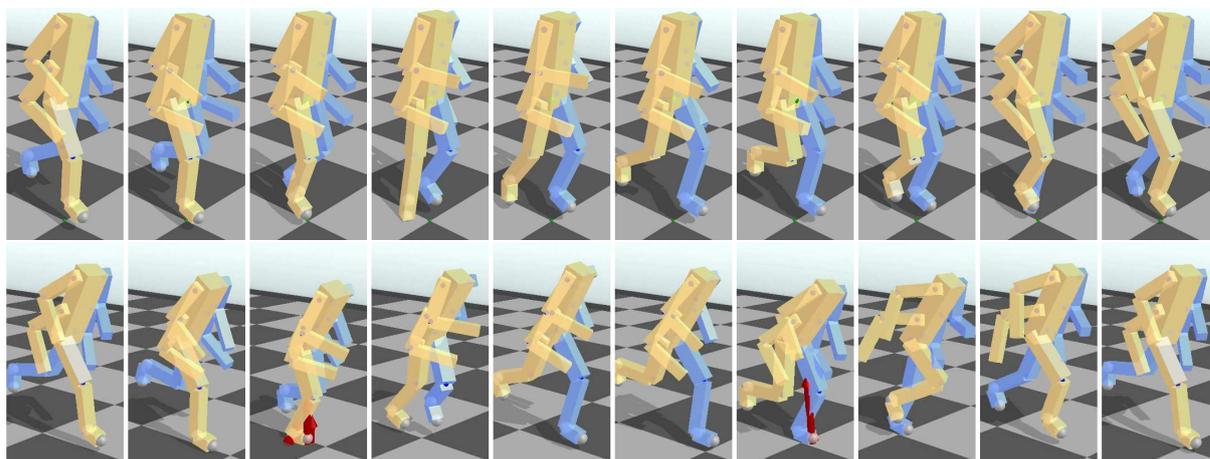


Figura 5.28: Em cima, esboço produzido para o exemplo do monstro bípede correndo. Embaixo, locomoção final correspondente, resultante da otimização do controlador.

5.2, pode-se novamente perceber a similaridade entre a especificação dos modos realizada no exemplo básico (Figura 5.3) e a especificação dos modos mostrada na Figura 5.27. A Figura 5.28, por sua vez, compara o esboço produzido e sua respectiva locomoção otimizada. Assim como no exemplo básico de locomoção, a simulação física do monstro bípede utilizando o controlador inicial e considerando o efeito da gravidade é também ilustrada (Figura 5.29).

Um segundo experimento é realizado com o monstro bípede a fim de mostrar que novos estilos de locomoção podem ser facilmente gerados para diferentes personagens, e não apenas para o personagem bípede humanoide. Nesse caso, apenas um par de modos é trocado, como pode ser percebido ao comparar as Figuras 5.27 e 5.30.

Através dessa simples troca, o estilo de movimentação dos braços do monstro é diretamente alterado no esboço produzido. A Figura 5.31 compara os esboços produzidos referentes aos dois

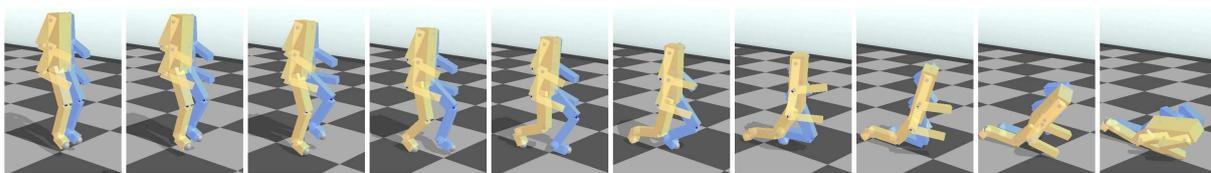


Figura 5.29: Simulação física do monstro bípede utilizando o controlador inicial e considerando o efeito da gravidade.

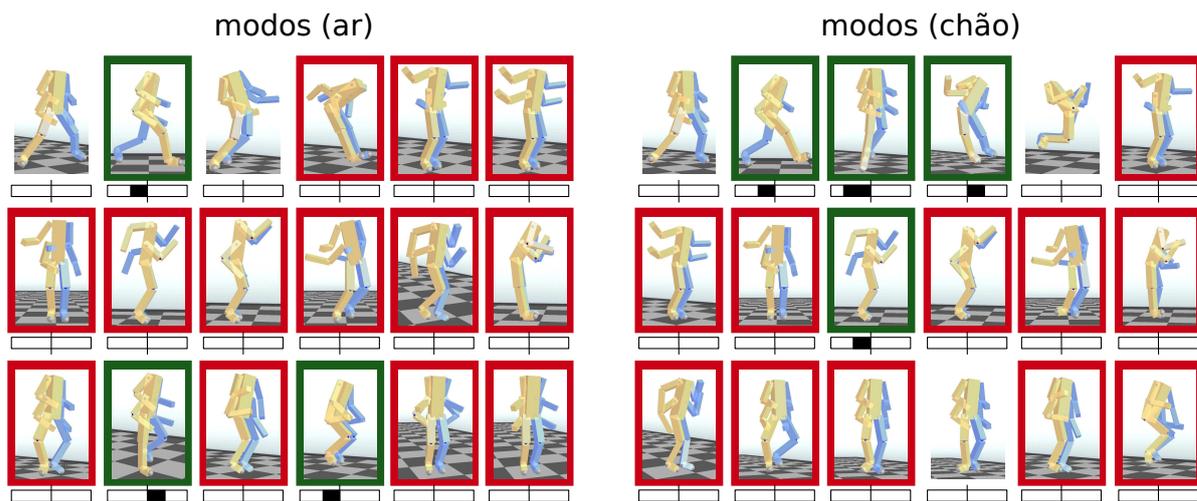


Figura 5.30: Especificação dos modos para o exemplo do monstro bípede correndo, mas com a movimentação cruzada dos braços.

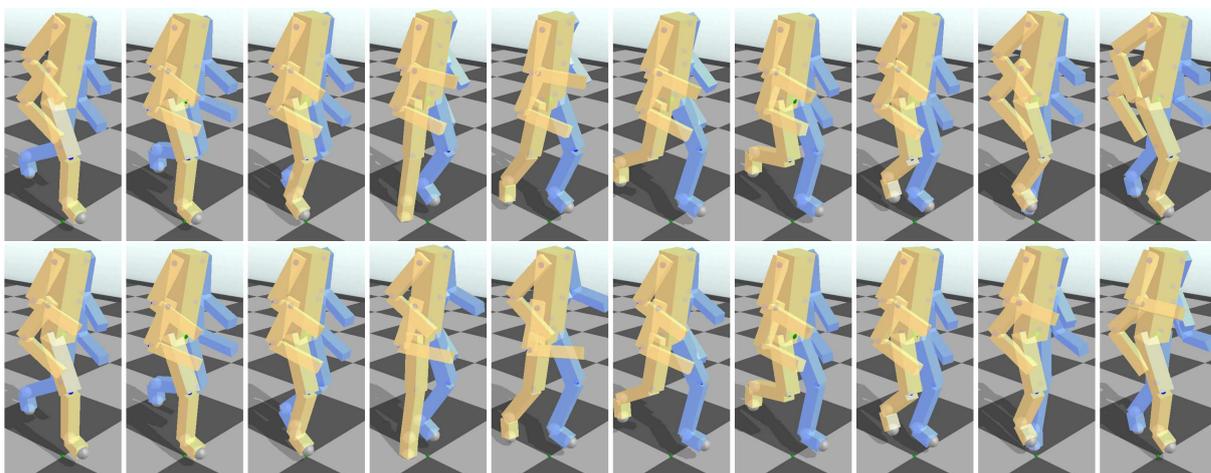


Figura 5.31: Comparação entre os esboços dos exemplos com o monstro bípede correndo. Em cima, movimentação regular dos braços. Embaixo, movimentação cruzada dos braços.

experimentos realizados com o monstro bípede. Entretanto, note que o movimento dos braços não é alterado de maneira independente na locomoção resultante otimizada, pois a locomoção, como um todo, é dinamicamente adaptada para que o novo estilo de movimentação dos braços possa ser obtido adequadamente em um ambiente fisicamente válido. A Figura 5.32, por sua

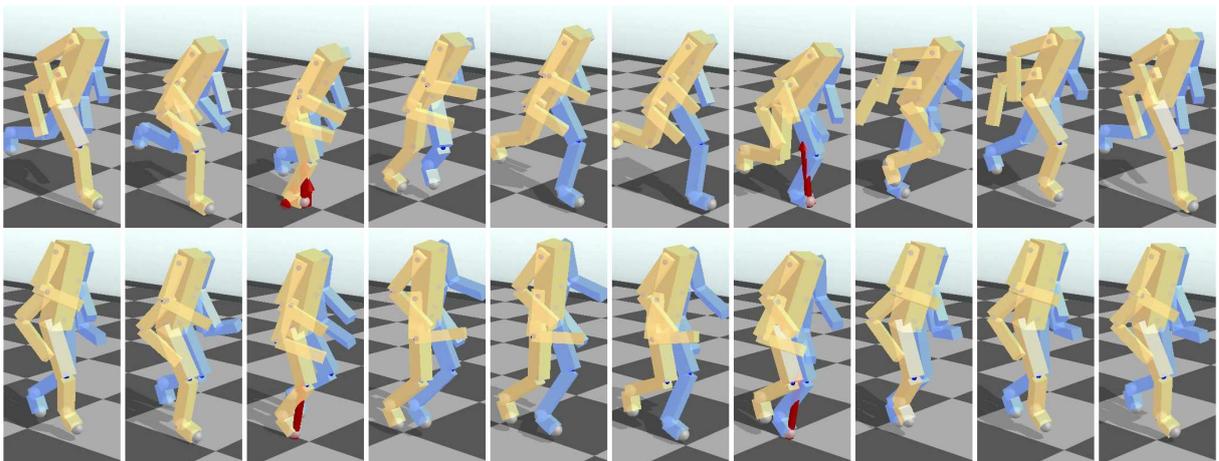


Figura 5.32: Comparação entre os resultados otimizados dos exemplos com o monstro bípede correndo. Em cima, movimentação regular dos braços. Em baixo, movimentação cruzada dos braços.

vez, compara as respectivas locomoções otimizadas.

5.5.2 Canguru

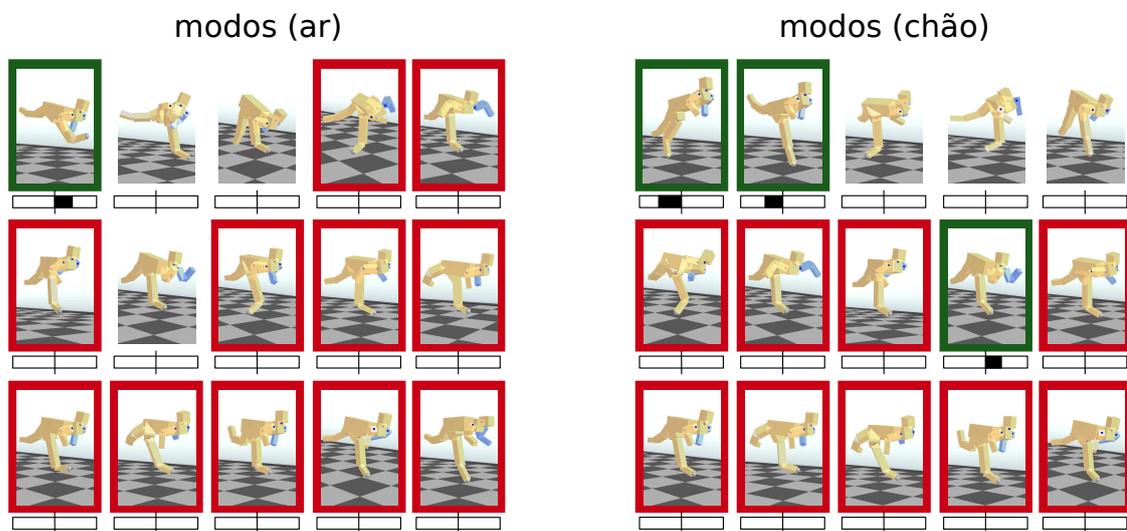


Figura 5.33: Especificação dos modos para o exemplo do canguru saltando.

O terceiro personagem utilizado, semelhante a um canguru, é especificado com o intuito de testar a técnica proposta também aplicada a um personagem que apresente características morfológicas mais notoriamente diferentes. O objetivo aqui é mostrar que, independente de quão topologicamente diferente o personagem seja, a técnica é diretamente aplicável, pois a paleta disponibilizada para o animador é automaticamente adaptada ao personagem específico definido. Essa generalização permite que novas criaturas, até mesmo imaginárias, possam

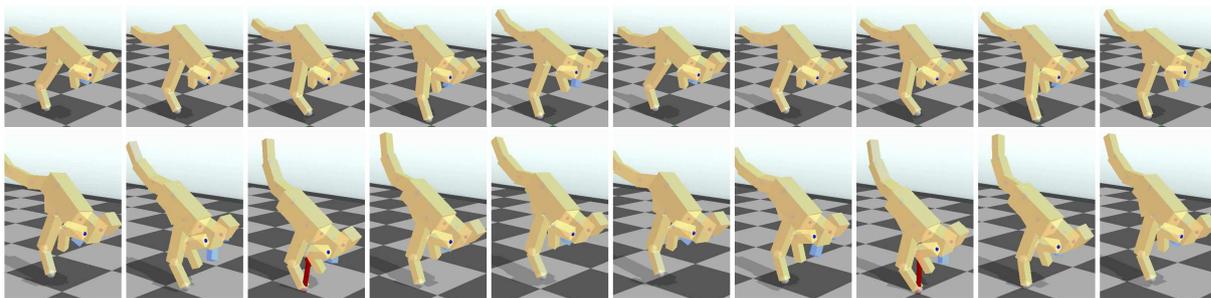


Figura 5.34: Em cima, esboço produzido para o exemplo do canguru saltando. Em baixo, locomoção final correspondente, resultante da otimização do controlador.

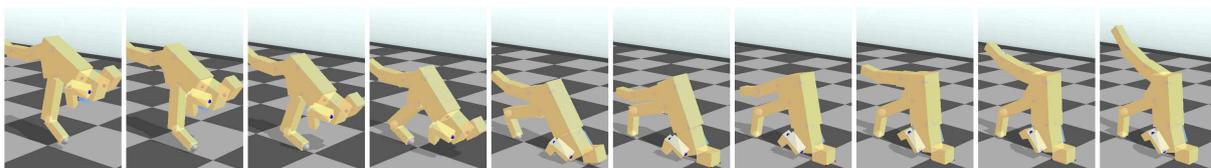


Figura 5.35: Simulação física do canguru utilizando o controlador inicial e considerando o efeito da gravidade.

ser igualmente simuladas. A vantagem do uso dos modos de vibração é que mesmo que o animador não tenha ideia da maneira como o novo personagem deveria se locomover, os próprios modos correspondem à maneira natural de locomoção da estrutura criada, permitindo aflorar a percepção, a intuição e até mesmo a criatividade do animador.

Note que este personagem possui apenas um pé e, assim como no exemplo do personagem bípede humanoide saltando em um pé só, a máquina de estados é automaticamente adaptada de acordo com a especificação do personagem e possui apenas dois estados. Também nesse caso, apenas alguns poucos modos foram utilizados para que o esboço fosse produzido (Figura 5.33). A Figura 5.34 compara o esboço produzido e sua respectiva locomoção otimizada, enquanto a Figura 5.35 ilustra sua simulação física utilizando o controlador inicial e considerando o efeito da gravidade.

5.6 Diferentes Variações da Técnica Proposta

Nesta seção, a fim de avaliar importantes características da técnica proposta, ela é comparada com duas variações alternativas da sua versão original: tanto em relação à base vetorial utilizada para definir os torques ativos aplicados pelos personagens, quanto em relação à seleção dos modos permitidos.

5.6.1 Base Utilizada para Representar os Torques

A fim de justificar o uso das coordenadas modais para representar os torques ativos, uma primeira variação da técnica proposta é definida apenas substituindo a base utilizada para representá-los. Portanto, ao invés de usar coordenadas modais, essa primeira nova versão alternativa representa os torques ativos em coordenadas das juntas, através da base canônica. Note que, enquanto a versão original disponibiliza uma paleta de oscilações naturalmente coordenadas e dinamicamente independentes para que o animador seja capaz de guiar a locomoção desejada através de um esboço definido pela combinação dos modos de vibração do personagem, as oscilações individuais das juntas não são igualmente apropriadas para tal interface proposta, por serem dinamicamente acopladas e não intuitivas. Assim, tal paleta somente é viável devido à natureza dos modos de vibração, e portanto não é usada nessa nova versão. O novo experimento é realizado usando o personagem bípede humanoide, o mesmo usado no exemplo básico de locomoção (Seção 5.2).

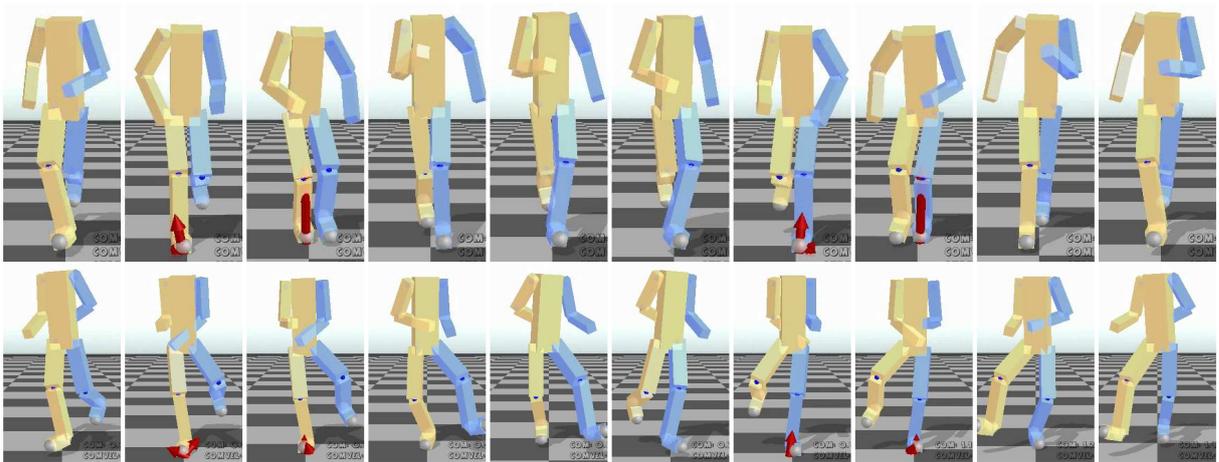


Figura 5.36: Comparação entre o resultado otimizado do exemplo de corrida básico obtido usando a versão original e o resultado otimizado obtido usando a primeira nova versão alternativa. Em cima, resultado da técnica proposta, com torques definidos através da base modal. Embaixo, resultado obtido com torques definidos através da base canônica. O esboço não é considerado no segundo caso.

A Figura 5.36 compara o resultado otimizado do exemplo básico de locomoção obtido usando a versão original e o resultado otimizado obtido usando essa nova versão aqui descrita. Note que o controle sobre a locomoção resultante otimizada, fornecido ao animador através da especificação da paleta das vibrações, é perdido quando se usa a base canônica para representar os torques. Comparando os dois resultados otimizados, pode-se perceber que enquanto uma locomoção otimizada válida ainda pode ser obtida usando a base canônica, ela não necessariamente corresponderá a um estilo de locomoção desejado ou até mesmo

reconhecível.

Esse experimento também aponta perspectivas promissoras de que o uso da base modal reduzida, composta apenas pelos modos permitidos, possibilita que a otimização obtenha melhores locomoções mais rapidamente, quando comparado ao uso da base canônica completa. Nesse caso, dizer que uma locomoção é melhor significa melhor avaliá-la levando em consideração tanto o seu desempenho e a sua eficiência energética, quanto a sua obediência às restrições cíclicas. Entretanto, experimentos mais elaborados precisam ser realizados a fim de demonstrar essa hipótese mais claramente.

Tabela 5.1: Comparação entre as dimensões dos espaços de busca utilizados nos diferentes experimentos realizados em cada uma das fases da locomoção (ar/chão).

Experimentos	Prioritários (a/c)	Permitidos (a/c)	Base canônica (a/c)
bípede (corrida básica)	3/4	5/7	30/30
bípede (balanço lateral)	3/3	5/6	30/30
bípede (rotação vertical)	3/4	5/7	30/30
bípede (saltitar)	3/8	5/10	30/30
bípede (aleatório 1)	3/4	8/8	30/30
bípede (aleatório 2)	2/3	6/7	30/30
bípede (agachado)	3/5	5/8	30/30
bípede (pernas afastadas)	3/4	5/7	30/30
bípede (em um pé só)	2/5	6/8	30/30
monstro	3/4	5/7	42/42
canguru	1/3	4/6	36/36
bípede (base canônica)	-	-	30/30
bípede (seleção trivial)	3/4	12/12	30/30

A Tabela 5.1 também apresenta um forte indício para essa hipótese ao comparar as dimensões dos espaços de busca utilizados em cada processo de otimização referente aos diferentes experimentos descritos neste capítulo, tanto como de fato é ao usar a técnica proposta quanto como supostamente seria ao usar a base canônica. Por questão de simplicidade, apenas as dimensões correspondentes à representação dos torques ativos são informadas. Mais especificamente, para cada fase da locomoção, a Tabela 5.1 informa: quantos modos foram selecionados como prioritários, quantos modos foram selecionados como permitidos, e quantos torques individuais seriam otimizados caso fossem representados usando a base canônica. Note que o espaço de busca é muito menor quando otimizando apenas os modos permitidos, ao invés de otimizar todos os torques individuais usando a base canônica completa. Isso é possível porque apenas um pequeno número de modos de vibração de mais baixas frequências pode satisfatoriamente representar locomoções mais eficientes do ponto de vista de gasto de energia.

Consequentemente, a maioria dos modos de mais altas frequências pode ser facilmente excluída da otimização.

5.6.2 Modos Permitidos

A segunda variação da técnica proposta é bastante simples, e corresponde à maneira como os modos permitidos são selecionados. Ao invés de deixar para o animador a tarefa de escolher quais modos devem fazer parte da otimização, um simples procedimento automático é definido a fim de escolher os m primeiros modos em cada estado como sendo os modos permitidos. Na versão original, além de reduzir o espaço de busca, a exclusão de modos específicos (marcados de vermelho) também permite ao animador impedir o uso de alguns movimentos particularmente indesejados. Como mencionado anteriormente, isso pode ser interpretado como uma ferramenta adicional de controle direta e intuitiva, com a qual o animador é capaz de facilmente restringir as locomoções otimizadas resultantes.

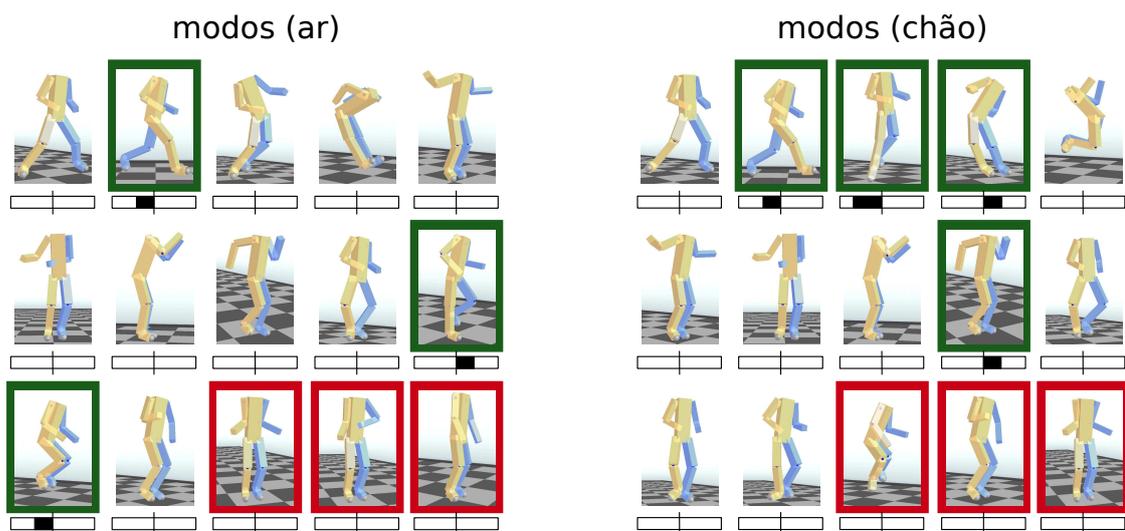


Figura 5.37: Especificação dos modos para o exemplo de corrida básico, mas selecionando os doze primeiros modos de cada estado como os modos permitidos.

A fim de avaliar essa característica da técnica proposta, o exemplo básico de locomoção usando o personagem bípede humanoide é novamente realizado, mas dessa vez considerando os doze primeiros modos em cada estado como sendo os modos permitidos. A Figura 5.37 corresponde à especificação dos modos referente a esse novo simples experimento. Comparando os resultados otimizados (Figura 5.38), pode-se observar que tal seleção trivial dos modos permitidos não restringe a locomoção otimizada resultante da maneira desejada. Portanto, pode-se concluir que deixar a escolha dos modos permitidos como responsabilidade

exclusiva do animador é uma alternativa bastante interessante, pois assim o animador possui mais controle para guiar a otimização em direção ao resultado desejado.

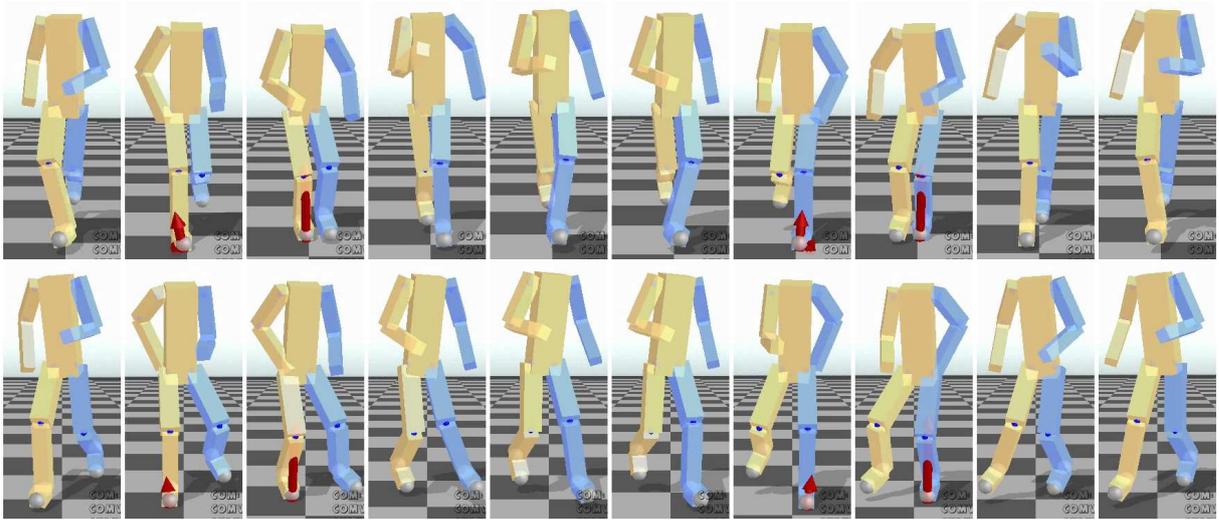


Figura 5.38: Comparação entre dois resultados otimizados do exemplo de corrida básico. Em cima, resultado da técnica proposta, na qual o animador seleciona os modos permitidos. Embaixo, resultado do caso em que os doze primeiros modos de cada fase são selecionados como os modos permitidos. Note que, embora o mesmo esboço seja produzido nos dois casos, os resultados otimizados são diferentes porque os modos permitidos selecionados são diferentes.

Por outro lado, quando os modos permitidos são compostos apenas pelos modos prioritários, o otimizador pode encontrar dificuldades para obter uma locomoção cíclica. Isso acontece porque o espaço de busca disponível pode não ser suficiente para que o otimizador seja capaz de encontrar um resultado válido. Entretanto, como resumidamente mostrado na Tabela 5.1, para que os experimentos realizados sejam bem sucedidos, apenas poucos modos permitidos extras, além dos modos prioritários, são necessários. Também é importante ressaltar que esses modos permitidos extras que foram escolhidos para cada um dos experimentos realizados não representam as únicas soluções admissíveis. De fato, neste trabalho, a seleção dos modos permitidos nem mesmo é considerada como um problema a ser resolvido, e sim como simplesmente parte da especificação da locomoção desejada a ser realizada pelo animador.

5.7 Aspectos de Implementação

Neste trabalho, o sistema de animação implementado foi programado em C++, utilizando: a biblioteca Open Dynamics Engine (ODE) [ODE 2012], tanto para realizar a simulação dinâmica quanto para detectar colisões; o código fonte da técnica de otimização CMA [Hansen 2006],

disponibilizado em [CMA-ES 2012], para realizar cada otimização individual; a biblioteca *FOX toolkit* [FOX 2012], para criar a interface gráfica; e a biblioteca *OpenGL*, para renderizar os quadros da animação.

5.7.1 Simulação Dinâmica

O motor dinâmico aberto, ODE, é utilizado para calcular e integrar as equações de movimento. Essas equações são derivadas a partir de um modelo de multiplicador de Lagrange baseado em velocidades, proposto por [Stewart e Trinkle 1996, Anitescu e Potra 1997]. Uma grande vantagem do ODE é que as equações de movimento podem ser recompiladas durante a simulação. Assim, corpos e juntas podem ser adicionados, removidos ou alterados durante a simulação dinâmica. Isso inclui também as juntas de contato, as quais são usadas para determinar as forças de reação do chão, quando o pé do personagem toca o chão. Assim, à medida que as colisões são detectadas ou desfeitas, essas juntas de contato podem ser alteradas facilmente em tempo de execução. Essa vantagem torna o ODE mais flexível do que outros simuladores dinâmicos, em que as equações de movimento só podem ser compiladas antes da simulação dinâmica.

O ODE utiliza um integrador semi-implícito de primeira ordem, onde algumas forças (forças de restrição das juntas) são calculadas como se um integrador implícito estivesse sendo utilizado e outras forças (forças externas aplicadas pelo ambiente e torques aplicados nas juntas) são calculadas como se o integrador fosse explícito. Imprecisão numérica em integradores implícitos geralmente é manifestada como uma redução de energia, ou seja, o erro causado pelo integrador tende a “amortecer” o sistema. Imprecisão numérica em integradores explícitos geralmente causa um efeito oposto, aumentando a energia do sistema. Conseqüentemente, integradores explícitos possuem uma maior tendência a instabilidades mais perceptíveis, podendo levar o sistema a se afastar ilimitadamente da solução. Como as forças aplicadas pelos controladores são tratadas pelo ODE explicitamente, o sistema pode tornar-se instável quando forças muito grandes são aplicadas. Entretanto, os torques ativos aplicados nas juntas são limitados através da definição de uma restrição considerada na otimização, a fim de evitar essas instabilidades numéricas. Note que essa restrição é razoável já que animais reais também exercem forças dentro de um certo limite, dependendo da capacidade de seus músculos. Entretanto, apesar da possibilidade de instabilidades, o integrador utilizado pelo ODE é bastante estável, comparado a outros simuladores, e erros numéricos geralmente não crescem fora de controle. As equações de movimento são integradas utilizando um incremento de tempo fixo equivalente a 0.0005s a cada iteração da simulação dinâmica.

Limites definindo intervalos admissíveis de deslocamentos angulares para as juntas também são definidos para os personagens utilizados. Quando esses limites, escolhidos pelo animador, são violados durante a simulação dinâmica, torques são aplicados a fim de trazer as juntas de volta para seus intervalos válidos. Esses torques são calculados através de controladores PD. Limites para juntas humanas foram obtidos a partir de experimentos realizados pela NASA, e são fornecidos em [NASA 2012].

5.7.2 Detecção de Colisões

O ODE também fornece um detector de colisões, que é utilizado para determinar quais geometrias estão em contato em cada iteração. Esse detector de colisões é baseado no solucionador LCP de Dantzig descrito por Baraff, embora o ODE implemente uma aproximação mais rápida do modelo de fricção de Coulomb. A complexidade média deste detector de colisões para testar a interseção entre n objetos é $O(n)$ [ODE 2012]. Todos os corpos dos personagens utilizados possuem o formato de simples paralelepípedos retos. Entretanto, como pode-se verificar na Figura 5.1, duas esferas são incluídas para cada pé do personagem, representando a ponta do pé e o calcanhar. Assim, para detectar o contato entre um pé e o chão, tanto o paralelepípedo quanto as duas esferas localizadas em suas extremidades são levados em conta. A principal motivação para o uso dessas esferas é apenas facilitar a definição de algumas das restrições usadas na otimização.

A fim de facilitar o controle e evitar instabilidades na simulação, colisões entre corpos pertencentes a um mesmo personagem são ignoradas. Na verdade, ainda para facilitar o controle e também para acelerar a detecção de colisões, apenas são consideradas as colisões entre o pé correspondente ao estado ativo e o chão. Portanto, para bípedes, quando um estado correspondente ao outro pé torna-se ativo, a possibilidade de colisão entre o chão e esse novo pé ativo é habilitada, enquanto que para o pé anteriormente ativo, essa possibilidade de colisão é desabilitada. Isso permite que qualquer parte do personagem, com exceção do seu pé de apoio, possa penetrar no chão. Entretanto, isso é facilmente evitado através das restrições impostas na otimização.

5.7.3 Otimização

A técnica proposta não é particularmente sensível à seleção dos valores iniciais dos parâmetros de controle, Ω . Entretanto, para cada personagem, valores iniciais razoáveis são atribuídos: para o período total do ciclo, T ; para as durações dos impulsos em cada fase, δs ; e para a altura

e a velocidade na direção do eixo x global iniciais do corpo raiz. A razão entre a duração do estado do ar e o período total do ciclo, α , também é inicializada com um valor diferente de zero, $\alpha = 0.5$. Todos os parâmetros restantes são inicializados com zero.

Note que bípedes simétricos permitem uma redução no número de parâmetros de controle e no tempo de avaliação de cada controlador porque os parâmetros usados para os estados correspondentes ao segundo pé são definidos por simetria a partir dos parâmetros correspondentes ao primeiro pé (i.e., τ , δ , e α). Enquanto δ^a , δ^c e α são repetidos, τ^a e τ^c são refletidos. Além disso, o período total de T segundos é dividido igualmente, de modo que a fase de cada pé dure exatamente $T/2$ segundos. Assim, apenas a metade do período é suficiente para avaliar cada controlador. Note também que o estado do personagem obtido no instante $T/2$ segundos, $\mathbf{q}_{T/2}$ e $\dot{\mathbf{q}}_{T/2}$, também deve ser refletido antes de ser comparado com o estado inicial, para que uma locomoção resultante cíclica possa ser obtida.

Assim como o esboço gerado pelo animador pode ser visualizado em tempo real, uma vez que o controlador é otimizado, a simulação dinâmica da locomoção otimizada resultante também pode ser realizada em tempo real. Entretanto, enquanto controladores já otimizados podem ser executados em tempo real, o processo completo de cada otimização leva bastante tempo para ser realizado. Para realizar cada otimização sem restrições, usando CMA, é necessário em média aproximadamente 1 hora. Além disso, para otimizar completamente uma locomoção, o MoM pode realizar até 20 otimizações individuais, o que significa que uma otimização completa para obter uma locomoção otimizada final pode levar até 20 horas. Por outro lado, CMA permite que a otimização possa ser facilmente executada em paralelo, reduzindo significativamente o tempo de otimização. Note que isso depende da dimensão do espaço de busca, que CMA usa para automaticamente definir o número de avaliações por iteração do método. Por exemplo, se um *cluster* for usado para resolver um problema de otimização com 90 parâmetros, até 17 nós (processadores) podem ser executados simultaneamente. Porém, apesar da estrutura favorável ao paralelismo fornecida pelo método CMA, os resultados mostrados neste trabalho não são obtidos através de otimizações realizadas em paralelo. Isso é deixado como trabalho futuro. A implementação atual apenas permite que diferentes locomoções possam ser simultaneamente otimizadas em diferentes computadores, inclusive através de acesso remoto. Este trabalho utiliza o código fonte da técnica de otimização CMA [Hansen 2006], disponibilizado em [CMA-ES 2012].

5.7.4 Equilíbrio

Note que os controladores otimizados resultantes são de laço aberto, pois não possuem sensores para continuamente corrigir o ciclo da locomoção. Portanto, embora que o estado final da locomoção resultante seja bastante próximo ao estado inicial, como imposto por restrições definidas na otimização, por menor que seja essa diferença entre os estados inicial e final no primeiro ciclo simulado, ela tende a crescer rapidamente a cada ciclo devido à natureza dinâmica instável dos personagens utilizados, resultando em uma locomoção igualmente instável. Como o controlador não é capaz de corrigir essa diferença, após alguns poucos passos o personagem tende a perder o equilíbrio e a cair no chão.

Enquanto utilizar uma estratégia de equilíbrio adequada [Coros et al. 2010, Wang et al. 2012] seria interessante, obter um controlador de laço fechado capaz de produzir uma locomoção continuamente estável está fora do escopo deste trabalho. A técnica proposta tem como objetivo principal investigar a geração de locomoção através do uso dos modos de vibração, e o equilíbrio é apenas garantido durante o tempo de avaliação do controlador: período total do ciclo (ou meio período, no caso de bípedes simétricos). Portanto, neste trabalho, para permitir que as locomoções resultantes sejam visualizadas durante períodos mais longos, uma solução bastante simples e eficaz, porém fisicamente incorreta, é usada. O estado do personagem é cinematicamente interpolado no final de cada ciclo, a fim de obter **exatamente** o mesmo estado inicial do personagem, no exato instante final do ciclo, com exceção da posição do corpo raiz referente ao eixo x global. Embora apenas uma pequena modificação no estado do personagem seja realizada, geralmente imperceptível para o animador, ela é suficiente para garantir que essa diferença não cresça a cada ciclo.

5.8 Considerações Finais

Este capítulo apresenta vários experimentos realizados usando a técnica proposta (Capítulo 4), de acordo com diferentes abordagens de avaliação. Inicialmente, o primeiro personagem definido, um bípede humanoide, é testado com uma pose de relaxamento fixa a fim de avaliar a influência de diferentes esboços produzidos, correspondentes a diferentes estilos de locomoção desejados. Segundo, ainda usando o mesmo personagem, diferentes poses de relaxamento são definidas a fim de avaliar a influência que a pose neutra possui sobre a construção do esboço e, conseqüentemente, sobre a locomoção otimizada resultante. Terceiro, outros dois personagens, um monstro bípede com quatro braços e um canguru com uma única perna, também são testados, a fim de mostrar que a técnica proposta pode ser diretamente aplicada

a personagens morfológicamente diferentes. Por último, duas variações da versão original da técnica proposta também são testadas, com o intuito de avaliar as seguintes escolhas: usar os modos de vibração para representar os torques ativos, e deixar para o animador a tarefa de selecionar individualmente quais modos devem ser otimizados.

Em todos os experimentos realizados, a locomoção resultante otimizada manteve as principais características presentes no esboço produzido, o que significa que o animador efetivamente possui controle sobre o resultado final da otimização, e não apenas sobre o esboço. Assim, apesar de a fase de otimização ser demorada, a característica interativa do controle exercido durante a fase de construção do esboço da locomoção desejada é de certa forma transmitida através da otimização. Ou seja, embora apenas a construção do esboço seja realizada em tempo real, como o controle é transmitido de maneira eficaz através da otimização, a demora da fase de otimização não necessariamente implica em um grande problema.

Uma importante característica da técnica proposta é que, em contraste com muitas outras técnicas para controlar personagens virtuais, nenhum dado de movimento de referência (i.e., quadros-chaves ou movimentos capturados) é usado para produzir os controladores resultantes. Para cada personagem e locomoção desejada, a animação resultante é derivada apenas a partir da definição de uma única pose de relaxamento e do esboço fornecido como entrada pelo animador através da interface modal.

Enquanto que definir os torques ativos na direção dos modos de vibração de mais baixas frequências naturalmente implica em um controle mais eficiente energeticamente, por causa da energia que é reutilizada através das molas passivas, uma importante justificativa para o sucesso da técnica proposta é que essas vibrações individuais apresentam pouca interferência mútua na especificação do esboço da locomoção desejada, devido às suas propriedades ortogonais. Esse fenômeno é chave no controle da aparência visual da locomoção resultante, realizado através da combinação dessas vibrações individuais, porque permite que a base modal forneça uma paleta intuitiva de movimentos básicos que podem ser selecionados independentemente por um determinado usuário. Mesmo após a otimização, já que essas vibrações são dinamicamente independentes, elas ainda aparecem com pouca interferência mútua também na locomoção resultante. Dessa maneira, o animador possui um controle de alto nível, definido através da especificação das vibrações mostradas na paleta modal, em que a essência da locomoção desejada, presente no esboço passado como entrada pelo animador, é naturalmente preservada pelo sistema durante o passo de otimização. A locomoção otimizada resultante, por sua vez, automaticamente passa a funcionar em um ambiente fisicamente correto, ainda apresentando tais características desejadas, intuitivamente identificadas na paleta pelo animador.

Uma importante vantagem da abordagem de otimização usada, em que uma simulação dinâmica do personagem é realizada para cada amostragem do espaço de busca, é que contatos com o chão não precisam ser explicitamente tratados na otimização. Em contraste com abordagens baseadas em *spacetime constraints*, em que a especificação de restrições de contato com o chão é exigida e geralmente complicada, neste trabalho, os contatos espontaneamente surgem a partir da simulação dinâmica direta. Além disso, gerar a locomoção diretamente a partir de uma simulação dinâmica permite definir um espaço de busca que já é convenientemente constituído apenas por trajetórias fisicamente corretas. A desvantagem da abordagem de otimização usada é que geralmente o resultado otimizado leva mais tempo para ser obtido do que em abordagens baseadas em *spacetime constraints*. Note que, como a função objetivo não é uma função explícita dos parâmetros de otimização, obter informações de gradiente para ajudar a guiar melhor o otimizador no espaço de busca é complicado e não vale a pena. Entretanto, enquanto abordagens baseadas em *spacetime constraints* geralmente exigem a especificação de uma amostra inicial adequada, a abordagem de otimização usada neste trabalho é capaz de encontrar soluções adequadas de locomoção mesmo a partir de amostras iniciais inapropriadas, evitando assim o problema de ter que fornecer uma amostra inicial viável.

6 *Conclusão e Trabalhos Futuros*

Enquanto gerar trajetórias indiretamente através de uma simulação física dos personagens permite que locomoções resultantes sejam automaticamente coerentes com as leis da física, controlar adequadamente os torques a serem aplicados internamente por esses personagens, a fim de produzir uma locomoção desejada específica, é ainda bastante difícil. Essa dificuldade é principalmente devido à relação de dependência entre o controle funcional do personagem simulado e o controle da aparência e do estilo da locomoção indiretamente produzida. Ou seja, guiar uma locomoção fisicamente simulada com o intuito de que ela apresente características visuais específicas geralmente exige o tratamento simultâneo dos aspectos funcionais envolvidos, tais como o tratamento de equilíbrio.

Embora esse problema de controle ainda permaneça bastante desafiador, este trabalho corresponde a um importante passo na direção de facilitar a descrição e o controle de locomoções de personagens articulados arbitrários, através do uso de seus modos naturais de vibração para representar os torques internamente aplicados. De fato, as oscilações correspondentes aos modos de vibração de mais baixas frequências do personagem apresentam semelhanças com locomoções familiares, tais como correr e saltitar, as quais foram testadas neste trabalho. Os resultados obtidos demonstram que os modos de vibração de mais baixas frequências correspondem a uma excelente base para representar o controle, a fim de descrever e construir locomoções desejadas de maneira eficiente energeticamente.

Vários exemplos foram testados para validar as ideias propostas neste trabalho e os resultados foram bastante satisfatórios. Entretanto, a técnica proposta ainda pode ser mais explorada para outros tipos de locomoção, personagens e ambientes. Possíveis testes seriam simular personagens bípedes caminhando, simular personagens quadrúpedes trotando ou galopando, e simular personagens em ambientes aquáticos [Tan et al. 2011], por exemplo. Embora a ideia da técnica proposta quanto ao uso das vibrações naturais seja geral para qualquer tipo de locomoção, personagem ou ambiente, a estrutura do controlador utilizada limita a aplicação da técnica para personagens terrestres, e para locomoções de corrida em que apenas uma perna do personagem pode manter contato com o chão de cada vez. Entretanto,

vários aspectos podem ser considerados para melhorar essa estrutura de controle, a qual foi definida propositalmente de maneira simplificada com o intuito tanto de gerar um problema de otimização viável quanto de evidenciar a contribuição específica do uso dos modos de vibração. Por exemplo, em cada fase da locomoção, cada modo de vibração poderia ser excitado em instantes diferentes e durante intervalos de tempo diferentes, o que significaria incluir dois novos parâmetros de tempo para cada *modo permitido*. Outra ideia seria definir as transições da máquina de estados baseadas em sensores paramétricos, como em [Nunes et al. 2007], ao invés de usar apenas transições baseadas em tempo. Diferentes formas para o trem de pulsos usado para a aplicação dos impulsos também poderiam ser testadas. Ao invés de pulsos retangulares, pulsos mais suaves poderiam ser definidos.

Também relacionado à generalização do controle, o otimizador apresentou dificuldades em encontrar locomoções cíclicas apropriadas para personagens bípedes assimétricos, provavelmente devido à necessidade de considerar dois passos do personagem ao avaliar cada amostragem do espaço de busca, ao invés de apenas um. Para simular personagens quadrúpedes galopando, por exemplo, em que cada passo do personagem é claramente assimétrico, essa dificuldade do otimizador deveria ser obrigatoriamente tratada. As restrições fáceis usadas provavelmente também precisariam ser redefinidas para tratar personagens bípedes ou quadrúpedes assimétricos.

Assim como novos personagens podem ser definidos de acordo com a organização de suas estruturas articuladas, através da inclusão ou exclusão de corpos, como feito na Seção 5.5, seria interessante também testar novos personagens definidos através de modificações mais simples, que não alteram a topologia do personagem. Portanto, uma outra direção bastante interessante de trabalho futuro seria testar como tais modificações no personagem influenciam os seus modos de vibração e, conseqüentemente, a sua locomoção resultante. Tais modificações incluem definir corpos específicos com diferentes dimensões e diferentes massas, e definir juntas específicas com diferentes rigidezes passivas, as quais são responsáveis por definir suas propriedades elásticas. Isso permitiria testar a influência de importantes aspectos relacionados à locomoção, bastante discutidos no Capítulo 1. Dois personagens humanoides, um alto e magro e outro baixo e gordo, por exemplo, poderiam ser simulados com o intuito de testar se a técnica proposta seria capaz de considerar automaticamente essas diferenças mais sutis em suas respectivas locomoções resultantes.

Para facilitar a especificação de tais novos personagens, seria bastante conveniente que a interface com o animador fosse melhorada para permitir que ele pudesse visualizar, em tempo real, como as modificações realizadas na estrutura e nas propriedades do personagem

influenciariam os seus modos de vibração e o esboço sendo produzido. Assim, a nova interface deveria permitir, de maneira fácil e interativa, a inclusão e a exclusão de corpos no personagem, a especificação das propriedades dos seus corpos e das suas juntas, e a definição da sua pose de relaxamento através das orientações globais dos seus corpos.

Além disso, seria interessante incorporar uma estratégia de equilíbrio adequada, fisicamente correta, à técnica proposta. Para isso, sensores apropriados deveriam ser adicionados aos personagens a fim de permitir que a trajetória da locomoção fosse corrigida a cada ciclo. [Coros et al. \[2010\]](#) mostram que usar estratégias de equilíbrio baseadas em forças virtuais, aplicadas no personagem através das transpostas de matrizes Jacobianas (Figura 3.4), continuamente calculadas em cada passo da simulação, podem resultar em locomoções bastante robustas.

Note que uma importante propriedade do uso dos modos de vibração no controle de personagens é tornar o controle independente do número de graus de liberdade (*degrees of freedom, DOFs*) do personagem. Entretanto, embora a representação dos torques dependa apenas do número de *modos permitidos* selecionados pelo animador, tanto o estado inicial, definido como parte dos parâmetros de controle, quanto a simulação física do personagem envolvem todos os seus DOFs, impedindo que locomoções adequadas para personagens com muitos DOFs sejam obtidas pela otimização. Trabalhos futuros, capazes de definir tanto o estado inicial quanto a simulação física do personagem também usando apenas os *modos permitidos*, deveriam conseguir gerar locomoções para personagens com muitos DOFs sem problemas. Assim, as várias articulações da coluna do personagem, por exemplo, poderiam ser consideradas de uma maneira bastante eficiente. Teoricamente, locomoção de personagens compostos por malhas deformáveis, como em [[Jain e Liu 2011](#), [Tan et al. 2012](#)], também poderiam se beneficiar do uso de modos de vibração. Trabalhos futuros com o objetivo de realizar testes de otimização mais detalhados também ajudariam a mostrar mais claramente o quanto usar modos de vibração facilitam o processo de otimização. Essa facilitação da otimização está especificamente relacionada ao tempo exigido para que uma locomoção adequada, suficientemente cíclica e energeticamente eficiente, seja obtida para um determinado personagem.

É também interessante notar que, embora os modos naturais de vibração calculados, devido às simplificações lineares consideradas na análise modal, sejam teoricamente válidos apenas para pequenos deslocamentos a partir da pose de relaxamento definida, na prática, os resultados apresentados neste trabalho demonstram que o uso de tais vibrações locais é ainda capaz de produzir uma grande variedade de controladores de locomoção, através de otimização. Mesmo simulando sistemas dinâmicos altamente não lineares, como as estruturas

definidas para representar os personagens utilizados, essas vibrações lineares consistem em um espaço de controle bastante útil, que pode ser adequadamente reduzido para facilitar o processo de otimização realizado. Jain e Liu [2011b] tratam a não linearidade de estruturas articuladas de maneira mais aproximada, recalculando os modos de vibração em cada instante da simulação, embora movimentos de referência fisicamente corretos sejam exigidos para um bom funcionamento da técnica. Usar essa ideia de atualizar continuamente os modos, sem a necessidade de usar movimentos de referência, pode ser também interessante para trabalhos futuros.

Embora decisões de projeto específicas tenham sido tomadas na construção do *framework* proposto neste trabalho, a ideia do uso das vibrações naturais dos personagens para gerar locomoção eficiente não é limitada às escolhas que foram realizadas. Com a consciência de que muitos outros testes ainda precisam continuar sendo realizados, acredita-se que este trabalho consiste em um avanço importante para encorajar o surgimento de novas abordagens para o uso de vibrações naturais no controle de personagens, com o intuito de melhorar a qualidade e eficiência de locomoções baseadas em física.

Finalmente, considerando o fato de que animais claramente possuem propriedades elásticas que favorecem suas locomoções, tem-se disponível um excelente modelo que permite que novas teorias possam ser exploradas no controle de personagens. Portanto, é bastante interessante que pesquisas envolvendo diferentes áreas continuem sendo realizadas, a fim de melhorar o entendimento sobre como a dinâmica natural de animais, tanto reais quanto imaginários, devem influenciar no surgimento e na adaptação de suas locomoções. Mais especificamente, este trabalho indica que explorar a teoria das vibrações no controle de locomoções é uma direção de pesquisa bastante promissora, em que vale a pena investir.

Referências Bibliográficas

- [Abe et al. 2007] Abe, Y.; Silva, M. da; Popović, J. Multiobjective control with frictional contacts. In: *Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*. Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association, 2007. (SCA '07), p. 249–258. ISBN 978-1-59593-624-0. Disponível em: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1272690.1272724>.
- [Alexander 1988] Alexander, R. M. *Elastic Mechanisms in Animal Movement*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1988.
- [Alexander 1996] Alexander, R. M. *Optima for Animals*. [S.l.]: Princeton University Press, 1996.
- [Allen et al. 2007] Allen, B.; Chu, D.; Shapiro, A.; Faloutsos, P. On the beat!: timing and tension for dynamic characters. In: *Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*. Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association, 2007. (SCA '07), p. 239–247. ISBN 978-1-59593-624-0. Disponível em: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1272690.1272723>.
- [Anitescu e Potra 1997] Anitescu, M.; Potra, F. A. Formulating dynamic multi-rigid-body contact problems with friction as solvable linear complementarity problems. *Nonlinear Dynamics*, v. 14, p. 231–247, 1997.
- [Armstrong e Green 1985] Armstrong, W. W.; Green, M. W. The dynamics of articulated rigid bodies for purposes of animation. *The Visual Computer*, v. 1, n. 4, p. 231–240, 1985.
- [Auslander et al. 1995] Auslander, J.; Fukunaga, A.; Partovi, H.; Christensen, J.; Hsu, L.; Reiss, P.; Shuman, A.; Marks, J.; Ngo, J. T. Further experience with controller-based automatic motion synthesis for articulated figures. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 14, n. 4, p. 311–336, out. 1995. ISSN 0730-0301. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/225294.225295>.
- [Barbic et al. 2009] Barbic, J.; Silva, M. da; Popović, J. Deformable object animation using reduced optimal control. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 28, p. 53:1–53:9, July 2009. ISSN 0730-0301. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1531326.1531359>.
- [Biasi e Gattass 2002] Biasi, S. C. de; Gattass, M. *Utilização de quatérnios para representação de rotações em 3D*. [S.l.], 2002. Disponível em: <http://www.tecgraf.puc-rio.br/~mgattass/Quaternios.pdf>.
- [Choi e Ko 2005] Choi, M. G.; Ko, H.-S. Modal warping: Real-time simulation of large rotational deformation and manipulation. *IEEE Transactions on Visualization and*

- Computer Graphics*, IEEE Educational Activities Department, Piscataway, NJ, USA, v. 11, n. 1, p. 91–101, jan. 2005. ISSN 1077-2626. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/TVCG.2005.13>.
- [Cline 1999] Cline, M. B. *Rigid body simulation with contact and constraints*. Dissertação (Mestrado), 1999.
- [CMA-ES 2012] Cma-es. *Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy*. 2012. Disponível em: <http://www.lri.fr/~hansen/cmaesintro.html>.
- [Collins et al. 2005] Collins, S.; Ruina, A.; Tedrake, R.; Wisse, M. Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers. *Science*, v. 307, n. 5712, p. 1082–1085, 2005. Disponível em: <http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/307/5712/1082>.
- [Collins et al. 2001] Collins, S. H.; Wisse, M.; Ruina, A. A three-dimensional passive-dynamic walking robot with two legs and knees. *The International Journal of Robotics Research*, v. 20, n. 7, p. 607–615, 2001.
- [Coros et al. 2009] Coros, S.; Beaudoin, P.; Panne, M. van de. Robust task-based control policies for physics-based characters. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 28, n. 5, p. 170:1–170:9, dez. 2009. ISSN 0730-0301. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1618452.1618516>.
- [Coros et al. 2010] Coros, S.; Beaudoin, P.; Panne, M. van de. Generalized biped walking control. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 29, p. 130:1–130:9, July 2010. ISSN 0730-0301. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1778765.1781156>.
- [Coros et al. 2008] Coros, S.; Beaudoin, P.; Yin, K. K.; Pann, M. van de. Synthesis of constrained walking skills. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 27, n. 5, p. 113:1–113:9, dez. 2008. ISSN 0730-0301. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1409060.1409066>.
- [Coros et al. 2011] Coros, S.; Karpathy, A.; Jones, B.; Reveret, L.; Panne, M. van de. Locomotion skills for simulated quadrupeds. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 30, n. 4, p. 59:1–59:12, ago. 2011. ISSN 0730-0301. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/2010324.1964954>.
- [Faloutsos et al. 1997] Faloutsos, P.; Panne, M. van de; Terzopoulos, D. Dynamic free-form deformations for animation synthesis. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, IEEE Educational Activities Department, Piscataway, NJ, USA, v. 3, n. 3, p. 201–214, jul. 1997. ISSN 1077-2626. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/2945.620488>.
- [Faloutsos et al. 2001] Faloutsos, P.; Panne, M. van de; Terzopoulos, D. Composable controllers for physics-based character animation. In: *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA: ACM, 2001. (SIGGRAPH '01), p. 251–260. ISBN 1-58113-374-X. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/383259.383287>.

- [Fang e Pollard 2003] Fang, A. C.; Pollard, N. S. Efficient synthesis of physically valid human motion. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 22, p. 417–426, July 2003. ISSN 0730-0301. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/882262.882286>.
- [Featherstone 2007] Featherstone, R. *Rigid Body Dynamics Algorithms*. Secaucus, NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 2007. ISBN 0387743146.
- [Featherstone 2012] Featherstone, R. *Spatial Vectors and Rigid-Body Dynamics*. 2012. Disponível em: <http://royfeatherstone.org/spatial/>.
- [FOX 2012] Fox. *FOX toolkit*. 2012. Disponível em: <http://www.fox-toolkit.org/>.
- [Geijtenbeek et al. 2011] Geijtenbeek, T.; Pronost, N.; Egges, A.; Overmars, M. H. Interactive character animation using simulated physics. In: John, N.; Wyvill, B. (Ed.). Llandudno, UK: Eurographics Association, 2011. p. 127–149. ISSN 1017-4656. Disponível em: <http://diglib.eg.org/EG/DL/conf/EG2011/stars/127-149.pdf>.
- [Hansen 2006] Hansen, N. The CMA evolution strategy: A comparing review. In: *Towards a New Evolutionary Computation. Advances on Estimation of Distribution Algorithms*. [S.l.]: Springer, 2006. p. 75–102.
- [Hauser et al. 2003] Hauser, K. K.; Shen, C.; O'brien, J. F. Interactive deformation using modal analysis with constraints. In: CIPS, CANADIAN HUMAN-COMPUTER COMMUNICATION SOCIETY. *Graphics Interface*. 2003. p. 247–256. Disponível em: [http://graphics.cs.berkeley.edu/papers/Hauser- IDU-2003-06/](http://graphics.cs.berkeley.edu/papers/Hauser-IDU-2003-06/).
- [Hecker et al. 2008] Hecker, C.; Raabe, B.; Enslow, R. W.; Dewese, J.; Maynard, J.; Prooijen, K. van. Real-time motion retargeting to highly varied user-created morphologies. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 27, n. 3, p. 27:1–27:11, ago. 2008. ISSN 0730-0301. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1360612.1360626>.
- [Hodgins e Pollard 1997] Hodgins, J. K.; Pollard, N. S. Adapting simulated behaviors for new characters. In: *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997. (SIGGRAPH '97), p. 153–162. ISBN 0-89791-896-7. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1145/258734.258822>.
- [Hodgins et al. 1995] Hodgins, J. K.; Wooten, W. L.; Brogan, D. C.; O'brien, J. F. Animating human athletics. In: *Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA: ACM, 1995. (SIGGRAPH '95), p. 71–78. ISBN 0-89791-701-4. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/218380.218414>.
- [Jain e Liu 2011] Jain, S.; Liu, C. K. Controlling physics-based characters using soft contacts. *ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH Asia)*, ACM, New York, NY, USA, v. 30, p. 163:1–163:10, dez. 2011. ISSN 0730-0301. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/2070781.2024197>.
- [Jain e Liu 2011] Jain, S.; Liu, C. K. Modal-space control for articulated characters. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 30, n. 5, p. 1–12, 2011.
- [Jain et al. 2009] Jain, S.; Ye, Y.; Liu, C. K. Optimization-based interactive motion synthesis. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 28, n. 1, p. 10:1–10:12, fev. 2009. ISSN 0730-0301. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1477926.1477936>.

- [James e Pai 2002] James, D. L.; Pai, D. K. Dyrtr: dynamic response textures for real time deformation simulation with graphics hardware. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 21, p. 582–585, July 2002. ISSN 0730-0301. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/566654.566621>.
- [Kalisiak 2002] Kalisiak, M. *Toward Virtual Actors*. 2002. Depth exam paper. Disponível em: <http://www.dgp.toronto.edu/~mac/pubs/index.html>.
- [Kane e Levinson 2000] Kane, T.; Levinson, D. *Dynamics Online: Theory and Implementation with AUTOLEV*. OnLine Dynamics, 2000. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=7LUfcgAACAAJ>.
- [Kry et al. 2009] Kry, P. G.; Reveret, L.; Faure, F.; Cani, M. P. Modal locomotion: Animating virtual characters with natural vibrations. *Computer Graphics Forum*, v. 28, n. 2, p. 289–298, 2009.
- [Kwon e Hodgins 2010] Kwon, T.; Hodgins, J. Control systems for human running using an inverted pendulum model and a reference motion capture sequence. In: *Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*. Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland: Eurographics Association, 2010. (SCA '10), p. 129–138. Disponível em: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1921427.1921447>.
- [Laszlo et al. 1996] Laszlo, J.; Panne, M. van de; Eugene, F. Limit cycle control and its application to the animation of balancing and walking. In: *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA: ACM, 1996. (SIGGRAPH '96), p. 155–162. ISBN 0-89791-746-4. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/237170.237231>.
- [Liu et al. 2005] Liu, C. K.; Hertzmann, A.; Popović, Z. Learning physics-based motion style with nonlinear inverse optimization. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 24, p. 1071–1081, July 2005. ISSN 0730-0301. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1073204.1073314>.
- [Liu e Popović 2002] Liu, C. K.; Popović, Z. Synthesis of complex dynamic character motion from simple animations. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 21, n. 3, p. 408–416, jul. 2002. ISSN 0730-0301. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/566654.566596>.
- [Macchietto et al. 2009] Macchietto, A.; Zordan, V.; Shelton, C. R. Momentum control for balance. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 28, p. 80:1–80:8, July 2009. ISSN 0730-0301. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1531326.1531386>.
- [McGeer 1990] Mcgeer, T. Passive bipedal running. *Proceedings of The Royal Society of London. Series B, Biological Sciences (1934-1990)*, v. 240, p. 107–134, 1990.
- [McGeer 1990] Mcgeer, T. Passive dynamic walking. *Int. J. Rob. Res.*, Sage Publications, Inc., Thousand Oaks, CA, USA, v. 9, n. 2, p. 62–82, mar. 1990. ISSN 0278-3649. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/027836499000900206>.
- [Miele et al. 1972] Miele, A.; Moseley, P. E.; Levy, A. V.; Coggins, G. M. On the method of multipliers for mathematical programming problems. *Journal of Optimization Theory and Applications*, v. 10, n. 1, p. 1–33, 1972.

- [Mordatch et al. 2010] Mordatch, I.; Lasa, M. de; Hertzmann, A. Robust physics-based locomotion using low-dimensional planning. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 29, p. 71:1–71:8, July 2010. ISSN 0730-0301. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1778765.1778808>.
- [Muico et al. 2009] Muico, U.; Lee, Y.; Popović, J.; Popović, Z. Contact-aware nonlinear control of dynamic characters. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 28, p. 81:1–81:9, July 2009. ISSN 0730-0301. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1531326.1531387>.
- [Multon et al. 1999] Multon, F.; France, L.; Cani-gascuel, M.-P.; Debunne, G. Computer animation of human walking: a survey. *The Journal of Visualization and Computer Animation*, v. 10, n. 1, p. 39–54, 1999.
- [NASA 2012] Nasa. *National Aeronautics and Space Administration: Anthropometry and Biomechanics*. 2012. Disponível em: <http://msis.jsc.nasa.gov/sections/section03.htm>.
- [Ngo e Marks 1993] Ngo, J. T.; Marks, J. Spacetime constraints revisited. In: *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA: ACM, 1993. (SIGGRAPH '93), p. 343–350. ISBN 0-89791-601-8. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/166117.166160>.
- [Novacheck 1998] Novacheck, T. F. The biomechanics of running. *Gait and Posture*, v. 7, n. 1, p. 77–95, 1998.
- [Nunes 2006] Nunes, R. F. *Uma Representação Flexível de Controladores para Animação Fisicamente Realista de Personagens Virtuais*. Dissertação (Mestrado), 2006.
- [Nunes et al. 2012] Nunes, R. F.; Cavalcante-neto, J. B.; Vidal, C. A.; Kry, P. G.; Zordan, V. B. Using natural vibrations to guide control for locomotion. In: *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*. New York, NY, USA: ACM, 2012. (I3D '12), p. 87–94. ISBN 978-1-4503-1194-6. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/2159616.2159631>.
- [Nunes et al. 2007] Nunes, R. F.; Vidal, C. A.; Cavalcante-neto, J. B. Sensory state machines for physically-based animation. *Vis. Comput.*, Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA, v. 23, n. 9, p. 823–832, ago. 2007. ISSN 0178-2789. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00371-007-0161-4>.
- [Nunes et al. 2008] Nunes, R. F.; Vidal, C. A.; Cavalcante-neto, J. B.; Zordan, V. B. Simple feedforward control for responsive motion capture-driven simulations. In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Advances in Visual Computing*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. (ISVC '08), p. 488–497. ISBN 978-3-540-89638-8. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-89639-5_47.
- [ODE 2012] Ode. *Open dynamics engine*. 2012. Disponível em: <http://www.ode.org/>.
- [Owaki et al. 2011] Owaki, D.; Koyama, M.; Yamaguchi, S.; Kubo, S.; Ishiguro, A. A two-dimensional passive dynamic running biped with elastic elements. *IEEE Transactions on Robotics*, IEEE, v. 27, n. 1, p. 156–162, 2011. Disponível em: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5685293.

- [Owaki et al. 2012] Owaki, D.; Koyama, M.; Yamaguchi, S.; Kubo, S.; Ishiguro, A. *Passive Dynamic Running*. 2012. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=ob14QKIDdsM>.
- [Panne 1996] Panne, M. van de. Parameterized gait synthesis. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, USA, v. 16, p. 40–49, March 1996. ISSN 0272-1716. Disponível em: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1435699.1437355>.
- [Panne e Fiume 1993] Panne, M. van de; Fiume, E. Sensor-actuator networks. In: *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA: ACM, 1993. (SIGGRAPH '93), p. 335–342. ISBN 0-89791-601-8. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/166117.166159>.
- [Panne et al. 1994] Panne, M. van de; Kim, R.; Fiume, E. Virtual wind-up toys for animation. In: *Proceedings of Graphics Interface '94*. [S.l.: s.n.], 1994. p. 208–215.
- [Panne e Lamouret 1995] Panne, M. Van de; Lamouret, A. Guided optimization for balanced locomotion. In: *Proceedings of Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation*. [S.l.: s.n.], 1995. p. 165–177.
- [Pejsa e Pandzic 2010] Pejsa, T.; Pandzic, I. S. State of the art in example-based motion synthesis for virtual characters in interactive applications. *Computer Graphics Forum*, Wiley Online Library, v. 29, n. 1, p. 202–226, 2010. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1467-8659.2009.01591.x>.
- [Pentland e Williams 1989] Pentland, A.; Williams, J. Good vibrations: modal dynamics for graphics and animation. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 23, p. 207–214, July 1989. ISSN 0097-8930. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/74334.74355>.
- [Pentland 1990] Pentland, A. P. Automatic extraction of deformable part models. *Int. J. Comput. Vision*, Kluwer Academic Publishers, Hingham, MA, USA, v. 4, n. 2, p. 107–126, maio 1990. ISSN 0920-5691. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00127812>.
- [Popović e Witkin 1999] Popović, Z.; Witkin, A. Physically based motion transformation. In: *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1999. (SIGGRAPH '99), p. 11–20. ISBN 0-201-48560-5. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1145/311535.311536>.
- [Poulakakis et al. 2006] Poulakakis, I.; Papadopoulos, E.; Buehler, M. On the stability of the passive dynamics of quadrupedal running with a bounding gait. *Int. J. Rob. Res.*, Sage Publications, Inc., Thousand Oaks, CA, USA, v. 25, n. 7, p. 669–687, jul. 2006. ISSN 0278-3649. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/0278364906066768>.
- [Raibert e Hodgins 1991] Raibert, M. H.; Hodgins, J. K. Animation of dynamic legged locomotion. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 25, p. 349–358, July 1991. ISSN 0097-8930. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/127719.122755>.

- [Safonova et al. 2004] Safonova, A.; Hodgins, J. K.; Pollard, N. S. Synthesizing physically realistic human motion in low-dimensional, behavior-specific spaces. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 23, p. 514–521, August 2004. ISSN 0730-0301. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1015706.1015754>.
- [Shabana 1997] Shabana, A. A. *Vibration of Discrete and Continuous Systems*. Springer, 1997. (Mechanical Engineering Series, v. 2). ISBN 9780387947440. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=nsUjEvHNC5MC>.
- [Silva et al. 2008] Silva, M. D.; Abe, Y.; Popovic, J. Simulation of human motion data using short-horizon model-predictive control. *Computer Graphics Forum*, v. 27, n. 2, 2008.
- [Sims 1994] Sims, K. Evolving virtual creatures. In: *Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA: ACM, 1994. (SIGGRAPH '94), p. 15–22. ISBN 0-89791-667-0. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/192161.192167>.
- [Sok et al. 2007] Sok, K. W.; Kim, M.; Lee, J. Simulating biped behaviors from human motion data. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 26, July 2007. ISSN 0730-0301. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1276377.1276511>.
- [Stewart e Trinkle 1996] Stewart, D. E.; Trinkle, J. C. An implicit time-stepping scheme for rigid body dynamics with inelastic collisions and coulomb friction. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, v. 39, p. 2673–2691, 1996.
- [TACOMA 2012] Tacoma. *Tacoma Narrows Bridge Collapse "Gallopín' Gertie"*. 2012. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=j-zczJXSxw>.
- [Tan et al. 2011] Tan, J.; Gu, Y.; Turk, G.; Liu, C. K. Articulated swimming creatures. In: *ACM SIGGRAPH 2011 papers*. ACM, 2011. (SIGGRAPH '11), p. 58:1–58:12. ISBN 978-1-4503-0943-1. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1964921.1964953>.
- [Tan et al. 2012] Tan, J.; Turk, G.; Liu, C. K. Soft body locomotion. *ACM Transactions on Graphics*, ACM, v. 31, 2012.
- [Thompson e Raibert 1990] Thompson, C.; Raibert, M. Passive dynamic running. In: Hayward, V.; Khatib, O. (Ed.). *Experimental Robotics I*. Springer Berlin / Heidelberg, 1990, (Lecture Notes in Control and Information Sciences, v. 139). p. 74–83. 10.1007/BFb0042513. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/BFb0042513>.
- [Thomson 1993] Thomson, W. *Theory of Vibration With Applications*. Stanley Thornes, 1993. ISBN 9780748743803. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=0fl1pKtaghAC>.
- [Wampler e Popović 2009] Wampler, K.; Popović, Z. Optimal gait and form for animal locomotion. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 28, p. 60:1–60:8, July 2009. ISSN 0730-0301. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1531326.1531366>.
- [Wang et al. 2009] Wang, J. M.; Fleet, D. J.; Hertzmann, A. Optimizing walking controllers. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 28, p. 168:1–168:8, December 2009. ISSN 0730-0301. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1618452.1618514>.

- [Wang et al. 2010] Wang, J. M.; Fleet, D. J.; Hertzmann, A. Optimizing walking controllers for uncertain inputs and environments. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 29, p. 73:1–73:8, July 2010. ISSN 0730-0301. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1778765.1778810>.
- [Wang et al. 2012] Wang, J. M.; Hamner, S. R.; Delp, S. L.; Koltun, V. Optimizing locomotion controllers using biologically-based actuators and objectives. *ACM Transactions on Graphics*, ACM, v. 31, 2012.
- [Watt e Watt 1992] Watt, A.; Watt, M. *Advanced animation and rendering techniques: theory and practice*. ACM Press, 1992. (ACM press frontier series). ISBN 9780201544121. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=HvgYAQAIAAJ>.
- [Wilhelms 1986] Wilhelms, J. Virya – a motion control editor for kinematic and dynamic animation. In: *Proceedings on Graphics Interface '86/Vision Interface '86*. Toronto, Ont., Canada, Canada: Canadian Information Processing Society, 1986. p. 141–146. Disponível em: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=16564.16589>.
- [Wilhelms e Barsky 1985] Wilhelms, J. P.; Barsky, B. A. Using dynamic analysis to animate articulated bodies such as humans and robots. In: *Proceedings of Graphics Interface '85 on Computer-generated images: the state of the art*. New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 1985. p. 209–229. ISBN 4-431-70010-2. Disponível em: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=20313.20331>.
- [Witkin e Kass 1988] Witkin, A.; Kass, M. Spacetime constraints. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 22, p. 159–168, June 1988. ISSN 0097-8930. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/378456.378507>.
- [Wooten e Hodgins 2000] Wooten, W. L.; Hodgins, J. K. Simulation of leaping, tumbling, landing, and balancing humans. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. San Francisco, USA: [s.n.], 2000. p. 656–662.
- [Wu e Popović 2010] Wu, J.-c.; Popović, Z. Terrain-adaptive bipedal locomotion control. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 29, p. 72:1–72:10, July 2010. ISSN 0730-0301. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1778765.1778809>.
- [Yin et al. 2008] Yin, K.; Coros, S.; Beaudoin, P.; Panne, M. van de. Continuation methods for adapting simulated skills. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 27, n. 3, p. 81:1–81:7, ago. 2008. ISSN 0730-0301. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1360612.1360680>.
- [Yin et al. 2007] Yin, K.; Loken, K.; Panne, M. van de. Simbicon: simple biped locomotion control. *ACM Trans. Graph.*, ACM, New York, NY, USA, v. 26, July 2007. ISSN 0730-0301. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1276377.1276509>.
- [Yinghui et al. 2006] Yinghui, C.; Jing, W.; Xiaohui, L. Real-time deformation using modal analysis on graphics hardware. In: *Proceedings of the 4th international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and Southeast Asia*. New York, NY, USA: ACM, 2006. (GRAPHITE '06), p. 173–176. ISBN 1-59593-564-9. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1174429.1174456>.

- [Zordan e Hodgins 2002] Zordan, V. B.; Hodgins, J. K. Motion capture-driven simulations that hit and react. In: *Proceedings of the 2002 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*. New York, NY, USA: ACM, 2002. (SCA '02), p. 89–96. ISBN 1-58113-573-4. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/545261.545276>.