

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS**

Victor Barasuol

**Um Sistema de Controle Reativo para
Locomoção de Robôs Quadrúpedes**

**Florianópolis
2013**

Victor Barasuol

Um Sistema de Controle Reativo para Locomoção de Robôs Quadrúpedes

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Automação e Sistemas
para a obtenção do Grau de Doutor em
Engenharia de Automação e Sistemas.

Orientador: Prof. Edson Roberto De Pieri

Coorientador: Prof. Victor Juliano De Negri

**Florianópolis
2013**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Barasuol, Victor

Um Sistema de Controle Reativo para Locomoção de Robôs Quadrúpedes / Victor Barasuol ; orientador, Edson Roberto De Pieri ; co-orientador, Victor Juliano De Negri. - Florianópolis, SC, 2013.

195 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas.

Inclui referências

1. Engenharia de Automação e Sistemas. 2. Robôs quadrúpedes. 3. Locomoção adaptativa. 4. Geração de trajetórias. 5. Controle do movimento. I. De Pieri, Edson Roberto. II. De Negri, Victor Juliano. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas. IV. Título.

A minha "Vida", Thaise Ramos Fernandes.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela força interior nos momentos de dificuldade, principalmente quando estive longe das pessoas que mais amo.

Agradeço ao meu pai Telmo Vicente Barasuol, minha mãe Claide Antônia Barasuol, meus irmãos Vinicius Barasuol e Marina Barasuol e minha namorada Thaise Ramos Fernandes por sempre estarem por perto, pelos conselhos e pelo apoio em minhas decisões.

Agradeço aos amigos do Sindicato do LCMI, os meus irmãos de escolha, pelo suporte em muitos dos estágios do meu trabalho, pelos momentos inesquecíveis e pela história que construímos.

Aos grandes amigos Cristiano Cardoso Locateli, Facundo Enrique Gonzales, Yesid Ernesto Asaff, Mauro Damián Hené, Guilherme Brisot, Luciano Endler, Job Angel, Marcio Medina, Matheus Ibagy Pacheco e Elmer Alexis Gamboa pelo suporte no período em que estive trabalhando no Laboratório de Acionamentos Hidráulicos e Pneumáticos (LASHIP) e pelas peripécias memoráveis.

Ao grupo de trabalho do Istituto Italiano di Tecnologia (Hamza Khan, Michele Focchi, Marco Frigerio, Thiago Boaventura, Stephane Baseille, Ioannis Havoutis e Jake Goldsmith) pelo suporte, troca de conhecimento e amizade durante o período de intercâmbio.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Edson Roberto De Pieri e Prof. Dr. Victor Juliano De Negri pela orientação acadêmica e pelos exemplos passados.

Aos orientadores Dr. Jonas Buchli e Dr. Claudio Semini pelas oportunidades e pela orientação durante o estágio de doutorado no Istituto Italiano di Tecnologia.

Agradeço à Sindi e ao Betão pelos momentos de descontração e principalmente por terem sido fontes de muitas das minhas inspirações.

À CAPES pelo suporte financeiro.

Resumo da tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Doutor em
Engenharia de Automação e Sistemas.

Um Sistema de Controle Reativo para Locomoção de Robôs Quadrúpedes

Victor Barasuol

Agosto/2013

Orientador: Prof. Edson Roberto De Pieri, Dr.

Coorientador: Prof. Victor Juliano De Negri, Dr.

A locomoção ágil de robôs com pernas em terrenos irregulares necessita que todas as tarefas - desde a geração/planejamento de trajetórias ao controle do movimento - interajam de maneira harmoniosa. As diferentes tarefas, por exemplo, a geração de trajetórias e as ações de controle, em geral, não podem gerar conflitos com relação ao movimento desejado. Nesta tese, propõe-se uma estrutura de controle reativa para locomoção de robôs quadrúpedes em terrenos irregulares. O objetivo de tal estrutura é fazer frente à problemas relacionados à locomoção em superfícies irregulares, ao erro de rastreamento de trajetória e a imprecisão da estimação de estados. A estrutura compreende a dois módulos principais: um relacionado a geração do movimento, e outro relacionado ao controle do movimento do robô. Para a geração do movimento propõe-se uma abordagem baseada em Geradores de Padrões Centrais, que geram referências no espaço da tarefa e podem ser modulados de acordo com a superfície do terreno. Para o controle do movimento propõe-se uma estratégia de controle baseado em projeção de espaço nulo e uma estratégia de controle para rejeição de distúrbios baseada no conceito de pontos de captura. As principais contribuições teóricas foram validadas em simulação e implementadas em um robô real. Ao final do documento, tais resultados são apresentados para demonstrar a efetividade da estrutura proposta.

Palavras chave: Robôs com pernas, locomoção adaptativa, geração de trajetórias, controlador do dorso, rejeição de distúrbios.

Abstract of thesysis presented to Federal University of Santa Catarina as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in Systems and Automation Engineering.

A Reactive Controller Framework for Quadruped Robots Locomotion

Victor Barasuol

August/2013

Advisor: Prof. Edson Roberto De Pieri, Dr.

Co-advisor: Prof. Victor Juliano De Negri, Dr.

Agile locomotion of legged robots over rough terrain requires all elements - from trajectory planning to control - to work in a well orchestrated manner. The different elements, e.g. planning and control should not interfere with each other. In this thesis one proposes a reactive controller framework for robust quadrupedal locomotion, designed to cope with terrain irregularities, feet trajectory tracking errors and poor state estimation. The framework comprises two main modules: One related to the generation of elliptic trajectories for the feet and the other for control of the stability of the whole robot. It is proposed a task space CPG-based trajectory generation that can be modulated according to terrain irregularities and the posture of the robot trunk. To improve the robot's stability, it is proposed a null space based attitude control for the trunk and a push recovery algorithm based on the concept of capture points. The main theoretical contributions are simulated and implemented in a real robot and such results are presented to demonstrate the effectiveness of the proposed framework.

Keywords: Legged robots, adaptive locomotion, trajectory generation, trunk controller and push recovery.

Lista de Figuras

Figura 1.1 Resultado da máquina de busca <i>Google Scholar</i>	3
Figura 1.2 Característica intrínseca de omnidirecionalidade	4
Figura 1.3 Mobilidade dos robôs com pernas	4
Figura 1.4 Facilidade na transposição de obstáculos.	5
Figura 1.5 Característica de suspensão ativa	5
Figura 1.6 Robustez frente às descontinuidades das superfícies nat- urais.	6
Figura 1.7 Ilustração da compactação do solo por uma pata.	6
Figura 1.8 LS3 e Bigdog	9
Figura 1.9 Experimento com gato descerebrado	11
Figura 2.1 Margens de estabilidade S_{SM} , S_{LSM} e S_{ESM}	19
Figura 2.2 Parâmetros geométricos para computação de S_{NDESM}	23
Figura 2.3 Numeração das pernas e combinações estáveis	24
Figura 2.4 Sequencia de movimentos para estabilidade estática.	24
Figura 2.5 Diagrama de marcha para diferentes parâmetros	25
Figura 2.6 Padrão de locomoção Andar	27
Figura 2.7 Diagrama de marcha do padrão caminhar	28
Figura 2.8 Padrão de locomoção Trote	28
Figura 2.9 Diagrama de marcha do padrão trote	29
Figura 2.10 Padrão de locomoção Galope	29
Figura 2.11 Diagrama de marcha do padrão galope	30
Figura 2.12 Experimentos realizados por Marc Raibert	34
Figura 2.13 Trajetória do centro de gravidade do robô	34
Figura 2.14 Elementos do modelo virtual	35
Figura 2.15 Etapas do algoritmo para obtenção dos torques.	36

Figura 2.16 Cinemática entre os sistemas móvel e inercial.....	37
Figura 2.17 Simplificação da interação entre tarefas.....	40
Figura 2.18 Acopl. entre CPGs para geração do movimento	41
Figura 3.1 Conflito entre estratégias de controle	51
Figura 3.2 Sistema de Coordenadas Horizontal (SCH).....	53
Figura 3.3 Diag. de blocos do sistema de controle reativo	54
Figura 4.1 Trajetória típica de uma pata.....	68
Figura 4.2 Variação da trajetória com a var. paramétrica	70
Figura 4.3 Valores das variáveis x e y do ciclo limite.....	75
Figura 4.4 Ciclo limite elíptico gerado pelo osc. proposto	76
Figura 4.5 Resposta do oscilador à variação paramétrica.	77
Figura 4.6 Valor das funções de transição σ_{\downarrow}	78
Figura 4.7 Mod. da traj. de x e z pela var. do parâmetro D_f	80
Figura 4.8 Mod. da traj. de x e z pela variação do parâmetro D_f	81
Figura 4.9 Efeito do filtro não-linear	82
Figura 4.10 Sincronização dos osciladores.....	86
Figura 4.11 Modulação paramétrica independente	88
Figura 4.12 Geração dos ciclo limites.....	89
Figura 4.13 Planos de geração dos ciclos limite.....	89
Figura 4.14 Geração da superfície de referências.	91
Figura 4.15 SRs de acordo com os parâmetros de orientação.....	92
Figura 4.16 Ajuste da postura e da trajetória dos passos.....	93
Figura 4.17 Ação adaptativa obtida pelo parâmetro z_{td}	94
Figura 4.18 Diferença no caminhar pela ação adaptativa.....	95
Figura 4.19 Superfície de referências.....	95
Figura 4.20 Trajetória da pata com relação ao corpo.....	99
Figura 4.21 Trajetórias geradas com a modulação de w_s	100
Figura 4.22 Efeito de pivotamento do ajuste cinemático	101
Figura 4.23 Limites angulares para o ajuste cinemático.....	102
Figura 4.24 Regiões de impedância	103
Figura 5.1 Ilustração dos vetores X_b^h , $X_{f_i}^b$ e $X_{f_i}^h$	110
Figura 5.2 Forças de reação ortogonais à superfície.....	114

Figura 5.3 Forças de reação com orientação preservada.....	115
Figura 5.4 Salto p/ o controlador baseado em espaço nulo.....	116
Figura 5.5 Salto p/ o controlador baseado em restrição	117
Figura 5.6 Modelo simplificado do robô	119
Figura 5.7 Soluções para o posicionamento das patas.....	121
Figura 6.1 Imagens do robô <i>HyQ</i>	131
Figura 6.2 Imagem do ambiente de simulação SL	131
Figura 6.3 Modulação da trajetória de referência.....	135
Figura 6.4 Comportamento da velocidade de avanço	136
Figura 6.5 Resposta da velocidade de avanço.....	137
Figura 6.6 Erro de velocidade de avanço	138
Figura 6.7 Imagens do experimento para rastreamento de alvo	139
Figura 6.8 Resultados p/ o experimento de rastreamento de alvo ..	140
Figura 6.9 Locomoção em terreno inclinado: cenário	141
Figura 6.10 Altura do dorso p/ travessia em terreno inclinado	142
Figura 6.11 Ângulo de arfagem do dorso em terreno inclinado	143
Figura 6.12 Imagens do experimento em esteira inclinada	144
Figura 6.13 Resultado experimental da locomoção em terreno incli- nado	145
Figura 6.14 Simulação da locomoção em terreno irregular	146
Figura 6.15 Resultados de simulação: locomoção em terreno irreg- ular	147
Figura 6.16 Resultados experimentais: locomoção em terreno irreg- ular	148
Figura 6.17 Resultados de simulação: aplicação de distúrbios	151
Figura 6.18 Resultados experimentais: aplicação de distúrbios	152

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Margens de Estabilidade Estática.....	20
Tabela 2.2 Margens de Estabilidade Dinâmica	21
Tabela 4.1 Parâmetros fixos do exemplo.....	67
Tabela 4.2 Tabela referente ao exemplo da Figura 4.2.	69
Tabela 6.1 Ganhos utilizados para o controlador do dorso.	132
Tabela 6.2 Ganhos da ação PD do controlador de juntas	132
Tabela 6.3 Parâmetros do bloco de geração de trajetórias	133
Tabela 6.4 Limites de saturação para o ajuste cinemático.....	133
Tabela 6.5 Resultados para a rejeição de distúrbios de guinada....	149

Glossário

Parâmetros, símbolos e variáveis:

X_f^h : Vetor de posição das patas descrito no SCH.

X_f^b : Vetor de posição das patas descrito no SCB.

X_p^h : Vetor de posição das patas, relativo a geração das trajetórias primitivas, descrito no SCH.

K^{-1} : Função de cinemática inversa.

Δ_x : Deslocamento relativo ao longo do eixo x do SCH.

Δ_y : Deslocamento relativo ao longo do eixo y do SCH.

L_{s_i} : Comprimento do passo associado à perna número i .

H_{s_i} : Altura do passo associado à perna número i .

V_f : Velocidade de avanço do caminhar/locomoção.

D_f : Fator cíclico do padrão de marcha.

f_s : Frequência do passo.

w_s : Frequência angular associada à frequência do passo f_s .

σ_\uparrow : Função de transição que tende ao valor 1 (um) de modo diretamente proporcional ao seu argumento.

σ_\downarrow : Função de transição que tende ao valor 0 (zero) de modo diretamente proporcional ao seu argumento.

b_p : Coeficiente de transição das funções de transição associadas a modulação da frequência angular do oscilador elíptico.

b_f : Coeficiente de transição das funções de transição associadas ao filtro não-linear.

α : Coeficiente para ajuste da convergência do ciclo-limite do oscilador para a forma elíptica.

β : Coeficiente para ajuste da convergência do ciclo-limite do oscilador para a forma elíptica.

K_c : Coeficiente para ajuste da resposta do filtro não-linear durante a fase de transição da perna.

Θ : Matriz de sincronização (Θ_{Trote} para o padrão trote, $\Theta_{Caminhar}$ para o padrão caminhar, Θ_{Passo} para o padrão passo e Θ_{Salto} para o padrão Salto).

ϕ_b : Ângulo de Euler associado ao movimento de rolagem do dorso.

θ_b : Ângulo de Euler associado ao movimento de arfagem do dorso.

ψ_b : Ângulo de Euler associado ao movimento de guinada do dorso.

m_b : Massa do dorso do robô.

I_{b_z} : Inércia do dorso do robô para rotação em torno do eixo z do SCH.

g : Aceleração da gravidade.

Acrônimos e siglas:

CPG: *Central Pattern Generator.*

HyQ: *Hydraulically Actuated Quadruped Robot.*

IMU: *Inertial Measurement Unit.*

IIT: *Istituto Italiano di Tecnologia.*

RVO: Reflexo Vestíbulo-Ocular.

RVE: Reflexo Vestíbulo-Espinal.

SCR: Sistema de Controle Reativo.

SCH: Sistema de Coordenadas Horizontal.

SCB: Sistema de Coordenadas da Base.

TCPG: Task Space-based Central Pattern Generator.

UFSC: Universidade Federal de Santa Catarina.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	2
1.2	Objetivos e Abordagem Proposta	13
1.3	Contribuições da Tese	14
1.3.1	Lista de publicações	14
1.4	Organização do Documento	15
2	Locomoção Quadrúpede	17
2.1	Introdução	17
2.2	Estabilidade da Locomoção	18
2.2.1	Margem de Estabilidade Dinâmica de Energia Normalizada	22
2.3	Classificação dos Padrões de Marcha	22
2.3.1	Padrões Periódicos	26
2.3.2	Padrões Não-Periódicos	30
2.3.3	Padrões Quase-Periódicos	31
2.4	Implementação da Locomoção em Robôs Quadrúpedes	32
2.4.1	Controle de Balanço	33
2.4.2	Controle de Modelo Virtual	35
2.4.3	Controle por Dinâmica Inversa via Decomposição QR	36
2.4.4	Gerador Central de Padrões	39
2.5	Síntese do Capítulo	44
3	Sistema de Controle Reativo (SCR)	47
3.1	Conceitos e definições	49
3.1.1	Sistema de coordenadas horizontal	52
3.2	Arquitetura de controle	54
3.2.1	CPG	55
3.2.2	Ajuste Cinemático	57

3.2.3	Controlador das juntas	59
3.2.4	Controlador do dorso	60
3.2.5	Controlador de distúrbios	60
3.2.6	Estimador de Estados	61
3.3	Síntese do Capítulo	62
4	Geração do Movimento	63
4.1	Geração de Padrões via CPGs no Esp. da Tarefa	63
4.1.1	Sobre os desafios da geração via CPGs	65
4.1.2	Sobre o conceito do CPG Proposto	71
4.1.3	Metodologia de Projeto de CPGs	72
4.1.4	Oscilador Elíptico	73
4.1.5	Funções de Transição	76
4.1.6	Filtro Não-Linear para Adequação das Trajetórias	81
4.1.7	Acoplamento e Sincronização dos Osciladores . .	82
4.1.8	Normalização da Matriz de Sincronização	87
4.1.9	Orientação do Ciclo Limite para a Orientação do Caminhar	87
4.1.10	Filtragem Variável para Adaptação em Terreno Irregular	92
4.2	Bloco de Geração de Referências	94
4.2.1	Modulação de Referências	97
4.3	Bloco de Ajuste Cinemático	100
4.4	Bloco do Controlador das Juntas	103
4.5	Síntese do Capítulo	105
5	Controle do Movimento	107
5.1	Controlador do Dorso	108
5.1.1	Controlador Baseado em Projeção de Espaço Nulo	109
5.1.2	Controlador Baseado na Restrição de Movimentos	111
5.1.3	Diferenças na Aplicação das Estratégias de Con- trole	113
5.2	Controlador de Distúrbios	119
5.2.1	Tempo de resposta <i>versus</i> frequência do passo .	123
5.3	Estimador de Estados	125
5.4	Síntese do Capítulo	126
6	Resultados	129
6.1	Plataforma Experimental e Ambiente de Simulação . . .	130
6.2	Modulação de Parâmetros em Terreno Plano	134
6.2.1	Variação da Altura do Passo e Padrão de Marcha	134
6.2.2	Variação da Velocidade de Avanço	135

6.2.3	Resultados Experimentais	138
6.3	Locomoção em Terreno Inclinado	141
6.3.1	Resultados de Simulação	141
6.3.2	Resultados Experimentais	144
6.4	Locomoção em Terreno Irregular	145
6.4.1	Resultados de Simulação	145
6.4.2	Resultados Experimentais	146
6.5	Análise de Estabilidade Pós-Distúrbio	149
6.5.1	Resultados de Simulação	149
6.5.2	Resultados Experimentais	151
6.6	Síntese do Capítulo	152
7	Conclusões	155
7.1	Perspectiva de trabalhos futuros	157

Capítulo 1

Introdução

A natureza tem fascinado e mostrado a engenheiros e pesquisadores da robótica que ainda existe muito a ser compreendido em termos de locomoção. Como construir um robô com habilidade comparável a de uma cabra da montanha¹? Ou, com a surpreendente velocidade de 120 Km/h de um guepardo²? Desenvolver e aliar habilidades de percepção, coordenação e agilidade ainda constitui um dos maiores desafios da robótica móvel.

Buscando contribuir no âmbito da locomoção, esta tese apresenta um sistema de controle reativo para robôs quadrúpedes cuja abordagem é inspirada no modo com que a natureza produz os movimentos e está fundamentada no conceito de duas grandes atividades: a geração do movimento e o controle do movimento de locomoção. A estratégia é dita reativa por não depender do conhecimento prévio do ambiente e com este propósito visa ampliar as aplicações práticas da locomoção além dos ambientes conhecidos e estruturados. Os algoritmos propostos, para geração e controle da locomoção, são hierarquicamente situados entre tarefas de níveis baixo e intermediário e possuem uma via de comunicação intuitiva com as tarefas de mais alto nível.³

Este primeiro capítulo visa esclarecer o escopo da tese no que se refere a sua motivação, objetivos e contribuições. Ao seu final, a

¹ *Oreamnos americanus* (www.youtube.com/watch?v=TtUz514rXKo).

² Conhecido também como chita (www.youtube.com/watch?v=rMxfOnlJe4).

³ O trabalho apresentado neste documento é, em sua grande parte, fruto de uma cooperação entre a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), através do Programa de Pós-Graduação em Automação e Sistemas, e o *Istituto Italiano di Tecnologia* (IIT). Além disso, aparece como o primeiro trabalho, realizado na UFSC, que aborda a locomoção quadrúpede.

organização do documento será apresentada com breve explanação do conteúdo de cada capítulo.

1.1 Motivação

Apenas no ano de 2012 foram registradas 29 catástrofes naturais. Dentre estas, 6 por terremoto e 10 devido a furações, tufões e ciclones [71]. Em 2011, o Brasil esteve entre as seis nações mais afetadas por catástrofes naturais no mundo [42].

Para a robótica que visa ao suporte civil, a frequência com que estes fenômenos naturais vêm acontecendo reforça o apelo por equipamentos mais versáteis que auxiliem os seres humanos em procedimentos pós-catástrofe. No entanto, a solução tecnológica para problemas de busca, rastreamento ou resgate, em cenários pós-catástrofe ou até mesmo cenários naturais, se torna desafiadora ao requerer equipamentos com alta capacidade locomotora. Tais equipamentos devem ser capazes de superar terrenos irregulares, não-estruturados, ora não mapeados ou percebidos, e sobretudo superfícies móveis (que sofrem alterações ao receber a força peso do equipamento).

Robôs com rodas apresentam excelente desempenho em superfícies planas e pavimentadas. Porém, o desempenho decai consideravelmente quando o terreno se torna irregular, macio/penetrante ou apresenta algum tipo de obstáculo. Robôs que utilizam esteiras movimentam-se com melhor desempenho em terrenos irregulares, porém, perdem mobilidade (ao não realizar movimentos omnidirecionais) e podem danificar a superfície de deslocamento. Robôs com pernas, por sua vez, não são tão eficientes em superfícies planas mas conseguem manter a sua eficiência mesmo com a variação do terreno.

A locomoção por pernas vem atraindo cada vez mais a atenção de pesquisadores e engenheiros como solução para a locomoção em terrenos irregulares e não-estruturados. Tanto a pesquisa direcionada à dinâmica da locomoção por pernas quanto a construção de máquinas que utilizam membros como mecanismos de deslocamento têm crescido substancialmente, e a ideia da utilização de robôs com pernas como máquinas de busca e resgate vêm ganhando força nos últimos 10 anos (ver Figura 1.1). Alguns dos catalisadores para o aumento nas pesquisas têm sido a evolução tecnológica de processadores (possibilitando a aplicação de algoritmos de controle mais complexos), da fabricação de materiais (mais leves e robustos), e de sensores (mais precisos) e atuadores (mais potentes).

Os robôs com pernas são adequados não só para terrenos aci-

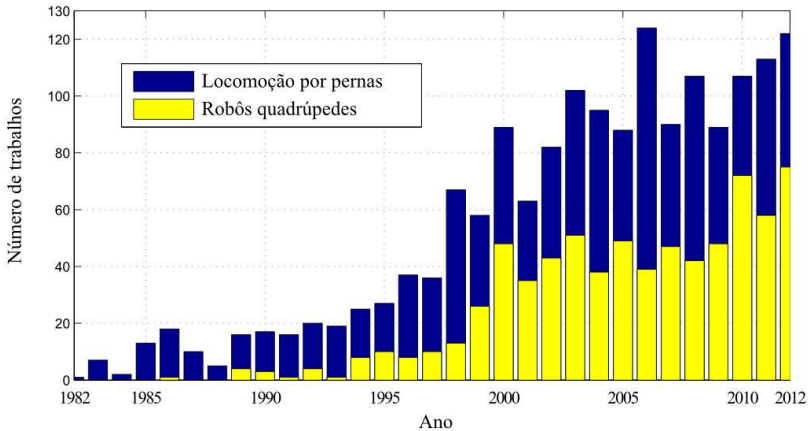


Figura 1.1: Resultado da máquina de busca *Google Scholar* para o número de trabalhos contendo no título: *legged robots* ou *legged locomotion* (azul) e *quadruped robot* (amarelo). Gráfico de cunho qualitativo.

dentados mas também para ambientes internos, como por exemplo, que possuem escadas e desníveis. Para exemplificar algumas das diferenças entre robôs móveis com pernas (RMP) e robôs móveis com rodas (RMR) serão descritas a seguir algumas características segundo [37]. As figuras utilizadas para a ilustração das características foram adaptadas e traduzidas da referência em questão.

Principais características dos RMP

1. Mobilidade

Os robôs com pernas exibem uma mobilidade maior do que robôs móveis com rodas por serem sistemas intrinsecamente omnidirecionais. Isto é, um robô com pernas pode mudar a direção independentemente da direção do seu eixo principal, apenas modificando os pontos de apoio. No caso de um robô com rodas convencionais é necessária a realização de algum tipo de manobra para a mudança de direção, conforme ilustrado na Figura 1.2. Robôs móveis com rodas que utilizam rodas suecas podem ter seu grau de mobilidade aumentado [96], porém, sua omnidirecionalidade permanece restrita ao plano de deslocamento.

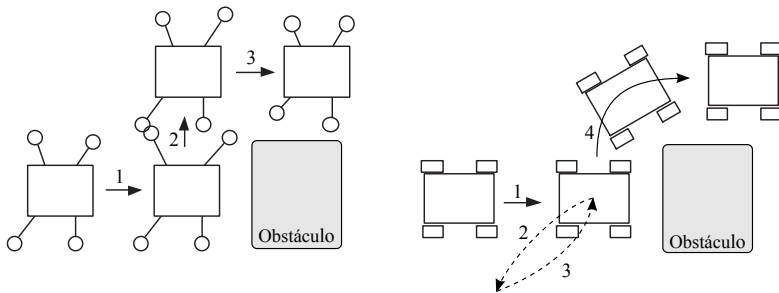


Figura 1.2: Característica intrínseca de omnidirecionalidade. À esquerda, o robô quadrúpede se desloca sem modificar a orientação do dorso. À direita, robôs com rodas tradicionais (sem rodas suecas) necessitam reorientar a base (passos 2, 3 e 4) para contornar o obstáculo.

Além disso, um robô com pernas é capaz de mover e orientar o seu corpo, enquanto mantém seus pontos de apoio, somente modificando a extensão das pernas, como ilustrado na Figura 1.3.

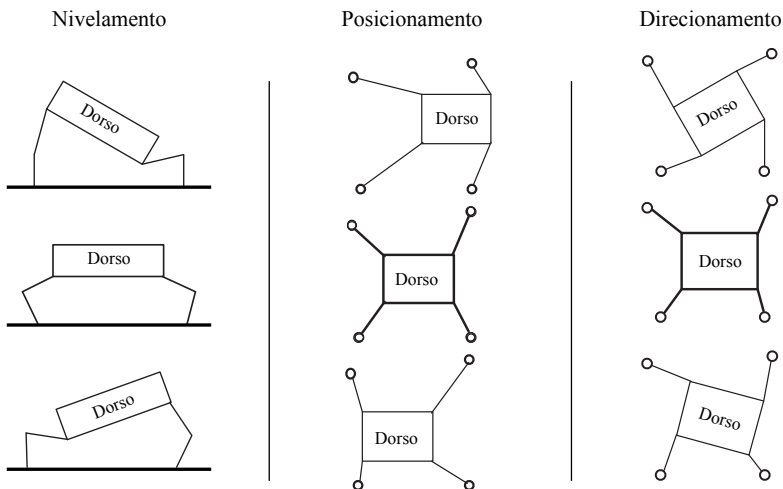


Figura 1.3: Mobilidade dos robôs com pernas: mantendo os mesmos pontos de apoio o robô é capaz de mudar a orientação e posicionamento do dorso.

2. Transposição de Obstáculos

Um robô com pernas pode transpor obstáculos que possuem alturas inferiores à altura máxima alcançada por seus membros, enquanto que os robôs com rodas somente podem transpor obstáculos com alturas de aproximadamente o raio da roda. Na Figura 1.4, esta situação é ilustrada.

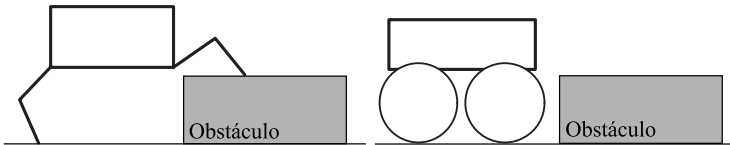


Figura 1.4: Facilidade na transposição de obstáculos.

3. Suspensão Ativa

Um robô com pernas provê uma suspensão intrinsecamente ativa pela adaptação do comprimento das suas pernas às irregularidades do terreno, permitindo a transposição de obstáculos e terrenos irregulares com o dorso nivelado. Por isso, os sistemas com pernas provêem um transporte com movimentos suaves e confortáveis. Diferentemente, o corpo de um robô com rodas está geralmente paralelo ao terreno e, mesmo que considerado a utilização de suspensões ativas, a movimentação de RMR é mais sensível às irregularidades do terreno. Esta situação é ilustrada na Figura 1.5.

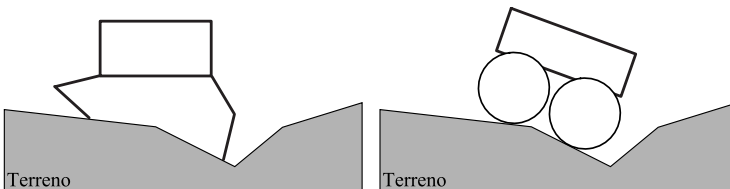


Figura 1.5: Característica de suspensão ativa: ajustando o comprimento das pernas do robô é capaz de manter o dorso nivelado ao atravessar superfícies irregulares.

4. Deslocamento em Terrenos Naturais

Para se mover de maneira eficiente, os robôs com rodas necessitam de superfícies que tenham uma pavimentação suave. Em princípio, os sistemas com pernas não necessitam que o terreno seja preparado, conseguindo se deslocar sobre terrenos arenosos, lamacentos, duros ou macios com eficiência similar, conforme ilustrado na Figura 1.6.

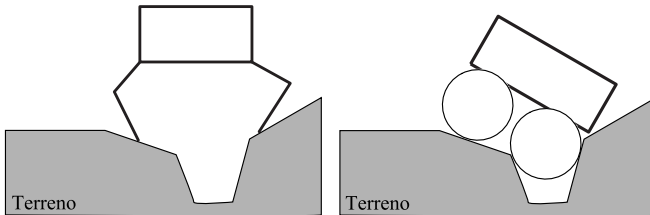


Figura 1.6: Robustez frente às descontinuidades das superfícies naturais.

5. Deslizamento e Travamento

Rodas tendem a travar em terrenos macios e, assim, a movimentação dos robôs com rodas também. Entretanto, se uma perna é posicionada verticalmente sobre o solo, ela compacta o solo somente na direção da força de apoio. Portanto, uma vez que a elevação de uma pata é realizada verticalmente, sem interferência com o terreno, não ocorre problemas de travamento pela resistência do solo quando o corpo é propelido. Esta situação é ilustrada na Figura 1.7.

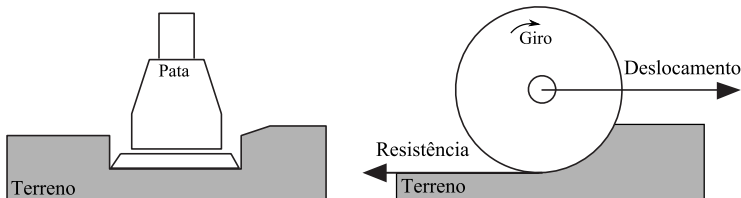


Figura 1.7: Ilustração da compactação do solo por uma pata (à esquerda) e por uma roda (à direita).

6. Velocidade Média de Deslocamento

Os veículos tradicionais podem se mover com velocidades elevadas em superfícies preparadas. Porém, a velocidade decresce rapidamente à medida que as irregularidades do terreno aparecem. Os animais com pernas, por exemplo os mamíferos, são capazes de adaptar a locomoção rapidamente às irregularidades do terreno e assim são capazes de manter velocidades médias similares em diferentes tipos de terreno.

Com base em todas as características mencionadas, as possíveis aplicações dos robôs quadrúpedes envolvem principalmente tarefas em áreas de risco aos seres humanos ou inadequadas para a utilização de veículos convencionais, tais como:

- Auxiliar nas operações de busca e resgate em áreas abaladas por terremotos, tsunamis, queda de barreiras ou avalanches;
- Transporte de suprimentos, como alimentos e material de socorro, em regiões de desastre que são difíceis ou impossíveis de se acessar por caminhões ou helicópteros;
- Apoio à desminagem de regiões de guerra;
- Tarefas de inspeção em áreas perigosas;
- Execução de tarefas em zonas de contaminação;
- Auxiliar equipes de socorro na luta contra incêndios em estruturas de difícil acesso: detectando os focos/origens de incêndio, informando a situação do incêndio ou localizando vítimas no interior da estrutura;
- Realizar o papel de guia, auxiliando a locomoção de pessoas com deficiência de visão;
- Suporte em tarefas relacionadas à silvicultura.

Tendo em vista que são necessários ao menos três pontos de apoio para se ter um suporte estável, a configuração quadrúpede é a configuração que utiliza o menor número de membros com os quais é possível deslocar o dorso em uma movimentação estaticamente estável (conceitos de estabilidade serão apresentados no Capítulo 2). Deste ponto de vista, robôs com mais de quatro pernas (como hexápodes)

apresentam configuração redundante e resultam em maior peso e consumo energético – pontos negativos quando a autonomia de um robô móvel constitui um requerimento importante.

Apesar das vantagens das pernas como meio de locomoção, poucos robôs atuais têm mostrado esta superioridade. A maioria dos robôs com pernas ainda necessitam de um terreno plano para caminhar e correr e têm grandes dificuldades para apresentar bom desempenho na presença de perturbações. A razão para isso decorre principalmente da dinâmica altamente não-linear dos sistemas com pernas, da complexidade de se controlar muitos graus de liberdade em tempo real e da necessidade e dependência de se estimar a superfície do terreno e possíveis pontos de apoio.

Uma exceção a tudo isso são os robôs *Bigdog* e *LS3*, mostrados na Figura 1.8, os quais representam o estado da arte no que diz respeito ao desempenho da locomoção quadrúpede [25, 26, 79]. Ambos robôs foram desenvolvidos pela empresa *Boston Dynamics* e financiados pela agência de defesa dos EUA, a *DARPA* (*Defense Advanced Research Projects Agency*). Estes dois robôs quadrúpedes têm apresentado excelente desempenho ao executarem tarefas dinâmicas, como correr, saltar e manter o equilíbrio em superfícies irregulares ou acidentadas. Não obstante também está o grau de autonomia destes robôs, capazes de realizar tarefas de percurso determinado, pela utilização de um sistema de posicionamento global (GPS), ou de identificação e seguimento de um líder.

Por se tratarem de projetos envolvendo aspectos militares poucos dados referentes ao desenvolvimento de *softwares* e *hardwares* podem ser encontrados na literatura. Pelos mesmos motivos, não há publicações relatando comparações entre o desempenho dos algoritmos utilizados por esses robôs e o desempenho de outras abordagens.

A locomoção autônoma em terrenos acidentados tem sido o foco de um recente desafio lançado pela *DARPA*, chamado *DARPA Learning Locomotion Challenge* (edição especial do *IJRR* [17]). Em [16] a implementação de um controlador baseado em modelo dinâmico mostrou que é possível reduzir os ganhos que atuam sobre os erros e aumentar a robustez de um caminhar em terrenos acidentados. Porém, a abordagem utilizada faz uso de um mapeamento preciso do terreno, extensiva busca por melhores pontos de apoio e planejamento cinemático, estando focado basicamente na locomoção estaticamente estável. Um cenário como este pode ser visto como uma situação ideal, permanecendo a necessidade de uma abordagem que permita uma locomoção mais dinâmica, que envolva movimentos reativos, e não exija

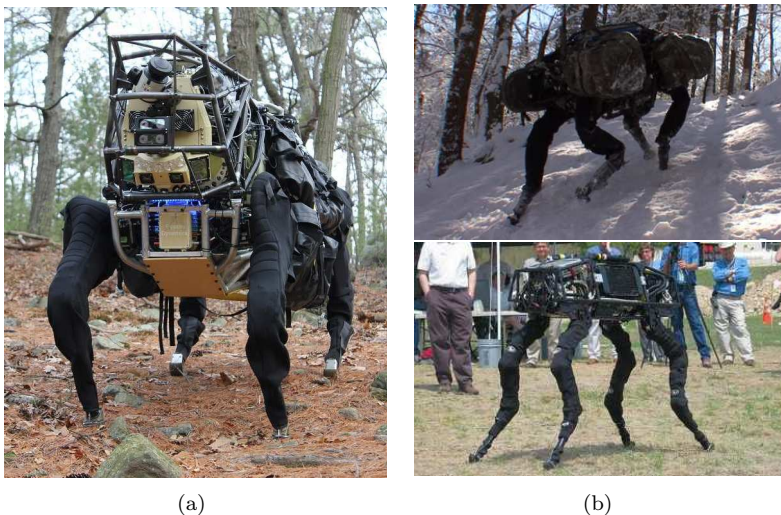


Figura 1.8: (a) LS3 e (b) Bigdog. As imagens foram retiradas do sítio eletrônico da empresa *Boston Dynamics*.

o conhecimento prévio do ambiente.

A locomoção autônoma por pernas é uma tarefa complexa que envolve uma gama de componentes desde tarefas de baixo nível (como o controle dos atuadores) às tarefas de alto nível (como processos cognitivos). Para serem autônomos, robôs necessitam que todos estes componentes sejam confiáveis, estejam corretamente interligados e que possam ser executados em tempo real.

Após pesquisa bibliográfica, verificou-se a inexistência de uma abordagem para a locomoção de robôs quadrúpedes que envolva simultaneamente:

- a geração de referências cinemáticas para as pernas;
- o controle do dorso para a manutenção da postura;
- um algoritmo que possibilite a rejeição de distúrbios externos recebidos pelo dorso.

Estes três componentes são essenciais para uma locomoção robusta e cada um destes ainda constitui um vasto campo de pesquisa com inúmeros tópicos em aberto.

A geração de referências cinemáticas, por exemplo, a qual define

o padrão de marcha da locomoção, é um tema de pesquisa que atualmente envolve diferentes áreas da ciência, como a biologia, a neurofisiologia e a engenharia. No passado, muitas máquinas foram construídas a partir de arranjos mecânicos que constituíam pernas e reproduziam os padrões de marcha observados nos animais. No entanto, quando uma pesquisa é desenvolvida sobre uma plataforma robótica com o intuito de reproduzir a locomoção animal, a geração dos padrões se torna uma tarefa mais complexa, uma vez que o problema trata da locomoção em qualquer ambiente ou situação.

Atualmente, muitas das pesquisas realizadas em robôs quadrúpedes possuem tarefas de locomoção implementadas com base no planejamento de trajetória, onde o movimento das juntas é obtido através de cinemática inversa [99, 110, 112]. Como estes métodos são baseados em trajetórias pré-definidas, os mesmos apresentam certas limitações como:

- Dificuldade de se obter trajetórias adequadas para locomoção;
- As trajetórias são sensíveis às condições do terreno. Se as condições do terreno mudam a trajetória pode não se adequar mais ao terreno;
- Mesmo sendo possível projetar inúmeras trajetórias e realizar uma comutação entre elas durante o caminhar, pode não ser possível cobrir todas as situações que o robô irá encontrar.

Em suma, os métodos baseados em trajetórias pré-definidas não resolvem o problema da locomoção em terrenos desconhecidos e não-estruturados.

Estas limitações, por não serem comuns entre os animais, sugerem o estudo de metodologias mais robustas para geração dos movimentos.

Há pouco mais de uma década, as técnicas de implementação estão concentradas em uma estrutura de geração chamada de Gerador Central de Padrões, do inglês CPG⁴, que tenta emular um mecanismo encontrado na natureza. Segundo os biólogos, os CPGs são estruturas neuronais, encontradas nos animais, que são capazes de produzir endogenamente saídas com padrões rítmicos [15, 39, 102]. Estas estruturas estão distribuídas ao longo das regiões inferior torácica e lombar do cordão espinhal, sendo responsáveis por diversos padrões de locomoção [24, 114].

⁴Central Pattern Generator

A teoria da existência de CPGs tornou-se aceita após os experimentos realizados por Brown em 1911 [13, 14]. Nestes experimentos, o cientista avaliou as reações locomotoras de um gato descerebrado sobre uma esteira. Após a esteira entrar em funcionamento, não somente pode-se observar os padrões de locomoção muito próximos do normal, mas também que o gato era capaz de alterar a marcha de acordo com a velocidade da esteira (ilustrado na Figura 1.9). A partir desta constatação pôde-se inferir que deveria existir uma central geradora de padrões capaz de produzir movimentos mesmo sem comunicação com o cérebro.

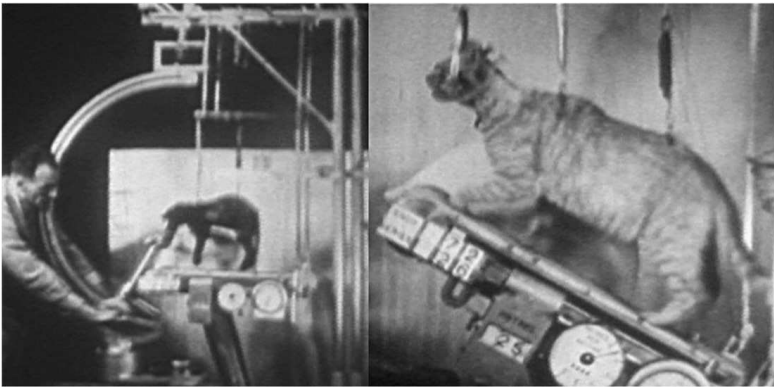


Figura 1.9: Aparato utilizado pelo cientista Thomas Graham Brown para análise da geração de padrões locomotores em um gato descerebrado. A imagem foi extraída de [103].

Posteriormente, também se comprovou a teoria de que os CPGs seriam capazes de receber estímulos para ajustar o ritmo do movimento, controlar a velocidade de locomoção e realizar a alteração entre marchas [21, 40]. Os resultados experimentais obtidos incentivaram a utilização de CPGs como um conceito para implementação das tarefas de geração de movimento em robôs com pernas. Desde então, muitos modelos matemáticos têm sido propostos para a representação dos CPGs, observando-se um crescimento considerável no número de trabalhos publicados na última década. A ideia de estratégias de geração de movimento inspiradas em CPGs é uma abordagem que possui um grande potencial a ser explorado. Principalmente porque é uma abordagem com muitos tópicos em aberto e problemas a serem resolvidos.

A geração de referências cinemáticas para o robô, ou seja, de

posições de referência para cada junta ativa, constitui um dos problemas da locomoção quadrúpede que normalmente é tratado em um contexto de malha aberta. Em outras palavras, fala-se da geração de referências que não faz uso de informações do ambiente ou de informações do próprio robô. A robustez de um caminhar está relacionada diretamente com a capacidade de se adaptar as referências geradas de acordo com tais informações. Por isso, a geração de trajetórias adaptativa tem sido o foco de muitas pesquisas como uma forma de controlar o movimento no sentido de evitar a queda do robô. Infelizmente, apenas capacidades adaptativas que reduzem a queda durante o movimento não são suficientes para manter a estabilidade do robô em todas as situações. A estabilidade do robô também deve ser mantida quando não há movimento, ou seja, quando todas as patas permanecem em contato com o solo. Para este caso, algumas técnicas que visam o controle do dorso – controle de postura – foram propostas na literatura. Citam-se, entre elas, as estratégias de controle de postura baseadas em distribuição das forças de contato [69, 84] e a estratégia de controle do dorso baseada em modelos virtuais [75].

Dentro do estado da arte do controle de postura, o controle do dorso só é realizado quando ao menos uma pata encontra-se em contato com o solo. Devido a isso, as estratégias de controle de postura são normalmente abordadas sem a presença de atividade locomotora, na qual uma pata transita entre dois pontos de apoio (caracterizando um passo).

Nos trabalhos apresentados em [81] e em [75] tanto o controle do dorso quanto a existência de referências cinemáticas são considerados. Porém, o algoritmo de locomoção chaveia entre as estratégias de acordo com a situação da pata. Ou o controlador do dorso atua, quando existe o contato da pata com o solo, ou um controlador de posição das juntas atua seguindo as referências cinemáticas para a execução de um passo. No entanto, o chaveamento entre os algoritmos de controle pode se tornar um limitador de desempenho, pois a geração de referências cinemáticas sofre descontinuidade. Esta descontinuidade limita a aplicação de ações de controle baseadas em modelo que melhoram o seguimento de referência, as quais utilizam as acelerações desejadas para compensar forças inerciais.

Assim, conclui-se esta seção ressaltando a inexistência de uma estrutura de controle que apresente uma fusão harmoniosa da geração de referência cinemáticas e do controle de postura do dorso.

1.2 Objetivos e Abordagem Proposta

Esta tese trata do problema da locomoção com uma abordagem que divide todo o processo em duas grandes tarefas: a geração de movimento e o controle de movimento. Além disso, a abordagem possui um conceito fundamental de que todos os algoritmos envolvidos, tanto para geração quanto para o controle da locomoção, não podem conflitar entre si. Este conceito de conflito interno diz respeito aos objetivos de movimentação envolvidos na locomoção e será explanado em detalhes no Capítulo 3.

Para compor a tarefa de geração de movimento propõe-se a utilização de um gerador de referências cinemáticas que explora o potencial da geração baseada em CPGs. O detalhe inovador que resulta em uma contribuição importante do trabalho é a mudança de paradigma no qual a geração inspirada em CPGs migra do espaço de juntas para o espaço cartesiano.

Para a tarefa de controle de movimento, por sua vez, propõe-se a utilização de uma estratégia de controle do movimento e postura do dorso aliada a uma estratégia de rejeição de perturbações externas.

Os objetivos desta tese são:

1. Desenvolver um gerador de referências cinemáticas para robôs quadrúpedes a partir de uma abordagem baseada em CPGs, com o paradigma de geração voltado ao espaço cartesiano. O gerador de referências localizado no espaço cartesiano visa contornar alguns dos inconvenientes presentes na abordagem por CPGs tradicional;
2. Propor um gerador de trajetórias que possua parâmetros que permitam modular as trajetórias e que a variação de cada parâmetro afete uma característica específica da trajetória (modulação paramétrica independente);
3. Propor funções que permitam adaptar suavemente as trajetórias geradas, de modo a emular comportamentos de reflexo ou reativos, de acordo com a superfície do terreno e dos estados do dorso (dinâmica do dorso);
4. Controlar o movimento do dorso por meio de uma estratégia de controle de postura e de uma estratégia de rejeição de perturbações para o dorso;
5. Conectar todas as estratégias desenvolvidas em uma estrutura

de geração e controle da locomoção quadrúpede onde não exista conflito de objetivo entre as ações de cada bloco.

1.3 Contribuições da Tese

As principais contribuições desta tese são:

- Uma estrutura para geração e controle da locomoção de robôs quadrúpedes que não utiliza o conhecimento prévio do ambiente;
- Um oscilador para geração de referências que possui parâmetros que podem ser associados às características da trajetória de um passo típico: altura, frequência e largura do passo;
- Uma estratégia para geração de referências para as patas baseada em CPGs que possui: capacidade adaptativa de acordo com a superfície do terreno; parâmetros diretamente relacionados às características do caminhar; e parâmetros que podem ser independentemente modulados;
- Um ajuste cinemático que possibilita desacoplar o controle do dorso do controle das pernas e que agrega um efeito reativo que emula o reflexo vestibular;
- A análise de diferentes estratégias para o controle de postura do robô;
- Uma estratégia para rejeição de distúrbios externos e controle da velocidade de deslocamento;
- A integração harmoniosa de todos os algoritmos propostos.

1.3.1 Lista de publicações

V. Barasuol, V. J. De Negri e E. R. De Pieri. WCPG: a central pattern generator for legged robots based on workspace intentions. *Dynamic Systems and Control Conference - DSCC*, Arlington/EUA, 2011.

V. Barasuol, J. Buchli, C. Semini, M. Frigerio, E. R. De Pieri e D. G. Caldwell, A Reactive Controller Framework for Quadrupedal Locomotion on Challenging Terrain. *IEEE International Conference on Robotics and Automation - ICRA*, Karlsruhe/Alemanha, 2013.

S. Bazeille, V. Barasuol, M. Focchi, I. Havoutis, M. Frigerio, J. Buchli, C. Semini e D. G. Caldwell. Vision Enhanced Reactive Locomotion Control for Trotting on Rough Terrain. *IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications - TePRA*, Massachusetts/EUA, 2013.

M. Focchi, V. Barasuol, I. Havoutis, J. Buchli, C. Semini e D. G. Caldwell. Local Reflex Generation for Obstacle Negotiation in Quadrupedal Locomotion. *16th International Conference on Climbing and Walking Robots - CLAWAR*, Sydney/Australia, 2013.

H. Khan, I. Havoutis, J. Buchli, C. Semini, V. Barasuol e D. G. Caldwell. A Tool for Robot Size Scheduling to Perform Running Trot Locomotion. *16th International Conference on Climbing and Walking Robots - CLAWAR*, Sydney/Australia, 2013.

1.4 Organização do Documento

No Capítulo 2 são introduzidas algumas definições e conceitos básicos da locomoção quadrúpede que envolvem questões sobre a estabilidade da locomoção e os padrões de marcha e são fundamentais para a compreensão dos capítulos que seguem.

Os principais desenvolvimentos e contribuições da tese estão distribuídos ao longo de três capítulos. No Capítulo 3 são apresentados os conceitos e definições que regem a arquitetura do sistema de controle proposto. Esta arquitetura é formada por dois grandes blocos que são discutidos detalhadamente em capítulos separados: o Capítulo 4 reservado para o desenvolvimento do bloco de geração de movimento e o Capítulo 5 reservado para o bloco de controle do movimento.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos, tanto experimentais quanto de simulação, juntamente com a descrição do software de simulação e da plataforma experimental utilizados. Por fim, o Capítulo 7 finaliza o documento com as conclusões e perspectivas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Locomoção Quadrúpede

2.1 Introdução

O primeiro estudo científico documentado sobre a locomoção dos animais deve-se a Eadweard Muybridge, que estudou os padrões de locomoção de cavalos a partir de fotografias de animais em trote [11, 67]. O trabalho consistia em tarefas de observação que buscavam pela compreensão e formulação matemática dos padrões de locomoção naturais. Os resultados obtidos foram publicados na revista *Scientific American* em 1878. Após este estudo inicial, Muybridge dedicou-se ainda à análise dos padrões de locomoção de quarenta outros mamíferos, incluindo o dos seres humanos.

No século XX, em meados da década de 50, foi iniciado de forma sistemática, o estudo e o desenvolvimento de máquinas de locomoção por pernas.

Por volta de 1960 começaram a ser efetivamente construídas as primeiras máquinas de locomoção. Nesta época iniciaram-se também os estudos dos padrões de locomoção de diferentes animais, tendo em vista a sua aplicação às máquinas desenvolvidas. Estes estudos centraram-se, essencialmente, na estrutura e na seleção dos modos de locomoção, tendo por base os padrões de locomoção observados nos animais.

Neste capítulo serão abordados alguns dos padrões de marcha já bem definidos na literatura, dando menor ênfase aos padrões que não estão diretamente relacionados com o desenvolvimento desta tese.

Uma primeira classificação, a qual será detalhada adiante, divide os padrões em dois grandes grupos: marchas periódicas e marchas não-periódicas. Uma vez que a proposta de tese engloba somente a geração

de padrões periódicos, os padrões não-periódicos serão brevemente descritos visando apenas a sua contextualização como uma possível abordagem.

Em seguida serão apresentadas algumas estratégias utilizadas para a implementação dos padrões de marcha para a locomoção de robôs quadrúpedes.

Este capítulo tem por objetivo fornecer informações para a compreensão do caminhar quadrúpede e de como a robótica tem trabalhado tais conhecimentos para obter a locomoção de robôs quadrúpedes.

2.2 Estabilidade da Locomoção

A primeira definição sobre estabilidade em robôs com pernas foi feita em 1968 por McGhee e Frank [62]. Estes autores concluíram sobre a estabilidade estática de um robô ideal, supondo massa desprezível para as pernas e ausência de dinâmicas, propondo a seguinte definição:

Definição 2.1 *Um robô ideal é estaticamente estável se a projeção horizontal do seu centro de gravidade (CG) reside dentro de um polígono de suporte formado pelos pontos de apoio.*

Em 1979, McGhee e Iswandhi propuseram a margem de estabilidade estática S_{SM} , uma medida da estabilidade estática definida como a menor das distâncias medidas entre a projeção do CG e as arestas do polígono de suporte, onde o polígono de suporte consiste na projeção horizontal do padrão de suporte [63]. Esta margem de estabilidade é também conhecida como a margem de estabilidade absoluta.

Em 1989, devido à complexidade de cálculo da margem estática S_{SM} , propôs-se a margem de estabilidade longitudinal S_{LSM} [116]. Esta margem consiste na menor das distâncias medidas entre a projeção do CG e as arestas frontais e traseiras do polígono de suporte ao longo do eixo longitudinal do robô. No entanto, devido às considerações de inexistência de dinâmica (massas desprezíveis), em 1990, esta margem foi redefinida pelos autores não mais considerando o eixo longitudinal do robô mas o eixo de direção do movimento, tornando a medida mais robusta com relação às considerações dinâmicas [117].

Uma medida mais eficiente para a margem de estabilidade estática foi proposta por Messuri em 1985. Esta medida, definida como a margem de estabilidade de energia S_{ESM} , fornece um valor quantitativo de estabilidade pois consiste na menor energia potencial necessária para tombar o robô em torno dos eixos do polígono de suporte [64]. Em 1998 a margem S_{ESM} foi complementada, sendo normalizada em

função da altura do CG [44]. Um exemplo de comparação das margens de estabilidade citadas é visto na Figura 2.1.

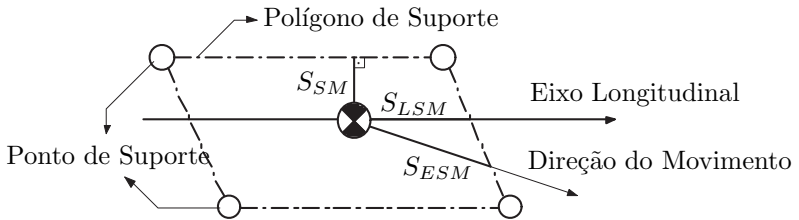


Figura 2.1: Margens de estabilidade S_{SM} , S_{LSM} e S_{ESM} .

O estudo e definição dos padrões de locomoção estaticamente estáveis tiveram consideráveis contribuições no que diz respeito ao desempenho da movimentação. A utilização de tais padrões possibilitaram a simplificação da tarefa de operação dos robôs.

A partir de resultados experimentais, os efeitos negligenciados na elaboração das margens de estabilidade estática começaram a ser percebidos. Ao aumentar a velocidade de deslocamento, por exemplo, os efeitos inerciais e de outros componentes foram presenciados, restringindo a velocidade do robô.

Em suma, a utilização dos conceitos da estabilidade estática facilitava o controle do movimento às custas da velocidade. Logo, a necessidade de aumentar a velocidade da movimentação tornou-se a motivação para os cientistas iniciarem estudos sobre a dinâmica dos robôs, de modo a agregar critérios para o controle do movimento e garantia de um caminhar estável.

Desde então, muitas medidas foram propostas com o intuito de melhor descrever as condições do robô com respeito a sua estabilidade. Tomando como base o conteúdo descrito em [37], realizou-se uma síntese da evolução dos conceitos e critérios de estabilidade para robôs com pernas. Esta síntese está apresentada por meio das tabelas 2.1 e 2.2.

Em [37], as margens de estabilidade foram avaliadas perante diferentes situações as quais os robôs quadrúpedes podem encontrar:

- **Caso 1:** Terreno plano e horizontal e ausência de dinâmica (quando as massas das partes do robô são desprezadas);
- **Caso 2:** Terreno irregular e ausência de dinâmica;
- **Caso 3:** Terreno plano e horizontal e surgimento de efeitos elás-

ticos e inerciais;

- **Caso 4:** Terreno irregular e surgimento de efeitos elásticos e inerciais;
- **Caso 5:** Terreno plano e horizontal e surgimento de efeitos elásticos e inerciais e de dinâmicas de manipulação (quando considera-se um braço manipulador fixado ao corpo do robô);
- **Caso 6:** Terreno irregular e surgimento de efeitos elásticos e inerciais e de dinâmicas de manipulação;

Tabela 2.1: Margens de Estabilidade Estática

Margens de Estabilidade Estática			
Nome	Simb.	Autoria	Características
Margem de Estabilidade	S_{SM}	McGhee e Iswandhi (1979)	Resultado ótimo p/ terrenos planos e horizontais; Computação complexa; Não considera a dinâmica da movimentação.
Margem de Estabilidade Longitudinal	S_{LSM}	Zhang e Song (1989)	Resultado aproximado de S_{SM} ; Computação simples; Não considera a dinâmica da movimentação.
Margem de Estabilidade de Energia	S_{ESM}	Messuri (1985)	Fornece uma avaliação quantitativa; Considera a altura do CG; Não considera efeitos dinâmicos.
Margem de Estabilidade Longitudinal Crab	S_{CLSM}	Zang e Song (1990)	Resultado aproximado de S_{SM} ; Computação simples; Mais robusta à presença de dinâmica; Não considera a dinâmica da movimentação.
Margem de Estabilidade de Energia Normalizada	S_{NESM}	Hirose et al. (1998)	Mesmas características de S_{ESM} , porém normalizadas em função da altura.

Os estudos mostraram que a margem S_{NESM} é a margem de estabilidade mais adequada para todas as situações estudadas, além de

ser um dos algoritmos menos complexos dentre as margens de estabilidade dinâmica.

Muitos trabalhos encontrados na literatura tratam do controle da locomoção sem a utilização de margens de estabilidade. Dentre o grupo de pesquisadores que tratam do controle da locomoção com base em margens de estabilidade, nota-se que a margem S_{NDESM} , proposta em 2005, ainda vem sendo utilizada como referência. Devido a sua generalidade, a margem de estabilidade S_{NDESM} tem sido estendida e utilizada também para robôs móveis com rodas, como é o caso do trabalho proposto em [115].

O desenvolvimento apresentado nesta tese não faz uso direto das margens de estabilidade mas o seu conhecimento é necessário para compreender algumas das aplicações do conteúdo proposto. Entretanto, considerando que este documento também possui o objetivo de sintetizar o conhecimento e auxiliar em novas linhas de pesquisa, optou-se pela descrição da margem de estabilidade S_{NDESM} .

Tabela 2.2: Margens de Estabilidade Dinâmica

Margens de Estabilidade Dinâmica			
Nome	Simb.	Autoria	Características
Margem de Estabilidade Dinâmica	S_{DSM}	Lin e Song (1993)	Considera os momentos gerados em cada eixo de rotação (aresta).
Margem de Estabilidade de Força-ângulo	S_{FASM}	Papadopoulos e Rey (1996)	Baseia-se no ângulo que relaciona as forças sobre o CG e o eixo de rotação (aresta).
Margem de Estabilidade de Queda	S_{TSM}	Yoneda e Hirose (1997)	Baseia-se nas forças e momentos de reação do solo.
Margem de Estabilidade Dinâmica pela Energia Normalizada	S_{NDESM}	Garcia e Santos (2005)	Medida de estabilidade do ponto de vista energético.

2.2.1 Margem de Estabilidade Dinâmica de Energia Normalizada

A margem de estabilidade dinâmica de energia normalizada é definida como o menor dos níveis de estabilidade necessários para tombar o robô em torno do polígono de suporte, normalizado pela massa do robô, ou seja:

$$S_{NDESM} = \frac{\min(E_i)}{mg} \quad (2.1)$$

em que E_i é representa a energia mecânica necessária para tombar o robô em torno do i -ésimo lado do polígono de suporte, sendo dada por:

$$E_i = mg |R| (\cos \phi - \cos \varphi) \cos \psi + (F_{RI} \cdot t) |R| \theta + (M_R \cdot e_i) \theta - \frac{1}{2} I_i w_i^2 \quad (2.2)$$

onde R é o vetor ortogonal ao i -ésimo lado do polígono de suporte que aponta para a posição do CG; F_{RI} é a componente não-gravitacional das forças de reação F_R , originadas da interação robô-solo; I_i é o momento de inércia em torno do eixo i , w_i é a velocidade angular do CG, ψ é o ângulo de inclinação do i -ésimo lado do polígono de suporte, e ϕ , φ e θ são os ângulos de rotação em torno do eixo i . φ é o ângulo de rotação necessário para posicionar o CG no plano vertical (conforme Figura 2.2); ϕ é o ângulo de rotação compreendido entre o plano vertical e o plano crítico, no qual ocorre o desaparecimento do momento que age sobre o CG. Por fim, θ é a adição destas duas rotações. O vetor unitário t é tangente a trajetória do CG e e_i é o vetor unitário que percorre o polígono de suporte no sentido horário.

Os primeiros três termos na equação (2.2) representam a energia potencial necessária para tombar o robô devido as forças e torques gravitacionais e não-gravitacionais, enquanto o quarto termo contabiliza a energia cinética do robô.

Segundo os autores, esta margem de estabilidade é uma das mais utilizadas, sendo a única que considera as perturbações externas sobre a estabilidade do robô. É adequada para a tomada de decisão em qualquer situação real, como em terrenos inclinados ou em situações que existam forças e momentos de manipulação.

2.3 Classificação dos Padrões de Marcha

De acordo com a língua portuguesa, a palavra *marcha* é definida como *o modo de caminhar*. No campo da locomoção por pernas, uma

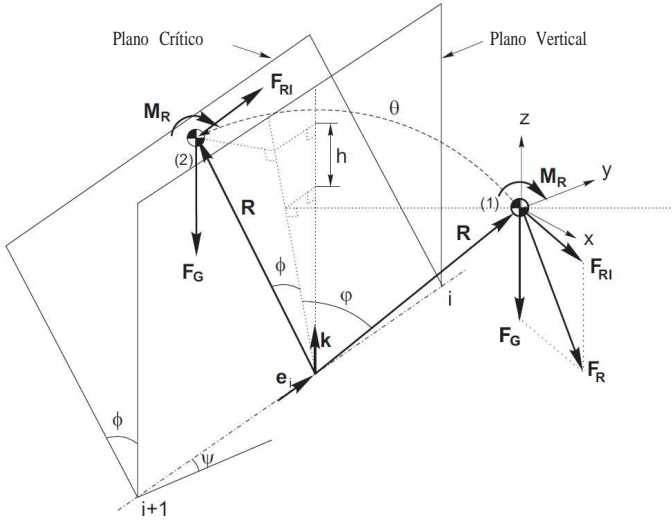


Figura 2.2: Parâmetros geométricos para computação de S_{NDESM} .

marcha é definida como um padrão repetitivo do posicionamento dos pés ou das patas [104].

Quando as pesquisas foram direcionadas ao estudo da marcha dos quadrúpedes, no que diz respeito a manutenção da estabilidade estática, introduziu-se o conceito de eventos sequenciais. Conforme descrito abaixo:

Definição 2.2 *Um evento é definido como um posicionamento de pata ou uma elevação de pata.*

Em um robô com pernas o posicionamento de uma pata é denotado pelo evento i , enquanto a elevação de uma pata é denotada pelo evento $i+n$, onde n é o número de pernas e o valor de i^1 está relacionado ao número da perna envolvida no evento. Assim, para um quadrúpede ($n = 4$), uma marcha é expressa como uma seqüência de eventos tal como 2-4-5-7-3-1-8-6, ou seja, posiciona a pata 2 - posiciona a pata 4 - eleva a pata 1 - eleva a pata 3 - posiciona a pata 3 - posiciona a pata 1 - eleva a pata 4 - eleva a pata 2. Se dois eventos ocorrem ao mesmo tempo, a marcha é então caracterizada como uma *marcha singular*. O

¹O símbolo i nesta seção não possui relação com o símbolo i utilizado na Seção 2.2.1

número possível de marchas não-singulares para quadrúpedes é uma permutação de $2n$ eventos, ou seja, $2n!$. No entanto, para um quadrúpede manter a estabilidade estática ele deve manter 3 patas em contato com o solo, em outras palavras, possuir apenas uma pata em trânsito. Isto reduz drasticamente o número de combinações estáveis, o qual resulta em um conjunto de apenas seis movimentos, como visto na Figura 2.3(b). Por convenção, o ciclo da locomoção é iniciado com a movimentação da pata 4. O número de cada pata está definido de acordo com a Figura 2.3(a). A prática da numeração das patas partindo da frente para trás, onde os números ímpares indicam as patas laterais-esquerdas e os pares as laterais-direitas, é largamente aceita na literatura. As seis seqüências, ilustradas na Figura 2.3(b), também estão representadas por fluxogramas na Figura 2.4.

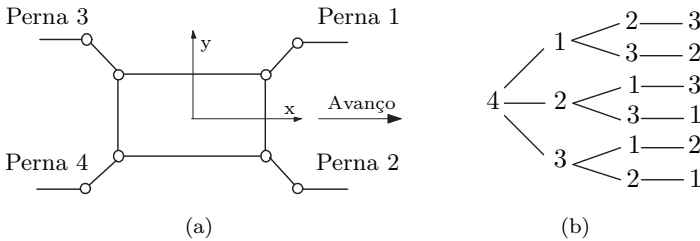


Figura 2.3: (a) Numeração das patas e (b) combinações estáveis.

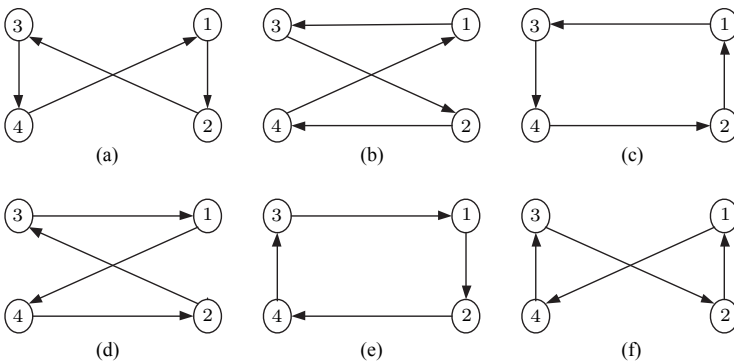


Figura 2.4: Seqüência de posicionamento das patas para uma locomoção estaticamente estável. As setas indicam a seqüência de posicionamento das patas.

No decorrer das pesquisas, estas seqüências ganharam uma for-

mulação matemática para que pudessem ser melhor caracterizadas e reproduzidas. Tal formulação matemática consiste na parametrização da locomoção, com alguns parâmetros de interesse definidos a seguir:

Definição 2.3 *O fator cíclico, β_i , da perna i é a fração do ciclo em que a respectiva pata se encontra em contato com o solo. Se β_i é igual para todas as pernas, a marcha é dita regular.*

Definição 2.4 *A fase da perna i , ϕ_{p_i} , é o tempo normalizado pelo qual o posicionamento da perna i sobre o solo está atrasado do posicionamento da perna 1 (a perna 1 é normalmente considerada a perna de referência).*

A definição dos parâmetros de locomoção, tanto quanto as características de um padrão, podem ser melhor compreendidas através da utilização de *diagramas de marcha*.

Os diagramas de marcha são ilustrações que têm a finalidade de descrever a movimentação das pernas de forma simplificada. Os diagramas se baseiam em duas situações do caminhar: a *fase de suporte*, quando a pata está suportando o corpo, e a *fase de balanço*, quando a pata está em trânsito. A fase de suporte é representada por uma linha cheia e a fase de balanço por uma linha tracejada. A partir destes diagramas também é possível registrar o instante de tempo em que as pernas mudam de uma fase para outra. O que é identificado pelo início e término das linhas cheias (fase de suporte), conforme exemplificado na Figura 2.5 para diferentes parâmetros de locomoção.

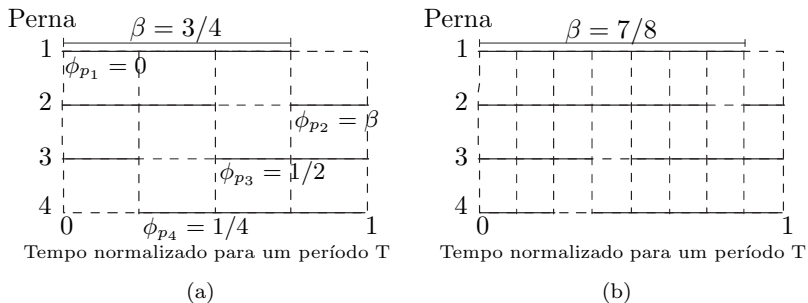


Figura 2.5: Exemplo de diagrama de marcha para diferentes parâmetros: (a) $\beta = 3/4$ e (b) $\beta = 7/8$. Em ambos os diagramas considera-se uma *marcha regular* (ver Definição 2.3). Linhas contínuas indicam que a pata está em contato com o solo (em fase de suporte).

Uma das primeiras constatações das diferentes pesquisas realizadas sobre a locomoção por pernas foi a presença de movimentos periódicos na locomoção. Esta constatação gerou a primeira classificação em dois grandes grupos, dados por *padrões periódicos* e *padrões não-periódicos*.

Nas próximas seções, uma breve explanação sobre os padrões contidos nestes dois grupos será apresentada. Um conteúdo mais detalhado dos padrões de locomoção é encontrado em [100].

2.3.1 Padrões Periódicos

As marchas periódicas são classificadas pela identificação de uma sequência repetitiva de movimento das pernas durante a locomoção.

Uma outra característica associada a este grande grupo está relacionada com a movimentação do corpo do quadrúpede. Percebe-se, em alguns destes padrões, que o corpo se desloca em um movimento constante, enquanto as pernas movem-se simultaneamente. Este tipo de marcha periódica é definida como uma *marcha contínua*. Observa-se durante uma marcha contínua que as patas executam um movimento repetitivo que sugere o traçado de uma onda. Devido a isso, este padrão de marcha também é definido como um padrão de marcha *ondulatório*.

Em terrenos muito acidentados os animais mudam o padrão de marcha para um padrão mais seguro, movendo as pernas e o corpo de maneira sequencial. São as chamadas *marchas descontínuas*, nas quais o corpo é movido para frente ou para trás enquanto as pernas permanecem postas ao solo. Neste tipo de marcha, uma perna entra em fase de balanço enquanto o corpo e as outras três pernas permanecem "interrompidas". É esta movimentação intermitente do corpo que acaba por caracterizar a marcha como descontínua.

Marchas descontínuas oferecem maior margem de estabilidade longitudinal do que as marchas ondulatórias. A movimentação sequencial é adequada para terrenos irregulares, sendo que estas marchas possuem adaptabilidade intrínseca para tais tipos de terreno.

Em terrenos que apresentam grandes buracos e protuberâncias, a marcha pode quebrar a sua periodicidade. Nestes casos, os pontos de contato e a sequência da movimentação é determinada a cada movimentação da perna, de acordo com as condições do terreno. Este tipo de padrão é chamado de *não-periódico* ou *livre*, e será melhor discutido na próxima seção.

Dentre os principais padrões de locomoção periódicos observados por Muybridge [11], citam-se aqui o caminhar, o trote e o galope. Estes

três padrões foram mencionados por serem os padrões mais utilizados pelos quadrúpedes em geral.

Com o intuito de preservar o cunho histórico da pesquisa, as imagens capturadas durante os estudos de Muybridge serão reutilizadas para a explanação dos padrões acima citados.

O primeiro movimento a ser descrito é o padrão caminhar, o qual consiste em uma marcha de quatro tempos que não apresenta fases de suspensão do corpo. Em um caminhar moderado, a marcha apresenta suspensão alternada por duas e três patas. Em geral, um caminhar pode acelerar até o ponto onde o suporte alterna entre uma e duas patas. Muybridge concluiu que os mamíferos essencialmente utilizam a sequência de passadas do caminhar. Na Figura 2.6 ilustra-se a sequência de movimentos do padrão caminhar e na Figura 2.7 apresenta-se o respectivo diagrama de marcha.

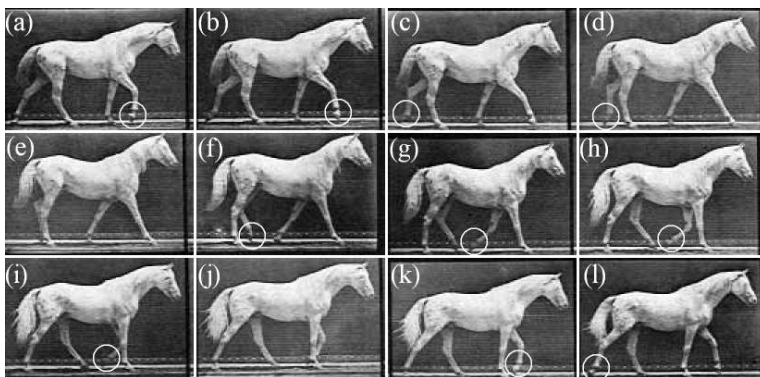


Figura 2.6: Sequência de movimentos do padrão caminhar. Os círculos indicam a pata em fase de balanço.

No padrão caminhar a fase de suporte sobre duas pernas sempre envolve uma pata dianteira e uma pata traseira, nunca ambas as pernas traseiras ou dianteiras. Quando as patas laterais estão suportando quase todo o peso do corpo, as pernas que não estão suportando o peso aparecem entre as pernas que suportam.

O trote é uma marcha diagonal de dois tempos, com períodos de suspensão entre os períodos de suporte diagonal (suporte sobre as patas dianteira-esquerda e traseira-direta ou vice-versa). No trote ideal, as patas diagonais se movem exatamente juntas. No trote real, a pata dianteira pode estar levemente à frente da pata diagonal traseira. Na

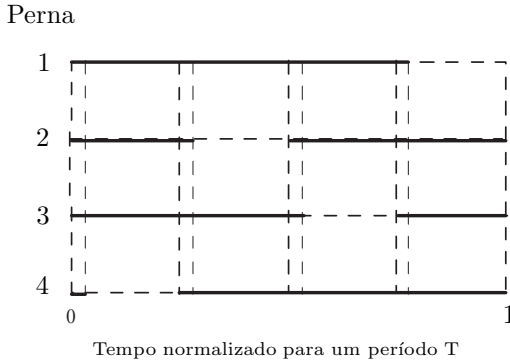


Figura 2.7: Diagrama de marcha do padrão caminhar associado à Figura 2.6. As linhas contínuas indicam as pernas em fase de suporte e as linhas tracejada indicam as pernas em fase de balanço.

Figura 2.8 a seqüência de movimentos do trote é mostrada. O diagrama de marcha que descreve a marcha trote é visto na Figura 2.9.

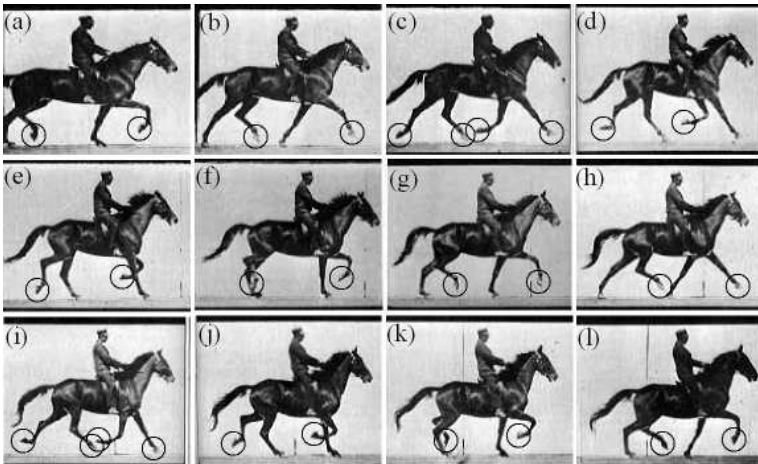


Figura 2.8: Sequência de movimentos do padrão trote. Os círculos indicam as patas em fase de balanço.

O galope é uma marcha presenciada em velocidades elevadas.

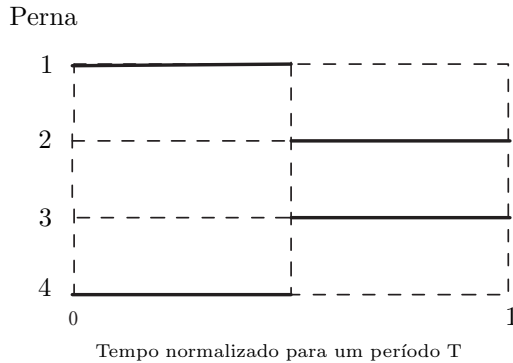


Figura 2.9: Diagrama de marcha do padrão trote associado à Figura 2.8. As linhas contínuas indicam as pernas em fase de suporte e as linhas tracejadas indicam as pernas em fase de balanço.

Este padrão é caracterizado pelo movimento balístico e pela transição suave de suporte entre as pernas dianteiras e traseiras. A sequência de movimentos do galope é apresentada na Figura 2.10 e o respectivo diagrama de marcha na Figura 2.11.

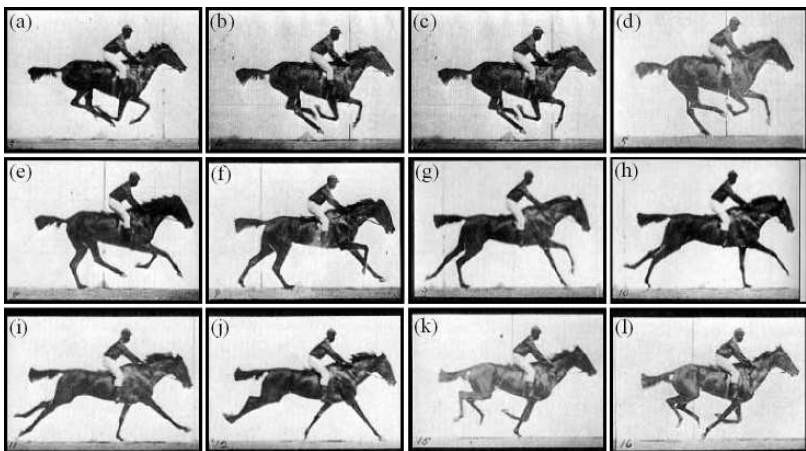


Figura 2.10: Sequência de movimentos do padrão galope.

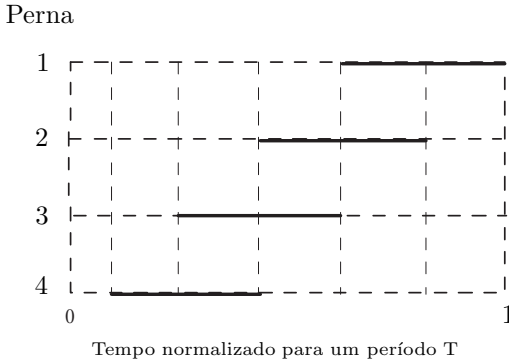


Figura 2.11: Diagrama de marcha do padrão galope associado à Figura 2.10. As linhas contínuas indicam as pernas em fase de suporte e as linhas tracejadas indicam as pernas em fase de balanço.

Os três padrões descritos são os mais utilizados pelos animais quadrúpedes e estão relacionados com a velocidade de locomoção adotada pelo animal. O padrão caminhar, recebe este nome por ser um padrão de locomoção natural para baixas velocidades. Conforme a velocidade de locomoção do animal aumenta, os padrões vão sendo alterados, com o trote sendo utilizado em velocidades intermediárias e o galope nas mais elevadas.

2.3.2 Padrões Não-Periódicos

Embora existam inúmeras vantagens apresentadas pelas marchas periódicas, verificam-se desvantagens provenientes de uma formulação rígida que dificulta a adaptabilidade da locomoção. Em marchas periódicas é possível o seguimento de trajetórias retilíneas e circulares, mas a junção destes dois elementos para a geração de trajetórias mais complexas é problemática. Isto é devido as marchas periódicas necessitarem de uma posição inicial de referência de uma pata para realizar o movimento, e estas posições dependem de uma trajetória. A dificuldade está em conectar marchas de diferentes períodos, uma vez que uma marcha totalmente adaptável deve ser capaz de encontrar os locais adequados para posicionamento do pé, bem como uma seqüência apropriada para o movimentos das pernas, de modo a seguir qualquer trajetória iniciada de qualquer condição inicial [37].

Outras limitações das marchas periódicas estão relacionadas à

locomoção em terrenos com pontos de suporte inacessíveis ou inadequados, o que remete a um algoritmo que reavalie os pontos de contato exigindo uma mudança considerável nos padrões de locomoção periódicos.

A velocidade e estabilidade da locomoção também fazem parte das características unilaterais de cada padrão. Um estudo comparativo entre estas é encontrado em [38], onde é demonstrado que a margem de estabilidade longitudinal dos padrões de locomoção descontínuos é superior à dos padrões de locomoção contínuos. Por outro lado, é demonstrado que os padrões de locomoção contínuos permitem velocidades mais elevadas, para baixos valores do tempo de suporte (situação em que estes padrões apresentam reduzidas margens de estabilidade) [28].

Devido a estes inconvenientes, surgiram os primeiros estudos sobre as *marchas livres* ou *marchas não-periódicas* [54]. Em uma marcha livre, a sequência de movimento das pernas, as posições de suporte e o movimento do corpo são planejados de modo flexível como uma função da trajetória, das características do solo e dos estados da máquina. Portanto, as marchas não-periódicas são mais eficientes do que as periódicas ou adaptativas quando se faz necessário um maior nível de mobilidade em terrenos muito acidentados.

2.3.3 Padrões Quase-Periódicos

Em terrenos planos e regulares os animais podem se locomover sem necessidade de alterações na marcha, podendo permanecer em um padrão periódico. No entanto, na presença de obstáculos o animal é forçado a alterar a sequência de movimento de alguma de suas pernas para conseguir uma transposição. Após transpor o obstáculo, o animal continua a sua locomoção retornando ao padrão que estava. Visto que o padrão utilizado antes e depois da transposição do obstáculo é o mesmo, esta sequência de movimentos é definida como um padrão *quase-periódico*. Esta classificação foi introduzida em [28] para o estudo de estratégias para transposição de obstáculos.

Este conceito de padrões quase-periódicos está sutilmente inserido no contexto desta tese, uma vez que a tese concentra-se na geração e modulação de padrões periódicos para locomoção em terrenos irregulares.

2.4 Implementação da Locomoção em Robôs Quadrúpedes

Nas seções anteriores foram apresentadas a classificação geral e alguns dos padrões de marcha da locomoção quadrúpede.

Como mencionado anteriormente, o Capítulo 2 está dividido em duas partes. Com esta seção dá-se início à segunda parte na qual são apresentadas algumas das estratégias, presentes no estado da arte, que são utilizadas para obter a locomoção de robôs com pernas.

Apesar de muito observar-se os padrões de locomoção dos animais, nem todas as abordagens de implementação visam obter a locomoção provendo referências cinemáticas que imitam tais padrões. Na verdade, existe uma vasta gama de abordagens que se distribuem entre os princípios do controle de força e do seguimento de referências cinemáticas.

Os avanços mais notórios na locomoção de robôs com pernas deu-se na década de 80 quando Marc Raibert propôs uma estratégia de controle de balanço para robôs com uma, duas e quatro pernas [80, 81, 82]. Na década de 90, Jerry Pratt introduziu o conceito de modelos virtuais realizando o controle de um robô flamingo (duas pernas) [75, 77], sendo posteriormente estendida a robôs multi-pernas [105]. Gabriel Nelson propôs um controle de postura para a movimentação do dorso durante a fase de suporte, mas não determinou como obter as referências cinemáticas para a perna na fase de balanço [69]. De um modo geral, as abordagens citadas neste parágrafo circundam o princípio do controle de força que resulta da interação da pata com o solo.

Em outra vertente, seguem as abordagens concentradas na obtenção de referências cinemáticas. Nesta linha de pesquisa está situada a maior gama de estratégias para a implementação da locomoção por pernas. Embora estas propostas envolvam as mais diversas abordagens – como redes neurais [61], lógica nebulosa [41], máquinas de estado [33], planejamento de trajetórias [94], otimização [72, 97], funções cíclicas [109], Gerador de Padrões Central (CPGs) [46], campos potenciais [36], entre outros – todas convergem para a obtenção de uma posição de referência para cada junta do robô.

Entre ambas as abordagens estão as que fazem o seguimento de referências cinemáticas por meio de uma ação de controle mais sofisticada, baseada em modelo, que envolve o controle direto ou indireto das forças de apoio. Como por exemplo: atuação complacente baseada em controle de torque [10, 32]; controle de força e posição [118]; controle de impedância [4, 74, 113]; controle de impedância variável por apren-

dizagem [19, 20]; o controle de impedância ótimo baseado na inércia do modelo [47]; e o controle por dinâmica inversa via decomposição QR [65].

Visto a impossibilidade de se descrever todas as estratégias acima citadas, apresenta-se a seguir em maior detalhe algumas das estratégias consideradas mais bem sucedidas ou que despontam como abordagens promissoras para a implementação da locomoção quadrúpede, sendo elas: o controle de balanço, o controle por modelos virtuais, o controle por dinâmica inversa via decomposição QR, e a geração de padrões baseada em CPGs. Uma maior ênfase será dada a geração de referências por meio de CPGs, uma vez que o conceito desta abordagem está profundamente relacionada ao desenvolvimento da tese.

2.4.1 Controle de Balanço

O controle de balanço, proposto em [80], é uma abordagem que foi inicialmente desenvolvida para os chamados *hopping robots* (ver Figura 2.12). Estes robôs, sejam eles de uma ou mais pernas, utilizam o pulo como modo de locomoção. A proposta desta abordagem foi inspirada no modo de locomoção de alguns animais, como por exemplo, o canguru e o veado. Embora a estratégia seja inicialmente definida para robôs de uma única perna, a sua extensão para robôs multi-pernas pode ser feita pelo emprego do conceito da *perna virtual* (do inglês, *virtual leg*).

O algoritmo de controle está baseado em três critérios que são analisados ao longo do movimento do robô, o qual considera-se dividido em duas fases: uma fase de suporte (perna em contato com o solo) e uma fase balística ou fase de vôo (nenhuma perna em contato com o solo). Estes três critérios são: a velocidade de deslocamento, a altura do pulo e a orientação do dorso.

Durante a fase de suporte controla-se a altura do pulo e a orientação do corpo do robô. A altura do pulo é controlada pela energia adicionada para impulso. Quanto maior a força de impulsão aplicada pela perna, maior a velocidade com que o robô entra na fase balística e por consequência a altura máxima atingida. A orientação do corpo, por sua vez, é controlada de modo a manter o seu eixo azimutal paralelo ao eixo da gravidade.

Durante a fase balística controla-se a velocidade da locomoção. Para isso, utiliza-se o conceito de *ponto neutro*. O ponto neutro é distância relativa entre o ponto de apoio da perna e o centro de massa do robô. Se o ponto de apoio da perna atinge o ponto neutro, na entrada

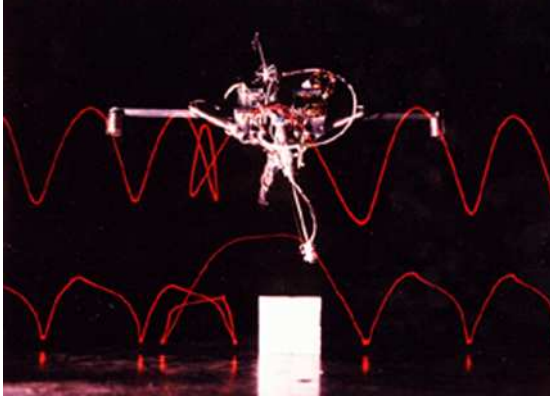


Figura 2.12: Cena capturada de experimentos realizados por Marc Raibert com um *hopping robot* para estudo do controle de balanço. As linhas ondulatórias consistem na trajetória do dorso (linha superior) e na trajetória do pé (linha inferior).

da fase de suporte, a velocidade de locomoção é mantida constante. Uma distância de apoio anterior ao ponto neutro resulta na aceleração do movimento. De modo contrário, uma distância posterior causa a desaceleração do movimento. Esta rede de aceleração produzida em função do ponto de contato está ilustrada na Figura 2.13.

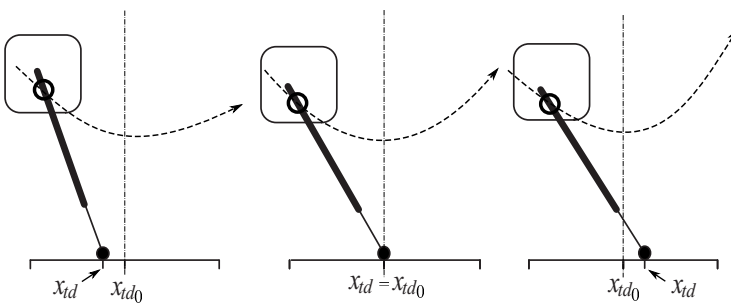


Figura 2.13: Ilustração da trajetória realizada pelo centro de gravidade de acordo com a distância relativa entre o ponto de contato x_{td} e o ponto neutro x_{td0} .

O ponto neutro, definido como x_{td0} , é calculado da seguinte

forma:

$$x_{td0} = \frac{\dot{x}T_s}{2} \tag{2.3}$$

na qual \dot{x} é a velocidade de avanço e T_s é o tempo da fase de suporte.

A velocidade de avanço é controlada por meio de um ganho proporcional de velocidade $K_{\dot{x}}$ que desloca o ponto de apoio desejado, definido como x_f , em torno do ponto neutro em função do erro de velocidade:

$$x_f = \underbrace{\frac{\dot{x}T_s}{2}}_{x_{td0}} + K_{\dot{x}}(\dot{x} - \dot{x}_d) \tag{2.4}$$

na qual \dot{x}_d é a velocidade desejada.

2.4.2 Controle de Modelo Virtual

O controle de modelo virtual foi inicialmente desenvolvido e testado em robôs bípedes, cujas morfologias foram inspiradas nos corpos do flamingo e do peru. A essência desta estratégia é acoplar elementos virtuais em torno do corpo de modo a gerar forças virtuais em torno do centro de gravidade do robô e, a partir do modelo matemático, encontrar os torques nas juntas que produzem estas forças. A Figura 2.14 ilustra o arranjo destes elementos em torno do robô. Jarry Pretti batizou seu principal elemento virtual como *granny-walker* que, traduzido ao português, significa andador de velho.

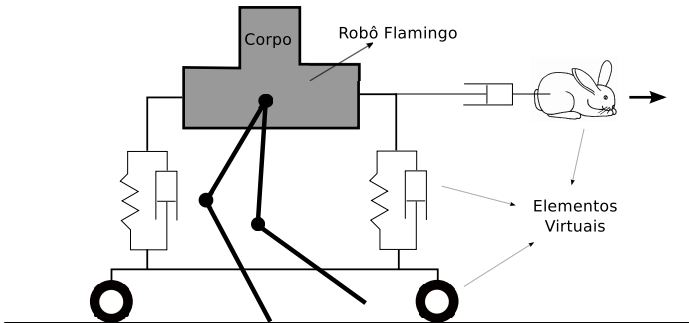


Figura 2.14: Elementos virtuais como um andador de velho, molas e amortecedores são conectados ao robôs flamingo para geração de forças e momentos para o controle da postura e do movimento do robô.

O andador de velho, ilustrado na Figura 2.14, permite o avanço e recuo do robô ao mesmo tempo que porta elementos virtuais que

possuem a função de manter a postura do corpo. Para gerar o avanço e recuo do robô, um amortecedor é conectado entre o corpo do robô e um outro elemento virtual (coelho) que se desloca em velocidade específica. A diferença de velocidade entre o corpo e o elemento virtual que se desloca gera a força de avanço ou recuo pelo efeito do amortecedor.

Esta estratégia intuitiva é analogamente estendida para robôs multi-pernas [105]. Os passos que compõe este algoritmo de controle estão descritos no diagrama de blocos da Figura 2.15.

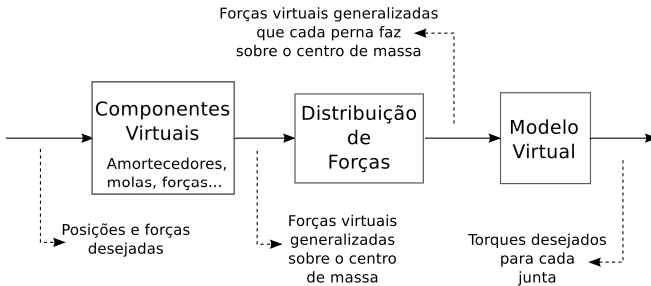


Figura 2.15: Diagrama de blocos que ilustra as etapas do algoritmo para obtenção dos torques nas juntas que reproduzem as forças e momentos virtuais.

O cálculo da distribuição de forças é a principal diferença entre o algoritmo aplicado para robôs bípedes e o algoritmo aplicado para robôs multi-pernas. O fato de robôs multi-pernas resultarem em uma estrutura paralela quando em fase de suporte retira a trivialidade da abordagem. Com mais de uma perna em contato com o solo, se faz necessário um algoritmo de distribuição de forças. Jerry Pratt, propôs uma estratégia para tal distribuição [76, 77], a qual é uma extensão do Método de Distribuição de Força de Gardner [34, 35].

2.4.3 Controle por Dinâmica Inversa via Decomposição QR

A decomposição QR é uma técnica matemática utilizada para a decomposição de matrizes, onde uma matriz é descrita como o produto de uma matriz ortogonal Q por um matriz triangular superior R . Nesta estratégia, a decomposição QR é utilizada para desacoplar o modelo dinâmico do robô quadrúpede e obter uma ação de controle por dinâmica inversa que não depende do sensoramento das forças de

contato [65].

Nesta abordagem o modelo matemático da dinâmica do robô está baseado no conceito de base flutuante, um arranjo derivado da formulação no espaço operacional [50], no qual trabalha-se com dois sistemas de coordenadas [73, 91, 92]: um sistema de coordenadas global, que é chamado de sistema de coordenadas inercial, e um sistema de coordenadas fixo ao corpo do quadrúpede, que é chamado de sistema de coordenadas móvel ou da base flutuante. Do ponto de vista cinemático, considera-se que o sistema de coordenadas anexado a uma base no robô está conectado à base inercial por meio de três juntas rotativas e três juntas prismáticas, sendo todas passivas. A partir destas seis juntas, a posição e orientação da base flutuante é obtida, conforme a Figura 2.16.

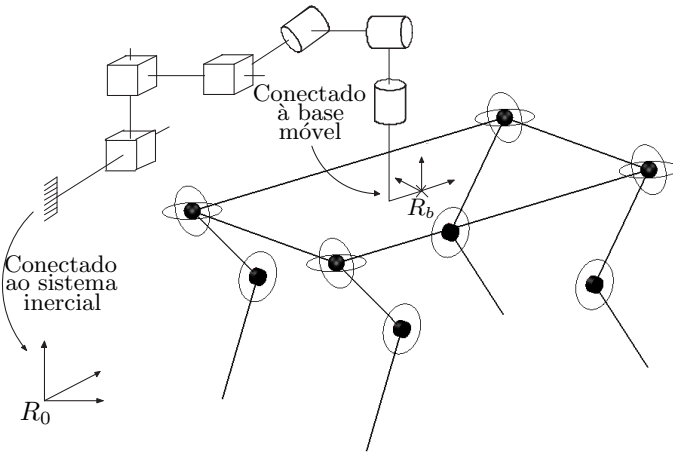


Figura 2.16: Relação cinemática entre o sistema móvel e o sistema inercial.

Com isso, os vetores das variáveis de posição e orientação são definidos com base no sistema de coordenadas inercial:

$$q = [q_r^T \quad x_b^T]^T \tag{2.5}$$

onde $q_r \in \mathbb{R}^n$ é o vetor de posição das n juntas do robô quadrúpede e $x_b \in \mathbb{R}^6$ é o vetor de posições e orientações do sistema de coordenadas anexado à base do robô, sendo este último medido com relação à base inercial.

A partir da computação do Lagrangeano do sistema, da consideração das forças de restrição originadas do contato das patas com o

solo e da existência de juntas passivas, o modelo matemático do robô quadrúpede é descrito como:

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = S^T \tau_r + J_C^T(q)\lambda \quad (2.6)$$

onde $M(q) \in \mathfrak{R}^{(n+6) \times (n+6)}$ representa a matriz de inércia e $h(q, \dot{q}) \in \mathfrak{R}^{n+6}$ o vetor de forças centrífugas, de Coriolis e gravitacionais. O vetor de torque das juntas atuadas é denotado por $\tau_r \in \mathfrak{R}^n$. A matriz de seleção $S = [I_{n \times n} \ 0_{n \times 6}]$ seleciona as juntas ativas e $J_C(q_r) \in \mathfrak{R}^{k \times (n+6)}$ é o jacobiano das restrições que relaciona as forças de reação, representadas por $\lambda \in \mathfrak{R}^k$, com os torques nas juntas.

A técnica de decomposição QR é utilizada para decompor o Jacobiano das restrições da seguinte forma:

$$J_C^T = Q[R^T \ 0]^T \quad (2.7)$$

na qual Q é uma matriz ortogonal ($QQ^T = Q^TQ = I$) e R é uma matriz triangular superior de posto k . Além disso, se R está restrita a conter todos os elementos da diagonal positivos, então Q e R são únicos. Multiplicando a Equação (2.6) por Q^T permite desacoplar a dinâmica do corpo em duas equações independentes:

$$S_c Q^T (M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q})) = S_c Q^T S^T + R\lambda \quad (2.8)$$

$$S_u Q^T (M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q})) = S_u Q^T S^T \tau \quad (2.9)$$

nas quais

$$S_c = [I_{k \times k} \ 0_{k \times (n+6-k)}] \quad (2.10)$$

$$S_u = [0_{(n+6-k) \times k} \ I_{(n+6-k) \times (n+6-k)}] \quad (2.11)$$

são matrizes utilizadas para selecionar a equação superior e inferior do modelo completo.

Logo a dinâmica inversa pode ser obtida, sem a necessidade da leitura das forças de contato, por meio da Equação (2.9):

$$\tau_{DinInv} = (S_u Q^T S^T)^+ S_u Q^T (M(q)\ddot{q}_d + h(q, \dot{q})). \quad (2.12)$$

A substituição de τ na Equação (2.6) por τ_{DinInv} leva a relação $\ddot{q} = \ddot{q}_d$. Esta relação de igualdade é assegurada sempre que não for violada a condição de que as patas em contato com o solo possuem movimento nulo.

Por fim, pode-se obter uma ação de controle com base na dinâmica inversa sem a necessidade de sensoriamento das forças de contato, como por exemplo:

$$\tau = \tau_{InvDyn}(q, \dot{q}, \ddot{q}_d) + K_P S(q_d - q) + K_D S(\dot{q}_d - \dot{q}). \quad (2.13)$$

A ação de controle da Equação (2.13) permite realizar o seguimento de referências cinemáticas com menor erro e ajustar a complacência dos membros do robô para fazer frente as imprecisões do planejamento de trajetórias.

2.4.4 Gerador Central de Padrões

Para uma melhor compreensão das proposições e resultados apresentados ao longo do documento de tese, uma breve descrição sobre alguns modelos propostos para descrição dos CPGs e sua utilização na geração de trajetórias em robôs com pernas será apresentada. Uma discussão mais detalhada sobre CPGs do ponto de vista da neurofisiologia é encontrada em [29].

Dentre os modelos de CPGs já implementados em robôs, pode-se citar os baseados em conceitos conexionistas, mapas vetoriais, redes neurais e sistemas de osciladores acoplados. Na prática, todas estas implementações se resumem a um conjunto de equações diferenciais acopladas que são numericamente integradas em um processador ou microcontrolador.

Segundo [111], o CPG apresenta diversas vantagens quando utilizado como um mecanismo de controle para locomoção:

- É capaz de produzir sinais com padrões periódicos mesmo sem a entrada de sinais sensoreados ou de camadas superiores de decisão, embora a atividade do CPG também possa ser modulada através de sinais sensoreados ou de ordens superiores. Com a utilização de métodos baseados em CPG, os robôs são capazes de andar tanto em terrenos planos, em um controle tipo malha aberta, quanto em terrenos irregulares, de forma adaptativa por meio de realimentações.
- É um método de controle distribuído. Normalmente uma unidade de CPG controla uma junta do robô e uma rede de CPGs coordena todas as juntas para obter um movimento. Por meio da modulação dos parâmetros de uma rede de CPGs é possível obter sinais de saída que possuam relações de defasagem entre si. Estas relações são então determinadas para obtenção de diferentes padrões de locomoção.
- É capaz de se adaptar ao meio. O processo de planejamento do movimento é separado da malha de controle, a qual é realizada pelo método tradicional. Uma rede de CPGs é um sistema dinâmico que combina o sistema neuronal, o corpo e o ambiente.

O sistema neuronal produz sinais para controlar o corpo e mover-se em um ambiente. As reações do ambiente sobre o corpo modificam os parâmetros do sistema neuronal, modificando os sinais de controle.

Na Figura 2.17 ilustram-se as relações de interação entre o ambiente, o corpo, o CPG e o cérebro. O corpo e o ambiente interagem com as forças de ação e reação das patas. O CPG interage com o corpo pela geração dos padrões rítmicos. O cérebro controla as atitudes do corpo, a partir das informações recebidas pelo sistema nervoso sensitivo, e possui a hierarquia de mais alto nível para reajustar os parâmetros do CPG quando necessário. Nesta estrutura, apenas a relação entre o CPG e o cérebro é unidirecional.

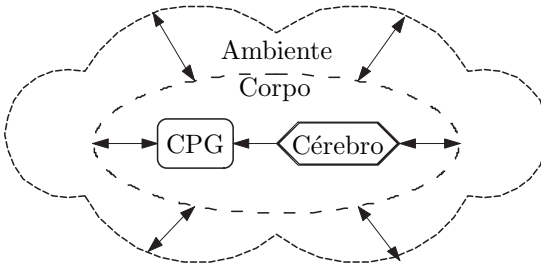


Figura 2.17: Simplificação da interação entre partes envolvidas na locomoção.

O controle de locomoção em quadrúpedes usando CPGs tem sido extensivamente explorada pelas possibilidades de se agregar sinais realimentados para modulação da atividade do CPG. Esta interação entre a informação do estado do corpo do quadrúpede e o CPG tende a melhorar o controle da locomoção em terrenos complexos, diferentemente do que ocorre nos casos em que a realimentação não possui ligação com o CPG.

Para a geração de movimentos trabalha-se com a ideia do acoplamento de CPGs [59]. Por meio de acoplamentos, os padrões de marcha são obtidos controlando-se a defasagem entre cada saída, a partir de um processo de sincronização. De um modo geral, o acoplamento é obtido por meio de funções que relacionam as saídas de forma ponderada, e o sincronismo é obtido por meio do valor de cada ponderação. Em robôs quadrúpedes, cada CPG é comumente implementado de modo a fornecer a referência para uma junta do robô, resultando em um CPG

2.4. Implementação da Locomoção em Robôs Quadrúpedes 41

por grau de liberdade, ou implementado quatro CPGs, um para cada junta do quadril. Nesta última abordagem, a referência para as outras juntas do robô é obtida por meio de funções arbitrárias que relacionam uma junta com a sua respectiva do quadril (a qual é regida por um CPG). Na Figura 2.18 este último exemplo é ilustrado.

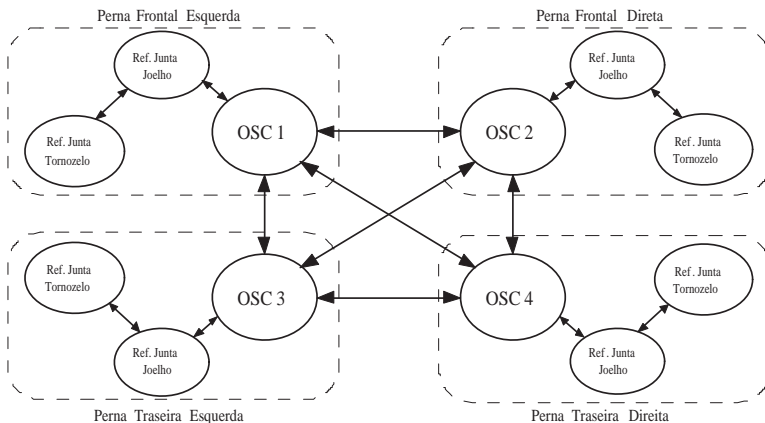


Figura 2.18: Acoplamento entre CPGs para geração do movimento.

Observou-se que as pesquisas na reprodução da atividade dos CPGs se dividiram em duas perspectivas: os modelos matemáticos que representam a atividade neuronal que produz padrões rítmicos e os modelos matemáticos baseados em osciladores não-lineares. Com relação ao primeiro caso, os modelos de CPGs baseados no comportamento neuronal, pode-se citar o modelo de FitzHugh-Nagumo [68], o qual é uma simplificação do modelo Hodgkin-Huxley (H-H) [45], o modelo de Stein [101] e o oscilador neuronal de Matsuoka [60]. Com respeito aos modelos da segunda perspectiva, a qual é baseada em osciladores não-lineares e mais focada na geração dos padrões, pode-se citar o oscilador de fase de Kuramoto [1], o modelo de Hopf, o modelo de Van der Pol [107] e o modelo de Rayleigh [83]. Cabe salientar que estes modelos são aqui citados por constituírem a base de muitas formulações encontradas na literatura.

Apesar dos inúmeros modelos propostos e do esforço crescente no desenvolvimento de novos CPGs, ainda existem muitas lacunas na teoria da locomoção quando o estudo envolve a modelagem do sistema como um todo, mais precisamente, uma modelagem que considere tanto a dinâmica dos CPGs quanto a dinâmica de interação corpo-ambiente.

Além da questão da análise do sistema como um todo, também salienta-se a ausência de uma metodologia de projeto bem estabelecida para CPGs, como discutido em [18]. Devido a isso, tem-se proposto configurações de CPGs nas mais distintas abordagens, como é o caso desta proposta de tese.

Do ponto de vista da engenharia, a principal tarefa de um CPG é produzir padrões oscilatórios periódicos ao invés de simular o comportamento neuronal. Assim, os modelos matemáticos não-lineares que representam os osciladores têm sido amplamente utilizados para emular a atividade dos CPGs, visto que esta modelagem por osciladores está suportada por uma vasta fundamentação teórica em sistemas dinâmicos.

A proposta da tese segue nesta mesma linha de pensamento, estando focada na análise e desenvolvimento de CPGs baseados no acoplamento de osciladores não-lineares para geração dos padrões.

Com o intuito de esclarecer sobre o modo de utilização dos CPGs na geração e controle da locomoção, duas propostas recentes serão descritas.

Em [56] é proposto um CPG que corresponde a um oscilador de fase, de amplitude controlada, sendo uma adaptação do modelo proposto por Kuramoto [1]. O sistema de equações diferenciais que descreve tal CPG é dado por:

$$\dot{\theta}_i = w_i + \sum \lambda_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i - \Delta\phi_{ij}) \quad (2.14)$$

$$\ddot{r}_i = \mu_i^2 (R_i - r_i) - \frac{3}{2} \mu_i \dot{r}_i \quad (2.15)$$

$$x_i = r_i (1 + \sin \theta_i) \quad (2.16)$$

Este conjunto de equações envolve o acoplamento de N osciladores de fase, onde θ_i e w_i correspondem a fase e a frequência do i -ésimo oscilador, respectivamente. Cada oscilador na Equação (2.14) tenta oscilar independentemente na sua própria frequência, enquanto o termo de acoplamento λ_{ij} tende a sincronizá-lo com os outros osciladores. O termo $\Delta\Phi_{ij}$ denota o defasamento desejado entre os osciladores i e j . A Equação (2.15) assegura que a amplitude r_i convergirá assintoticamente e monotonicamente para R_i , permitindo modular suavemente a amplitude do oscilador. O parâmetro μ_i é uma constante positiva. Por fim, a Equação (2.16) é uma transformação da fase instantânea interna para o sinal de ângulo externo, sendo a saída x_i a referência de posição da junta i . Nesse trabalho, implementado em um robô AIBO, foram utilizados quatro osciladores. Um para cada junta de quadril do robô. Para as juntas de joelho, a referência foi definida como uma função da

posição da respectiva junta de quadril.

A velocidade de locomoção não possui relação direta com os parâmetros do oscilador, porém é possível ajustá-la por meio da frequência angular w_i e da amplitude do oscilador R_i . O padrão de marcha é obtido através da escolha dos termos de acoplamento λ_{ij} , alterando entre padrões como o caminhar, o trote, o passo e o salto. Para complementar o exemplo, as matrizes de acoplamento Λ , formadas pelos elementos λ_{ij} , estão descritas a seguir para os padrões caminhar e trote.

$$\Lambda_{Caminhar} = \begin{bmatrix} 0 & \pi & \pi/2 & \pi/2 \\ -\pi & 0 & -\pi/2 & \pi/2 \\ -\pi/2 & \pi/2 & 0 & \pi \\ -\pi/2 & -\pi/2 & -\pi & 0 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\Lambda_{Trote} = \begin{bmatrix} 0 & \pi & 0 & \pi \\ \pi & 0 & \pi & 0 \\ 0 & \pi & 0 & \pi \\ \pi & 0 & \pi & 0 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

O segundo exemplo de CPG é um sistema de osciladores não-lineares acoplados baseado no modelo de Hopf [86, 87]. Os autores propuseram modificações no modelo original de modo a tornar a frequência de cada oscilador dependente da sua fase. Além disso, introduziram um termo de modulação que permite uma informação externa interagir com a convergência do ciclo limite. Ou seja, é possível modular a locomoção em função de um sinal realimentado da dinâmica corpo-ambiente. Tal CPG é descrito como:

$$\dot{x}_i = \alpha(\mu - r_i^2) - w_i y_i \quad (2.19)$$

$$\dot{y}_i = \beta(\mu - r_i^2) + w_i x_i + \sum k_{ij} y_j + u_i \quad (2.20)$$

$$w_i = \frac{w_{suporte}}{e^{-by_i} + 1} + \frac{w_{balanço}}{e^{by_i} + 1} \quad (2.21)$$

onde $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, w é a frequência de oscilação, $\sqrt{\mu}$ é a amplitude de oscilação. Os parâmetros $w_{suporte}$ e $w_{balanço}$ são as frequências para as fases de suporte e balanço, respectivamente. Os coeficientes α e β são constantes positivas que controlam a velocidade de convergência do ciclo limite. O sincronismo entre os osciladores é obtido através do termo de acoplamento dado pelo somatório $\sum k_{ij} y_j$, onde a escolha dos coeficientes k_{ij} definem o padrão de marcha resultante.

O diferencial nesta estrutura está na entrada de controle u_i , a qual permite tanto parar a oscilação quanto acelerá-la dentro de uma

região específica do ciclo limite. Este artifício adiciona robustez a locomoção, uma vez que é possível modular a geração em função do estado do robô, por exemplo, em uma situação em que a pata já deveria estar ou em fase de suporte ou em fase de balanço.

De modo similar ao trabalho anterior, este CPG também opera no espaço de juntas fornecendo quatro referências de posição angulares, através das variáveis x_i ($i = 1, 2, 3, 4$), para as juntas de quadril. As juntas de joelho, por sua vez, recebem referências que são função (arbitrárias) das respectivas juntas de quadril.

A partir destes dois exemplos, pode-se compreender melhor sobre como um CPG é utilizado para geração dos padrões, bem como a funcionalidade de cada termo com relação a sincronia e a modulação da forma do ciclo limite gerado.

Com base na revisão bibliográfica realizada, verificou-se que as pesquisas vêm sendo desenvolvidas utilizando uma geração ou a partir de trajetórias planejadas no espaço Cartesiano, espaço em que o robô se desloca, ou de CPGs implementados no espaço de juntas. Cada abordagem apresenta características bem distintas com relação a tarefa de implementação e ao desempenho. Ao longo do documento de tese, uma discussão mais precisa sobre as vantagens e desvantagens da geração via CPG e a utilização de trajetórias baseadas no espaço Cartesiano será realizada, tendo fundamental importância na fundamentação e esclarecimento das contribuições da tese que estão voltadas à geração de referências cinemáticas.

2.5 Síntese do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos e definições sobre a locomoção quadrúpede. Partiu-se de um contexto histórico, envolvendo a observação e classificação dos padrões de marcha, e finalizou-se o capítulo com algumas das estratégias mais bem sucedidas ou promissoras para a implementação da locomoção em robôs com pernas. O intuito deste capítulo foi de fornecer ao leitor o conhecimento para a compreensão das proposições e resultados que seguem no próximos capítulos.

Dentre as classificações dos padrões de marcha, a tese está enquadrada entre a reprodução de padrões periódicos e quase-periódicos. A proposta da tese considera inicialmente a reprodução de padrões periódicos, no entanto, a tese também propõe a modulação destas trajetórias primitivas, o que pode levar a um padrão com movimento quase-periódico.

Dentre as estratégias de implementação relacionadas, uma maior ênfase foi dada à abordagem via CPGs devido à tese propor uma estratégia para geração de referências cinemáticas que explora o potencial desta abordagem.

Todas as estratégias apresentadas para a implementação da locomoção, apesar do cunho de revisão bibliográfica, estarão inseridas de algum forma no contexto das propostas e servirão para a realização de paralelos ao longo do documento.

Capítulo 3

Sistema de Controle Reativo (SCR)

No Capítulo 2 foram apresentadas algumas estratégias utilizadas para a implementação da locomoção em robôs quadrúpedes. Como pode-se perceber, o controle das referências cinemáticas de cada articulação do robô e o controle do dorso são duas abordagens da locomoção que, de um modo geral, são aplicadas separadamente. Em outras palavras, durante a locomoção, ou trabalha-se com uma abordagem ou com a outra, às vezes, com ambas em um modo alternado.

Neste trabalho de tese chama-se a atenção para uma perspectiva em que a tarefa de controle da locomoção em robôs quadrúpedes deve atentar à dois pontos: ao dorso do robô e às patas do robô. O dorso do robô é, por um princípio análogo aos animais quadrúpedes, o componente mais importante dentre os membros do corpo a serem deslocados. É normalmente no dorso que se encontram os elementos vitais para o funcionamento do robô, como o computador central, o sistema de potência, o sistema de visão e, sobretudo, a carga. Por isso, apenas deslocar o dorso não é suficiente. Controlar o seu movimento deve ser um dos objetivos das tarefas que envolvem o controle da locomoção. Igualmente importante é o controle da posição das patas do robô. Será a mudança correta do ponto de apoio de cada pata e o deslocamento relativo de cada pata ao dorso que permitirá, por essência, que ocorra a locomoção. Pontos de apoio e movimentos relativos ao dorso incorretos podem levar ao tombamento (instabilidade) ou a movimentos oscilatórios/vibratórios indesejáveis para o dorso. Oscilações ou vibrações do dorso perturbam o sinal adquirido por sensores de posição

e de visão, dificultando o processamento de sinais e assim a estimação de estados do corpo e do ambiente.

Buscando situar a proposta desta tese dentre as várias estratégias propostas na literatura para a locomoção quadrúpede, faz-se aqui uma classificação com base na perspectiva do controle da locomoção de robôs quadrúpedes. As estratégias encontradas na literatura podem ser classificadas de acordo com as seguintes características:

- **Tipo 1:** estratégias que consistem na geração de referências cinemáticas para cada junta do robô em malha aberta. Ou seja, uma geração independente do estado do corpo/dorso do robô;
- **Tipo 2:** estratégias que consistem na geração de referências cinemáticas, porém, modulando-as por meio da realimentação/informação de algum estado relacionado ao corpo/dorso do robô ou à interação robô-ambiente;
- **Tipo 3:** estratégias que utilizam a geração de referências cinemáticas em malha aberta e o controle de força de cada pata por meio da realimentação/informação de algum estado relacionado ao corpo/dorso do robô ou à interação robô-ambiente;
- **Tipo 4:** estratégias que consistem na geração de referências cinemáticas e no controle de força (direto ou indireto), ambos calculados de acordo com a informação de algum estado do corpo/dorso do robô ou da interação robô-ambiente.

Estratégias do Tipo 4 tendem a ser mais robustas por que todas as atividades, que envolvem o planejamento/geração de referências cinemáticas e o controle do dorso ou membros, dependem de alguma relação ou interação do robô com o ambiente. Esta maior dependência significa, além de uma maior quantidade de informação realimentada, um maior acoplamento entre o robô e o ambiente que possibilita realizar uma interação mais coerente. O sistema de controle reativo proposto nesta tese se enquadra na classificação como uma estratégia do Tipo 4.

Ainda que existam inúmeros trabalhos abordando aspectos isolados de todo o problema de planejamento/geração e controle da locomoção, são raras as soluções que consideram todos estes elementos – em uma estratégia Tipo 4 – de uma maneira sistemática e coerente. Um dos grandes desafios no controle da locomoção quadrúpede é a realização simultânea do controle cinemático dos efetadores finais (patas) e o controle dinâmico do dorso do robô, sem que haja o conflito de interesse entre as ações de controle de cada atividade.

Para fazer frente a este desafio, ao longo dos próximos capítulos será apresentada uma estrutura para a geração de padrões de marcha e controle reativo da locomoção quadrúpede. A estrutura de controle é dita reativa por realizar ações que não dependem de processamentos do tipo preditivo ou cognitivo. Salienta-se que a tomada de decisão com base em predição e percepção é uma habilidade muito desejada para os robôs quadrúpedes. A percepção e o planejamento com base em predição são componentes de alto nível que podem elevar significativamente o grau de robustez de uma locomoção. No entanto, um robô sem reflexos pode se tornar vulnerável frente às imprecisões de medição e incertezas de modelo. Logo, esta tese também foca no aumento da robustez da locomoção pelo uso de ações reativas e do controle da complacência das partes do corpo. Com relação a níveis hierárquicos de controle, a tese está focada em algoritmos de baixo e intermediário níveis que são imprescindíveis para a boa locomoção.

Na próxima seção será introduzido o conjunto de conceitos e definições que dão particularidade à formulação da estrutura de controle reativa proposta.

3.1 Conceitos e definições

O caráter inovador que torna a estrutura de controle reativa proposta uma estrutura particular é o fato de que todos os elementos que a compõe estão organizados sob três conceitos fundamentais: a *geração de movimento*, o *controle de movimento*, e a *integração não-conflitante*.

Por *geração de movimento* entende-se toda a ação de controle que, de algum modo, resulta em locomoção. Relacionadas à geração de movimento estão as tarefas de geração de referências cinemáticas que, juntamente com a ação de um controlador para seguimento de referências, produz a movimentação das pernas e como consequência a locomoção. Algoritmos que produzem forças de referências ao invés de posições de referências também podem ser relacionados à geração de movimento. No entanto, algoritmos que produzem como saída padrões de força que são diretamente aplicados nas articulações sofrem com o problema de *drift*¹, e não podem ser implementados sem a utilização de uma malha de controle cinemático, ou seja, referências cinemáticas devem estar sempre presentes.

¹Também conhecido como deriva, é efeito de deslocamento do valor de uma variável devido à presença de erros acumulativos no seu processo de geração ou de sensoriamento.

Um algoritmo relacionado à geração de movimento não necessariamente observa o estado do dorso, podendo produzir o deslocamento do dorso indiretamente pela movimentação das pernas em um processamento tipo malha aberta. Fazendo uma analogia com a natureza, este conceito está diretamente interligado à existência dos mecanismos que “independem” do cérebro – o controlador – para geração de movimentos, ou seja, a existência dos CPG's.

Por *controle de movimento* entende-se toda a ação de controle que, de algum modo, busca controlar o movimento das pernas com base no movimento desejado para o dorso. O movimento desejado para o dorso pode ser nulo, constante ou acelerado, e o seu controle pode ser realizado a partir de correções sobre as referências cinemáticas ou diretamente pela aplicação de torques nas juntas. Quando o movimento desejado para o dorso é nulo, a estratégia de controle de movimento torna-se uma estratégia de controle puramente de postura (orientação e posição do dorso com relação a um referencial de interesse), também denominada de controle de atitude.

A geração de movimento e o controle de movimento são dois grandes blocos que agrupam os principais componentes necessários para a realização da locomoção quadrúpede. Para um bom desempenho, é imperativo que haja a interação entre estes dois blocos e que, sobretudo, esta interação ocorra de maneira coerente sob a ótica de um objetivo em comum. O conceito de *integração não-conflitante* diz respeito a este consenso e constitui a base da formulação do sistema de controle reativo proposto. Ou seja, este conceito baseia-se no fato de que a saída de todos os blocos, cujas ações possuem efeito direto sobre o movimento do robô, não podem conflitar entre si e devem possuir um objetivo em comum.

Em um primeiro momento, o conceito de integração não-conflitante, bem como a ocorrência de conflito entre blocos, pode ser de difícil compreensão. Para elucidar o problema de conflito, considere o seguinte exemplo ilustrado na Figura 3.1:

Um robô quadrúpede caminha sobre um terreno aparentemente plano (Figura 3.1a). Este robô se desloca com um padrão de marcha periódico qualquer e possui um algoritmo de controle C_{pernas} responsável pelo seguimento das referências cinemáticas fornecidas por tal padrão periódico. Para que ocorra o seguimento de referências, o controlador C_{pernas} envia os torques exigidos para cada junta de acordo com o vetor ação de controle u_{pernas} . Paralelamente a este controlador o robô possui um controlador C_{dorso} que tenta manter a postura do dorso paralela a superfície do terreno, mantendo a estabilidade do

caminhar e agregando certo nível de robustez à locomoção. Esta última ação de controle, por sua vez, envia torques para as juntas de acordo com um vetor ação de controle u_{dorso} , ou seja, o torque aplicado nas juntas será dado por $u_{pernas} + u_{dorso}$.

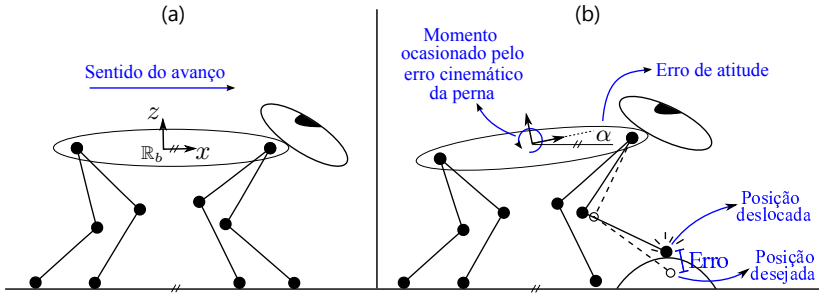


Figura 3.1: (a) - Em situação ideal, o seguimento de referências cinemáticas é perfeito e o dorso mantém seu movimento alinhado a superfície do terreno. (b) - A presença de uma irregularidade no terreno causa um erro no seguimento de referências cinemáticas que, pela ação do controlador C_{pernas} , transmite um momento de distúrbio ao dorso. Este momento desalinha a atitude do dorso em um ângulo α .

Se considerado o fato de que as referências cinemáticas são perfeitamente geradas a ponto de não causar oscilações do dorso durante o caminhar, a ação de controle u_{dorso} será nula e os torques aplicados nas juntas do robô serão dados apenas por u_{pernas} , não havendo chance de conflito entre as saídas de cada controlador. No entanto, o conflito ocorrerá sempre que este cenário idealizado sofrer alterações, como por exemplo, com o aparecimento de uma pequena ondulação na superfície do terreno, conforme ilustrado na Figura 3.1b.

A presença de uma ondulação causará um erro de seguimento para o controlador C_{pernas} . A ação de controle u_{pernas} , tentando retomar o seguimento de referência, gerará um força que alçará o dorso e o retirará do seu alinhamento desejado. Conseqüentemente, o controlador C_{dorso} entrará em ação gerando torques para realinhar o dorso com a superfície, ou seja, ele induzirá a retração da perna em contato com a ondulação. Por fim, a retração da perna perturbará o seguimento das referências cinemáticas e o controlador C_{pernas} tentará novamente retomar o seguimento, estendendo a perna novamente. Assim, cria-se um conflito entre controladores que impede a obtenção de um comportamento bem definido para as partes do robô. Comportamento este que estaria definido a priori com base na impedância escolhida para o

dorso ou para as pernas.

Antes de introduzir os detalhes da arquitetura de controle proposta será introduzido um sistema de coordenadas específico sob o qual são construídos todos os algoritmos propostos nesta tese. Este sistema de coordenadas é o *Sistema de Coordenadas Horizontal*.

Comentário 3.1 *É importante salientar que a estrutura de controle reativa não é uma arquitetura exclusiva para robôs quadrúpedes, mas sim, uma estrutura conceitual generalizada que pode ser aplicada em morfologias com qualquer número de pernas.*

3.1.1 Sistema de coordenadas horizontal

O sistema de coordenadas horizontal² (SCH), denotado por \mathbf{R}_h , é um sistema de coordenadas particular que possui relações específicas com o sistema de coordenadas fixo no robô, ou seja, com o sistema de coordenadas da base (SCB), denotado por \mathbf{R}_b . O sistema de coordenadas horizontal possui as seguintes características particulares:

- **C.1** - o plano xy do sistema de coordenadas horizontal é perpendicular ao eixo da força gravitacional. **Obs.:** Nesta tese, o plano xy do sistema de coordenadas horizontal recebe o nome de *plano horizontal*.
- **C.2** - o eixo x do sistema de coordenadas horizontal é paralelo à projeção do eixo longitudinal do sistema de coordenadas da base sobre o plano horizontal.

Além disso, um sistema de coordenadas horizontal pode ser de dois tipos:

- **Fixo** - quando o SCH é fixo em qualquer posição do sistema de coordenadas global, ou seja, em qualquer posição do espaço.
- **Móvel** - quando o SCH é fixo à origem do sistema de coordenadas da base, tornando-se um sistema de coordenadas flutuante.

Na Figura 3.2 são ilustrados os dois tipos de SCH (em verde) com relação ao sistema de coordenadas da base (em azul) e o sistema de coordenadas global (em preto).

Os sistemas de coordenadas horizontais fixo e móvel permitem extrair relações diferentes com respeito ao sistema de coordenadas da

²O sistema de coordenadas horizontal bem como o sistema de coordenadas da base, segue a convenção dada pela regra da mão direita.

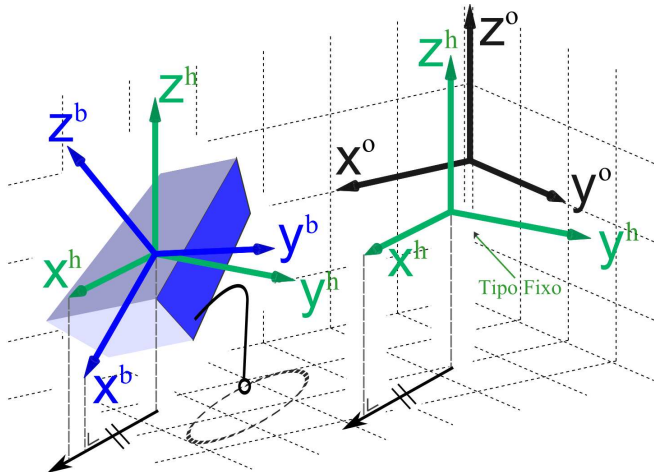


Figura 3.2: O SCH (em verde) possui o eixo Z^h paralelo ao sentido da força gravitacional e o eixo X^h paralelo a projeção horizontal do eixo X^b do SCB (em azul). O SCH pode ser móvel, quando anexado à origem do SCB, ou fixo, quando fixo em qualquer posição do sistema de coordenadas global (em preto).

base. Nesta tese, estas relações possuem funcionalidades distintas que serão apresentadas e discutidas no Capítulo 5.

Comentário 3.2 *A orientação de um sistema móvel com respeito a um sistema de coordenadas inercial é uma das medições mais importantes em um sistema móvel. Em geral, os sensores que fornecem este tipo de informação se baseiam na força da gravidade e no campo magnético da terra. Por exemplo, inclinômetros fornecem inclinações relativas com relação ao eixo da força gravitacional e unidades de medição inercial (IMUs), além da inclinação relativa, são capazes de fornecer a orientação de um corpo com relação ao campo magnético da terra eo seu posicionamento global. A orientação do SCB com relação ao SCH pode ser medida simplesmente com a utilização de inclinômetros. Ou, utilizando uma IMU e desprezando a informação relativa à orientação do SCB com relação ao campo magnético da terra. Isso é possível porque o SCH mantém as mesmas relações de paralelismo que o sistema de coordenadas global possui com o campo gravitacional da terra.*

3.2 Arquitetura de controle

A arquitetura do sistema de controle reativo proposto é composta por dois grandes blocos que organizam os algoritmos com respeito às tarefas de geração do movimento e de controle do movimento. A arquitetura do sistema de controle reativo está descrito pelo diagrama de blocos da Figura 3.3.

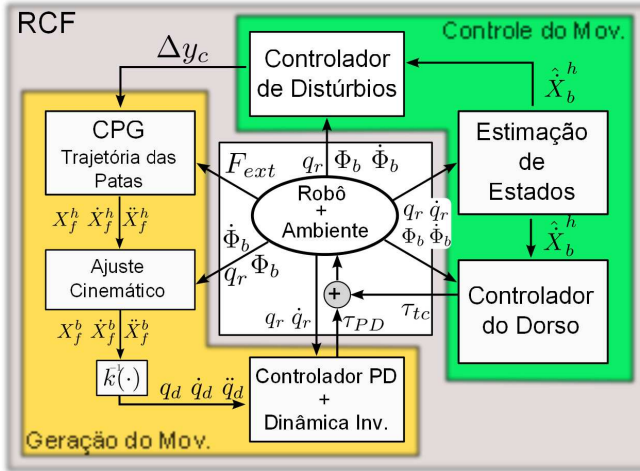


Figura 3.3: Diagrama de blocos do sistema de controle reativo proposto. Dentro da região amarela, todos os blocos pertencentes a geração de movimento. Na região verde, os blocos pertencentes ao controle de movimento.

A tarefa que envolve a geração de movimento é composta basicamente por três blocos, sendo eles:

- **CPG** (responsável pela geração das trajetórias de referências para as patas);
- **Ajuste Cinemático** (responsável pelo ajuste das referências com base no estado do corpo);
- **Controlador das Juntas** (responsável pelo seguimento das referências cinemáticas).

Por sua vez, a tarefa responsável pelo controle do movimento é formada pelos seguintes blocos:

- **Controlador do Dorso** (responsável pelo controle do movimento do dorso através da força exercida por cada pata);

- **Controlador de Distúrbios** (responsável pelo controle do movimento do dorso através dos pontos de apoio de cada pata);
- **Estimador de Estados** (responsável por estimar estados que não são sensorados).

É importante observar que todos os blocos recebem e processam uma saída com base em alguma informação pertinente sobre o estado do robô. Esse detalhe é importante pois remete à partilha de informação sobre o estado do corpo para todos os blocos, apresentando um fluxo de informação coerente com o conceito de integração não-conflitante.

Um sistema de controle robótico pode estar situado em um nível hierárquico baixo, intermediário ou alto. Níveis baixos compreendendo o sinal de comando para os atuadores e níveis altos compreendendo a tarefas cognitivas. O SCR é composto de ações de controle de níveis baixo e intermediário, recebendo comandos em um nível limiar intermediário e executando-os a partir de ações de controle de baixo nível. No SCR proposto, a conexão com um nível intermediário é obtido pela existência de parâmetros intuitivos no bloco de geração de referências (detalhes no Capítulo 4).

Todos os blocos do SCR serão descritos em detalhes ao longo da tese. Os blocos de geração de movimento serão detalhados no Capítulo 4 e os de controle de movimento no Capítulo 5. No entanto, uma descrição introdutória da funcionalidade de cada um dos seis blocos será apresentada na sequência.

3.2.1 CPG

Em robôs com pernas, a obtenção de referências cinemáticas para cada junta é uma tarefa necessária que pode ser realizada por meio de diversas abordagens. Estas abordagens estão distribuídas entre princípios de geração e de planejamento, os quais são escolhidos de acordo com a tarefa a ser executada pelo robô. Um ambiente bem estruturado, conhecido e estático permite a utilização de referências planejadas, ou seja, pré-processadas. Em ambientes não-estruturados, onde podem ocorrer variações imprevisíveis do terreno ou da posição de obstáculos, as referências cinemáticas devem sofrer adaptações, o que sugere a utilização de um método baseado no princípio de geração. Em um método baseado na geração, as referências cinemáticas são obtidas no tempo corrente e tendem a ser mais robustas por serem contínuas e modificadas a cada instante de tempo.

Comentário 3.3 *Alguns cientistas defendem a ideia de que pode-se*

agregar robustez em uma locomoção que é baseada no planejamento de trajetórias. A solução seria utilizar inúmeras trajetórias planejadas e efetuar a transição entre elas. No entanto, o inconveniente e o contraponto residem no fato de que se torna inviável armazenar e gerenciar a transição entre todas as trajetórias planejadas possíveis. Além do mais, a modulação de uma trajetória planejada descarateriza, de certo modo, o princípio de planejamento pois reprocessa uma informação a cada instante de tempo, fornecendo uma saída distinta da referência pré-planejada. Consequentemente, o que ocorre é uma geração de referências baseada em trajetórias planejadas e, por fim, novamente uma maior robustez é alcançada pela presença do princípio de geração.

No SCR (ver Figura 3.3), o bloco relacionado as referências cinemáticas é um dos focos de estudo da tese. Para preencher este bloco será utilizada uma estratégia com princípio de geração de referências, o qual é obtido utilizando uma abordagem baseada em CPG's.

Em suma, o bloco CPG tem a função de gerar trajetórias de referências para todas as patas do robô. Um dos diferenciais da abordagem de geração proposta é que a geração é feita em um espaço cartesiano.

O bloco CPG possui três vias de conexão dentro da arquitetura do SCR: recebe informações da interação do corpo com o ambiente; envia as referências geradas para o bloco de ajuste cinemático; e recebe referências de posicionamento do bloco de controle de distúrbios. É importante notar que esta última via citada é uma via de comunicação explícita entre o grande bloco de controle de movimento e o grande bloco de geração de movimento. Para obter uma integração não-conflitante esta via deve existir, implicitamente ou explicitamente.

Existem outras vias, porém implícitas, de comunicação entre os dois grandes blocos. Uma delas está relacionada com o bloco de ajuste cinemático e será descrita mais adiante.

Comentário 3.4 *Uma característica diversa do bloco CPG, devido a arquitetura do SCR, é que as trajetórias podem ser geradas em um espaço qualquer. Ou seja, em um espaço relativo. O verdadeiro sentido do espaço onde as trajetórias são geradas é determinado pelo bloco de ajuste cinemático, pois é este bloco que passa adiante a informação das referências geradas.*

Do ponto de vista prático, o espaço onde as trajetórias serão geradas já é definido no início do projeto do sistema de controle. No caso do bloco CPG as trajetórias desejadas são geradas no sistema de coordenadas horizontal e são representadas pelos vetores X_f^h , \dot{X}_f^h e \ddot{X}_f^h , onde X_f^h é o vetor que contém as posições desejadas para cada pata.

3.2.2 Ajuste Cinemático

O bloco de ajuste cinemático recebe as trajetórias desejadas do bloco CPG e aplica uma transformação matemática que as leva do SCH para o SCB. As trajetórias desejadas descritas no SCB são representadas por pelos vetores X_f^b , \dot{X}_f^b e \ddot{X}_f^b .

É importante observar que o bloco de ajuste cinemático realiza as transformações com base em variáveis de estado do dorso, ou seja, no SCR as referências cinemáticas são geradas em função da dinâmica do corpo. Se for considerado o grande bloco de geração de movimento como uma caixa preta, pode-se perceber que os movimentos gerados para cada membro estarão fortemente interligados com a dinâmica robô-ambiente através do dorso. Esta conexão é uma espécie de realimentação fundamental para a locomoção quadrúpede, pois retira o movimento "cego" e independente das pernas – sem percepção da interação robô-ambiente – e agrega um movimento mais coerente com a dinâmica do dorso. Esta realimentação pode ser vista como a ligação entre o corpo e o CPG ilustrada na Figura 2.17 (Capítulo 2).

O ajuste cinemático como reflexo vestibular

O equilíbrio corporal da maioria dos mamíferos decorre da interação de três sistemas: somatossensorial, visual, e vestibular. O sistema vestibular é composto por um grupo de órgãos localizados no ouvido interno. No seres humanos é conhecido como *labirinto*.

Ao longo dos anos, a natureza desenvolveu dois reflexos vestibulomotores altamente sofisticados para a manutenção do equilíbrio: o *reflexo vestibulo-ocular* (RVO), que distribui estímulos para o tronco cerebral objetivando estabilizar a imagem na retina durante o movimento, e o *reflexo vestibulo-espinhal* (RVE), que distribui informações para o controle da musculatura dos membros inferiores necessários para a manutenção da postura.

Em termos sensoriais, o sistema vestibular provê informações relativas à orientação espacial (como a força da gravidade, rotações e acelerações) e possui as seguintes funcionalidades:

- Servir como referência para os sistemas somatossensorial e visual;
- Induzir contrações musculares que produzem um movimento geotrópico negativo ou forças que compensam as mudanças constantes da direção da força da gravidade;
- Produzir contrações musculares transitórias para a manutenção

do equilíbrio e da estabilidade ocular durante o movimento. A maioria dos movimentos naturais da cabeça contém acelerações angulares e lineares, e o reflexo vestibular age em combinação com ambas para a manutenção do equilíbrio;

- Ajudar na manutenção do tônus muscular.

O sistema vestibular está continuamente ativo mesmo quando o corpo está em repouso, situação em que ele percebe apenas a aceleração linear resultante da ação da gravidade. Sinais proveniente de músculos, articulações, pele e olhos são constantemente integrados com o fluxo de informação vestibular [3].

O sistema vestibular desempenha um papel fundamental pois contribui para uma vasta gama de funções, desde reflexos aos mais altos níveis de percepção.

Como pode-se perceber, para a maioria dos mamíferos, seria impossível obter balanço ou equilíbrio sem a existência do sistema vestibular. Isto traz à tona uma questão: *Visto a importância do sistema vestibular para a locomoção, onde estaria e como poderia ser reproduzido este sistema em robôs quadrúpedes?* De certo modo, esta questão pode ser parcialmente respondida sem muitas dificuldades. Nos robôs quadrúpedes, os mesmos sentidos que são percebidos pelos órgãos do labirinto são sensorizados por unidades de medição inercial, as IMUs. No entanto, resta saber como utilizar estas informações para atuar de forma similar ao sistema vestibular e obter respostas rápidas que contribuam para a manutenção do movimento.

No sistema de controle reativo proposto **a ação do ajuste cinemático constitui uma espécie de reflexo vestibular**. A ação do ajuste cinemático compreende a manutenção dos pontos de apoio de cada pata independentemente do movimento do corpo. Em outras palavras, o ajuste cinemático compensa o movimento do corpo automaticamente tornando a posição das patas no espaço insensíveis aos movimentos de rolagem e arfagem do dorso. Com base neste princípio é que se faz a proposta da geração das referências no sistema de coordenadas horizontal e a utilização de um bloco de ajuste cinemático.

Além disso, visto de outra perspectiva, a combinação da geração de referências no SCH e o ajuste cinemático permitem desacoplar a relação entre a orientação do dorso e a posição das patas. Este é o elemento fundamental do sistema de controle proposto que permite cumprir o requisito da integração não-conflitante entre a geração de movimento e o controle de movimento. Devido à ação do ajuste cinemático, as ações de controle de movimento do dorso não interferem

no seguimento das referências cinemáticas em cada junta. Esta interação entre geração e controle de movimento via ajuste cinemático será discutida em detalhes no Capítulo 5.

A utilização do ajuste cinemático visa melhorar o desempenho e agregar robustez à locomoção quadrúpede pelos seguintes fatores:

- Evita a geração de trajetórias que penetrariam no solo (evita forças de reação do solo elevadas);
- Evita a perda de contato ou contatos fracos da pata com o solo (reduz o escorregamento);
- Reduz os distúrbios entre os controladores de posição das juntas e os controladores relacionados a postura do dorso (permite integração não-conflitante).

3.2.3 Controlador das juntas

As malhas de controle possuem papel fundamental na estabilidade do movimento. Não somente executando tarefas de seguimento de referências cinemáticas mas também agregando robustez ao caminhar. Uma vez que as trajetórias geradas podem não se adequarem ao solo, o nível de robustez de locomoção também dependerá da estratégia implementada nestas rotinas. Por exemplo, um controle de impedância, um controle baseado em passividade, um controle de força direto ou até simples ações do tipo PID que não levam em consideração o modelo dinâmico do robô.

Em terrenos irregulares ou desconhecidos, a falta de uma malha de controle que trabalhe com respostas complacentes exige uma geração de trajetórias com alto grau de adaptabilidade. Caso contrário, a utilização do robô estará limitada a terrenos planos e regulares. Um estudo recente que relaciona a robustez do caminhar e a tarefa de controle implementada pode ser encontrado em [49].

A solução para uma locomoção robusta está associada à união de estratégias de geração de referências cinemáticas adaptativa e de controladores de posição que permitam comportamentos complacentes. O sistema de controle reativo proposto nesta tese admite o uso deste tipo de abordagem e utiliza como controlador das juntas uma estratégia baseada na dinâmica inversa do modelo para a redução dos ganhos e maior complacência das juntas.

O controlador das juntas será descrito em detalhes no próximo capítulo.

Comentário 3.5 *A existência do pequeno bloco que computa a cinemática inversa, simbolizado por $K^{-1}(\cdot)$ na Figura 3.3, depende da estratégia utilizada para o controlador das juntas. A estratégia de controle proposta nesta tese utiliza um bloco gerador que fornece referências no espaço da tarefa (um espaço cartesiano). Se para o bloco do controlador das juntas for implementada uma estratégia de controle cinemático computado no espaço da tarefa o pequeno bloco de cinemática inversa não é necessário.*

3.2.4 Controlador do dorso

O controlador do dorso é responsável pelo controle do movimento durante a fase de suporte de cada perna. Este bloco recebe a realimentação da posição e velocidades de todas as juntas, das posições e velocidade angulares do dorso, e das velocidades lineares do dorso. Como referência, este bloco recebe as posições angulares desejadas para o dorso – a atitude desejada – e as velocidades angulares e lineares desejadas para o dorso. Todas as referências são fornecidas e processadas com base no sistema de coordenadas horizontal.

O controle utilizado neste bloco é similar à estratégia por controle de modelos virtuais apresentada no Capítulo 2. Momentos e forças que corrigem a postura e as velocidades do dorso são calculados com base nos erros de movimentação. Estas forças e momentos são então transformadas em torques nas juntas – a saída do bloco – levando em consideração a restrição de movimento das patas durante a fase de suporte. Assim, forças de reação do solo são geradas para o controle da postura e do movimento do dorso.

Os detalhes sobre o algoritmo do controlador do dorso são discutidos em no Capítulo 5.

3.2.5 Controlador de distúrbios

O controlado de distúrbios é um bloco que completa o controle de movimento. Neste trabalho de tese, chama-se a atenção para a perspectiva de que o movimento não é controlado apenas por ações/decisões tomadas durante a fase de suporte. O cálculo dos pontos de apoio de cada pata tem papel tão fundamental quando as forças que as pernas fazem para manter a postura do tronco (função do controlador do dorso).

Existem inúmeros trabalhos que tratam da rejeição de distúrbios na área de robôs bípedes. Por outro lado, com a revisão bibliográfica realizada, verificou-se que a publicação de trabalhos relacionados à re-

jeição de distúrbios em robôs quadrúpedes ainda é escassa. Por isso, neste bloco concentram-se parte das principais contribuições desta tese.

Para o controlador de distúrbios é proposta uma estratégia baseada em *Pontos de Captura* (do inglês, *capture points*). O trabalho desta tese estende a aplicação de pontos de captura, até então apenas aplicados à robôs bípedes, para robôs quadrúpedes.

As entradas para o controlador de distúrbios são as velocidades angulares e lineares desejadas e estimadas do dorso. Utilizando os erros de velocidade do dorso e um modelo dinâmico simplificado do robô, deslocamentos relativos para cada pata com relação ao SCH são calculados (deslocamentos Δ_x e Δ_y mostrados na Figura 3.3).

O controlador de distúrbios possui uma ação de controle indireta que têm o seu efeito através da comunicação com o bloco de geração de referências cinemáticas. Ou seja, através dos deslocamentos relativos conduz-se as patas aos pontos de apoio que permitirão ao dorso se aproximar dos requisitos de movimento desejados ou recuperar-se de um distúrbio externo.

Comentário 3.6 *O controlador do dorso e o controlador de distúrbio são tão complementares no controle de movimento quanto a fase de suporte e a fase de balanço se completam para o ciclo de um passo.*

3.2.6 Estimador de Estados

Um robô nem sempre é equipado com um número de sensores suficiente para a estimação de todos os estados. Quando isto é possível, a confiabilidade do sinal ainda dependerá muito da qualidade de cada sensor. Informações provenientes de sensores baseados na aceleração costumam sofrer com o problema de *drift*, que ocorre devido à integração de ruído e *offsets* no sinal. Um algoritmo de estimação de estados faz frente a estes tipos de problema.

O bom desempenho de um controlador sobre um sistema de base flutuante depende diretamente da estimação dos estados relacionados à base flutuante. Neste bloco de estimação considera-se haver, por exemplo, estratégias que estimam os estados com base no modelo cinemático/dinâmico do robô ou em filtros de Kalman que realizam a fusão de sensores [9].

No sistema de controle reativo o bloco de estimação dos estados é responsável por obter as velocidades lineares do dorso no SCH. As velocidades são estimadas por meio do modelo cinemático do robô e da leitura da velocidade das juntas das pernas em fase de suporte. O algoritmo de estimação é detalhado no Capítulo 5.

3.3 Síntese do Capítulo

Neste capítulo introduziu-se o sistema de controle reativo, cuja formulação está fundamentada nos conceitos de *Geração de Movimento*, *Controle de Movimento* e *Integração Não-Conflitante*.

Apresentou-se uma classificação para as abordagens encontradas na literatura com base em atividades relacionadas ao controle do dorso e ao controle do movimento das patas. Esta classificação organiza as abordagens existentes em quatro grupos e possui o objetivo de melhor situar a abordagem proposta dentro do estado da arte. O sistema de controle reativo proposto é então enquadrado como uma abordagem Tipo 4.

Introduziu-se um sistema de coordenadas particular denominado *Sistema de Coordenadas Horizontal*, que pode ser fixo ou flutuante, no qual estão baseadas todas as atividades da geração de movimento e do controle de movimento.

Por fim, foi apresentada a arquitetura do sistema de controle reativo e uma breve explanação sobre o fluxo de informação e a interação e funcionalidade de cada bloco foi realizada.

Todos os blocos serão detalhados ao longo dos capítulos 4 e 5.

Capítulo 4

Geração do Movimento

Neste capítulo concentra-se a maior parte das contribuições da tese. O capítulo refere-se ao paradigma da geração de referências via CPGs que é levado do espaço de juntas para o espaço da tarefa com o objetivo de contornar alguns dos inconvenientes encontrados na abordagem tradicional. Além disso, o capítulo apresenta os detalhes do bloco de ajuste cinemático a partir do conceito do sistema de coordenadas horizontal.

Na primeira seção discute-se sobre os desafios da abordagem via CPG e expõe-se um exemplo da problemática contida no modo de geração tradicional. A partir de então o conceito do CPG proposto é introduzido e a seção segue com uma sequência de passos que constituem toda a formulação do gerador de padrões do SCR.

Após definido o gerador de referências cinemáticas, o bloco de ajuste cinemático e o bloco do controlador das juntas são descritos em detalhes.

4.1 Geração de Padrões via CPGs com Base no Espaço da Tarefa

Conforme apresentado no Capítulo 2, a abordagem de geração de referências cinemáticas via CPGs é tradicionalmente realizada no espaço de juntas. Uma abordagem baseada em CPGs formulada no espaço de juntas apresenta-se mais fiel e próxima ao mecanismo biológico presente nos animais. Porém, apresenta inconvenientes e algumas dificuldades do ponto de vista da implementação prática quando os requi-

sitos de modulação do caminhar estão localizados no espaço da tarefa do robô.

O problema é constituído basicamente pela existência da relação cinemática entre os espaços e pela necessidade de se reproduzir um movimento em um espaço cartesiano a partir do somatório de vários componentes oscilatórios no espaço de juntas. A relação entre os espaços não é direta (proporcional ou linear), nem tampouco intuitiva.

A modulação do caminhar se torna complexa pela utilização de CPGs quando são necessárias as seguintes tarefas:

- Modulação específica de um parâmetro do caminhar, como por exemplo, a altura do passo ou o comprimento do passo;
- Posicionamento da pata em local específico¹. Uma tarefa necessária para locomoção em terrenos irregulares, onde existem buracos e protuberâncias;
- Ajuste da postura durante o caminhar, responsável pela manutenção da estabilidade da locomoção;
- Realização de locomoções suaves, ou seja, de baixa movimentação do dorso. Uma locomoção suave implica em um transporte mais confortável e uma redução dos esforços sofridos pela estrutura mecânica durante os impactos da pata com o solo.

Para contornar estes inconvenientes, nesta tese propõe-se o projeto de um CPG baseado no espaço de trabalho do robô para obter uma modulação do caminhar mais simples. Uma modulação que permita o ajuste independente dos parâmetros da locomoção e o posicionamento específico da pata durante a locomoção. Com a inclusão destas duas capacidades na modulação, proporciona-se uma maior adaptabilidade para o caminhar em terrenos irregulares e um novo paradigma para a formulação de modulações e de controladores das camadas de mais alto nível.

Embora a utilização de CPG seja uma solução interessante, ainda não há uma metodologia de projeto bem estabelecida. Esta lacuna induz os pesquisadores a explorarem diversas abordagens, desde projetos baseado na teoria de sistemas dinâmicos a algoritmos de aprendizagem e otimização [18].

A abordagem proposta nesta tese, denominada TCPG², é baseada em um sistema de osciladores acoplados e estruturados de tal forma que

¹Do inglês *foot placement task*.

²Task Space-based Central Pattern Generator

os seus parâmetros são os próprios parâmetros do caminhar, i.e., a velocidade de avanço, a largura do passo, a altura do passo, a direção e o tipo de marcha. Com isso, obtém-se uma relação de modulação direta, uma vez que a característica modulada do espaço de trabalho (por exemplo, a altura do passo) é um parâmetro do CPG, o que simplifica as relações paramétricas entre o espaço de geração e o espaço de locomoção.

4.1.1 Sobre os desafios da geração via CPGs

Como exposto na Seção 2.4.4, apesar da existência de inúmeros métodos para a geração da locomoção, os métodos baseados no conceito de CPGs vêm sendo cada vez mais explorados devido ao nível de robustez que a abordagem agrega à locomoção. Entretanto, os métodos inspirados em CPGs ainda demandam estudos por apresentarem algumas deficiências.

Segundo a revisão realizada em [111], existem alguns problemas nos métodos inspirados em CPGs que necessitam ser solucionados. Relacionado com os objetivos da tese, enfatiza-se aqui um dos problemas listados em [111], que consiste no problema da geração de um sinal específico de referência:

- A saída de um CPG é normalmente utilizada para o controle do ângulo de uma junta ou do torque aplicado à ela. Para muitas aplicações, tais como robôs do tipo cobra, a locomoção pode ser facilmente atingida através de sinais senoidais. No entanto, para o caso de robôs que caminham os sinais senoidais ou quase senoidais não são a melhor referência para obtenção de um caminhar suave. Por isso, a geração de um sinal específico é necessário para obtenção de um caminhar próximo ao natural.

Além disso, no estudo realizado em [111] é chamada a atenção para as seguintes linhas de pesquisa:

1. **Modulação paramétrica.** Um problema dos métodos por CPG é como produzir sinais especiais de controle através da modulação paramétrica. Como um CPG é um sistema não linear acoplado, é difícil de encontrar um mapeamento simples entre os parâmetros e as saídas do CPG;
2. **Transição entre padrões de marcha.** Os animais conseguem facilmente adaptar os seus padrões de marcha de acordo com o ambiente. No entanto, isso constitui um processo de complexo

modelamento pois envolve a coordenação entre as ordens do cérebro, os CPGs e os reflexos. Logo, para robôs com pernas, tornar a transição entre padrões de marcha contínua e estável constitui uma tarefa complexa. O método tradicional para alternar entre padrões é comutar entre modos pré-definidos. Porém, transições abruptas podem causar instabilidade ou resultar em uma locomoção não suave. Logo, é preciso desenvolver métodos que possibilitem transições rápidas e suaves;

3. **Adaptabilidade ao ambiente.** Os CPGs são sistemas não-lineares capazes de produzir sinais de controle periódicos acoplados sem a presença de realimentação. No entanto, esta é apenas uma das abordagens para a locomoção inspirada na natureza. Para obter adaptação ao ambiente, é necessário utilizar sinais de realimentação que considerem as reações do ambiente sobre o corpo do robô. Logo, é preciso encontrar formas de utilizar realimentações que portem a informação da dinâmica do corpo e assim aumentar a adaptabilidade do caminhar.

A geração de sinais específicos de referência e as três linhas de pesquisa listadas anteriormente constituem os problemas tratados nesta tese. Entretanto, o foco do trabalho está na geração de sinais específicos, a modulação paramétrica e adaptabilidade ao ambiente.

Um exemplo é apresentado a seguir para uma melhor visualização dos problemas da modulação paramétrica e da geração de sinais específicos de referência.

Exemplo da problemática

O objetivo deste exemplo é ilustrar a forma como uma pata se desloca quando as referências são geradas por meio de CPGs e como a trajetória da pata é alterada com a variação dos parâmetros do CPG.

Para o exemplo considera-se somente o movimento de uma das patas de um robô quadrúpede, cuja perna possui dois graus de liberdade. A referência para as juntas é fornecida com base na estrutura de CPG proposta em [86], já descrita na Seção 2.4.

Considera-se a estrutura de CPG, acima citada, descrita do seguinte modo:

$$\dot{\zeta} = K_{\zeta}(\mu - r^2) - w\eta \quad (4.1)$$

$$\dot{\eta} = K_{\eta}(\mu - r^2) + w\zeta \quad (4.2)$$

$$w = \frac{w_{suporte}}{e^{-b\eta} + 1} + \frac{w_{balanço}}{e^{b\eta} + 1} \quad (4.3)$$

em que $r = \sqrt{\zeta^2 + \eta^2}$ é o raio do ciclo limite gerado pelo CPG, μ determina a amplitude das oscilações das variáveis de saída ζ e η (em radianos). Os parâmetros K_ζ e K_η estão relacionados à convergência das variáveis para o ciclo limite. A frequência angular é denotada por w , $w_{suporte}$ é a frequência angular associada à fase de suporte, $w_{balanço}$ é a frequência angular associada à fase de balanço e b é o parâmetro que regula a transição de w entre as frequências $w_{suporte}$ e $w_{balanço}$. Como neste exemplo trata-se apenas da geração de referência para uma perna, desconsidera-se o termo de acoplamento com os outros osciladores.

A posição de referência para cada junta do robô é obtida através das variáveis de saída do CPG, ζ e η , e das seguintes funções arbitrárias:

$$\theta_{1_d} = \bar{\theta}_1 + \zeta \quad (4.4)$$

$$\theta_{2_d} = \bar{\theta}_2 + K_\mu \eta \quad (4.5)$$

onde θ_{1_d} e θ_{2_d} são os ângulos desejados para as juntas do quadril e do joelho, respectivamente. Os parâmetros $\bar{\theta}_1$ e $\bar{\theta}_2$ possibilitam ajustar a angulação média de cada junta e o parâmetro K_μ ajusta a amplitude de oscilação da junta do joelho.

Neste exemplo, o valor dos parâmetros K_ζ , K_η , b , w , $w_{suporte}$ e $w_{balanço}$ são fixos e estão descritos na Tabela 4.1. Os valores utilizados foram extraídos de [86].

Tabela 4.1: Parâmetros fixos do exemplo.

K_ζ	K_η	b	$w_{suporte}$	$w_{balanço}$
5	50	100	3 rad/s	3 rad/s

A trajetória executada pela pata do robô a partir das referências fornecidas pelas equações (4.4) e (4.5) é ilustrada na Figura 4.1(a).

Na Figura 4.1(b) é ilustrada uma trajetória de pata típica de animais quadrúpedes. Comparando a trajetória obtida via CPG e a trajetória típica de quadrúpedes, observa-se que a trajetória obtida via CPG não se aproxima da natural em diversos aspectos:

- Ao contrário do esperado, a pata toca o solo em uma aproximação paralela e não ortogonal. Quando a pata toca o solo em um movimento paralelo, ocorrem problemas de derrapagem ou deslizamento da pata;
- A região inferior da trajetória, susceptível ao impacto, é convexa (conforme mostrado na Figura 4.1(a)) e sugere um ponto tangente

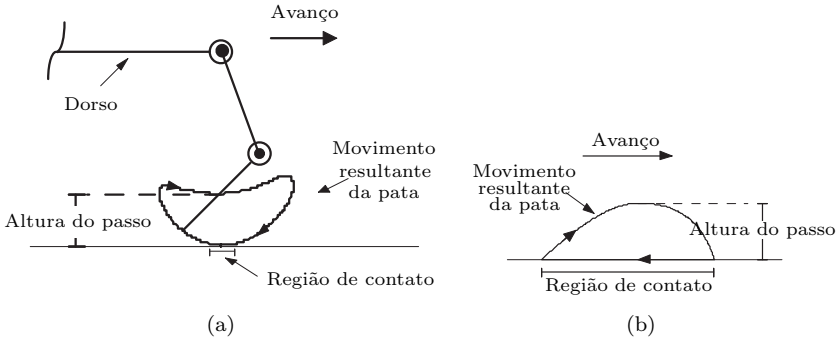


Figura 4.1: Trajetória da pata: (a) obtida com utilização do CPG do exemplo e (b) típica de quadrúpedes.

de contato com o solo. Portanto, com a movimentação ascendente e descendente do quadril durante a locomoção, não é possível precisar em que ponto da trajetória a pata tocará o solo;

- A fase de suporte não induz o movimento paralelo entre o dorso e o solo;
- Devido à forma da região superior da trajetória (Figura 4.1(a)), onde a pata alcança alturas similares em diferentes posições, a altura do passo não está claramente caracterizada;
- Devido à região inferior da trajetória ser convexa e sugerir um ponto de contato com o solo, o comprimento do passo não é claramente caracterizado.

Estas características das trajetórias obtidas via CPG ilustram o problema da geração de sinais específicos e sugerem o estudo para a adequação dos sinais de referência fornecidos por CPGs.

O segundo problema a ser ilustrado neste exemplo é o problema da modulação paramétrica.

Quatro parâmetros modulam a trajetória ilustrada na Figura 4.1(a), sendo eles: μ , K_μ , $\bar{\theta}_1$ e $\bar{\theta}_2$. O objetivo é observar como a trajetória da pata é alterada com a variação de cada parâmetro e concluir sobre a utilização dos parâmetros para ajustar a altura do passo, o comprimento do passo e o ponto de contato com o solo. Para isso, o comprimento do passo será considerado a largura da trajetória com relação ao eixo longitudinal (paralelo ao dorso) e a altura do passo

será considerada a altura da trajetória com relação ao eixo vertical (ortogonal ao dorso). O ponto de contato com o solo será considerado o ponto mais inferior da trajetória, ou seja, o ponto tangente a uma linha paralela ao eixo longitudinal.

A partir de então, cada um dos quatro parâmetros é variado independentemente conforme descrito na Tabela 4.2, onde o parâmetro variado destaca-se em negrito. Definindo arbitrariamente comprimentos para a coxa e a perna (canela) do robô da Figura 4.1(a) iguais à 0,3 m, as trajetórias obtidas para a pata a partir das variações paramétricas são apresentadas na Figura 4.2.

Pela Figura 4.2 é possível observar que: a variação de μ afeta todas as características analisadas, ou seja, o comprimento e a altura do passo e o ponto de contato com o solo; a variação do parâmetro $\bar{\theta}_1$ afeta basicamente a altura e comprimento do passo; o parâmetro $\bar{\theta}_2$ afeta todas as características, com maior influência sobre a posição do ponto de contato; e o parâmetro K_μ afeta basicamente a altura do passo a posição do ponto de contato com o solo.

Tabela 4.2: Tabela referente ao exemplo da Figura 4.2.

Figura	Curva	μ	$\bar{\theta}_1$	$\bar{\theta}_2$	K_μ
4.2(a)	A	0.2	-2.35	1.57	0.4
	B	0.1			
	C	0.3			
4.2(b)	A		-2.35	1.57	0.4
	B	0.2	-2.25		
	C		-2.45		
4.2(c)	A		-2.35	1.57	0.4
	B	0.2		1.47	
	C			1.67	
4.2(d)	A		-2.35	1.57	0.4
	B	0.2			0.2
	C				0.6

Com estas verificações conclui-se que cada característica é afetada por mais de um parâmetro, ou seja, a modulação paramétrica não é independente. Isto exige um mapeamento completo sobre as combinações paramétricas e, a partir de então, a criação de uma função inversa de modulação para que seja possível modular cada característica de forma independente. Esta situação compõe o problema da modu-

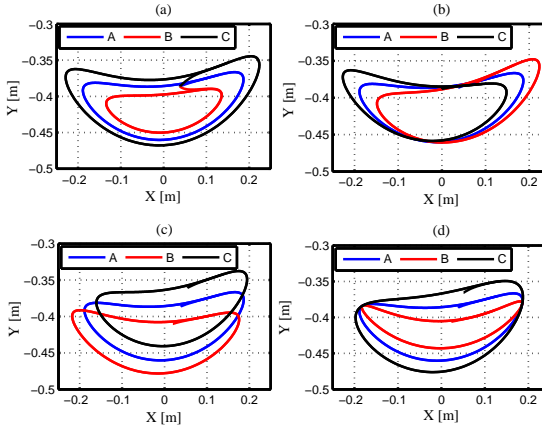


Figura 4.2: Variação da trajetória da pata com a variação paramétrica conforme a Tabela 4.2.

lação paramétrica.

Para contornar estes problemas propõe-se a geração de referência através do método por CPG, porém, com base em uma estrutura oscilatória localizada no espaço de tarefa. A ideia é obter a geração de sinais que sejam mais representativos da locomoção por pernas e prover uma modulação paramétrica simples, independente e que não envolva o problema de mapeamento.

Recentemente verificou-se que outros pesquisadores também vêm explorando esta abordagem com o intuito de solucionar os problemas acima citados. Em [58], é proposto um CPG inspirado na geração de trajetórias no espaço de trabalho, e as vantagens pressupostas pela abordagem são verificadas. Os resultados foram obtidos experimentalmente através do robô AIBO, sendo as seguintes abordagens comparadas: a geração através de CPG no espaço de juntas (tradicional); e a geração através de um CPG inspirado na geração de trajetória no espaço de trabalho. Citam-se aqui algumas das conclusões desse trabalho com relação as vantagens apresentadas pela nova abordagem:

- Permite um caminhar em subidas e descidas mais estável e suave;
- As oscilações do dorso são muito menores em função da trajetória de referência ser mais adequada para o caminhar;
- Permite a locomoção em superfícies com maior nível de inclinação;

- Devido a trajetória de referência do espaço de trabalho ser mais próxima da desempenhada pelos animais (formato semi-elíptico), os problemas de derrapagem são eliminados.

Esses resultados práticos incentivam a continuação de estudos sobre a abordagem baseada em um espaço Cartesiano.

O procedimento tomado em [58] concentrou-se na geração de um sinal de referência mais adequado para o caminhar, o que resultou em uma locomoção mais robusta. No entanto, para a obtenção da trajetória de referência no espaço de trabalho é necessário realizar o procedimento de mapeamento, ou seja, o efeito de cada parâmetro do CPG sobre a saída deve ser analisado. Além disso, o modelo de CPG utilizado possui muitos parâmetros de ajuste e os parâmetros são fortemente acoplados entre si.

Em [57] é apresentada uma proposta de CPG baseado em uma trajetória Cartesiana. Uma trajetória parabólica desejada para as patas é definida no espaço Cartesiano e um algoritmo de cinemática inversa é utilizado para obtenção da trajetória desejada para cada junta de um robô AIBO. Como CPG, os autores utilizam osciladores de fase modificado do modelo de Kuramoto (descrito na Seção 2.4), sendo um para cada junta. Uma FFT é realizada sobre a trajetória desejada de cada junta e a frequência harmônica obtida é utilizada como a frequência do oscilador da respectiva junta. Nesta abordagem o CPG fornece um movimento que, apesar de ser uma aproximação do movimento parabólico desejado, é mais representativo do caminhar. No entanto, qualquer modificação realizada sobre a trajetória parabólica de referência, com o intuito de modular o caminhar, envolve um remapeamento dos parâmetros do CPG com base em uma nova FFT.

4.1.2 Sobre o conceito do CPG Proposto

Se a tarefa consiste em modificar um único parâmetro do caminhar, por exemplo, a altura do passo, e o CPG é implementado no espaço de juntas, torna-se difícil encontrar a forma de alterar tal parâmetro sem que haja consequência nos demais. Mais precisamente, a dificuldade consiste em encontrar uma função ou mapeamento que module um parâmetro do CPG, o qual está em uma estrutura no espaço de juntas, de modo a alterar de forma independente outro parâmetro que está no espaço de trabalho. Como a modulação dos parâmetros do CPG está atrelada à configuração cinemática do robô, a complexidade da modulação aumenta com a quantidade de graus de liberdade de cada perna.

Na concepção do CPG proposto, a trajetória gerada para cada junta do robô deve ser o resultado de movimento desejado específico no espaço de tarefa do robô. Como um conceito ideal, sugere que os parâmetros do CPG a serem modulados tenham significado físico, como por exemplo: posição, velocidade, comprimento, orientação etc. Esta abordagem segue a constatação de que os movimentos realizados por humanos é planejado e executado no próprio espaço em que o deslocamento ocorre.

Espera-se que sendo possível modular os objetivos em um espaço Cartesiano (espaço de deslocamento) de forma direta e independente, possam ser geradas inúmeras possibilidades para a aplicação de estratégias de alto nível hierárquico, uma vez que o sistema de controle de alto nível precisará agir sobre poucos parâmetros para alterar a locomoção.

Para isto propõe-se nesta tese uma estrutura de geração denominada TCPG cujos parâmetros são os próprios parâmetros da locomoção: velocidade e orientação do caminhar, altura e comprimento do passo e o padrão de marcha. Tornando possível alterar as características do caminhar de forma direta e independente, bem como prover um caminhar mais próximo do natural.

Nas próximas seções são detalhados todos os procedimentos para formulação da estrutura de geração proposta.

4.1.3 Metodologia de Projeto de CPGs

De acordo com [18] e [46], a existência de uma metodologia de projeto para CPGs ainda constitui uma lacuna na literatura. No entanto, o processo de criação de um modelo de CPG pode ser auxiliado por algumas definições, que estruturam e caracterizam o modelo.

Para a construção de um modelo de CPG, é importante que os seguintes tópicos sejam observados:

- 1 **A arquitetura geral do CPG.** Inclui o tipo e o número de osciladores. Em um robô, inclui-se também a escolha entre um controle de posição (i.e, as saídas do CPG são posições de referência para uma malha interna de controle das juntas) ou controle de torque (i.e., as saídas do CPG controlam diretamente as juntas do robô);
- 2 **O tipo e topologia do acoplamento.** Determina as condições de sincronismo entre os osciladores e o padrão de marcha resultante, ou seja, a relação de defasagem entre cada oscilador;
- 3 **A forma de onda gerada.** Determina as trajetórias que serão

realizadas durante cada ciclo. As formas de onda, apesar de dependentes da forma do ciclo limite produzido pelos osciladores, podem ser transformadas pela adição de filtros;

- 4 **O efeito dos sinais de entrada.** Como os parâmetros de ajuste podem modular o ciclo limite de modo a ajustar frequências, amplitudes, defasagens entre pernas (para transição entre padrões de marcha) ou a própria forma do sinal;
- 5 **O efeito de sinais realimentados.** Como um sinal realimentado do corpo pode ser introduzido e afetar a atividade do CPG para, por exemplo, acelerar ou desacelerar o movimento de uma perna dependendo das condições do meio.

Todos estes tópicos foram utilizados para a estruturação do CPG proposto, e voltarão a ser mencionados no decorrer da descrição.

4.1.4 Oscilador Elíptico

Um dos primeiros passos para a formulação do TCPG consiste na definição da forma de onda a ser gerada. O objetivo do projeto da forma de onda é a geração de um sinal referência que, ao ser processado pelo sistema de controle e atuação, faça com que as patas do robô executem um movimento o mais próximo possível do desempenhado pelos quadrúpedes. Por isso, uma estratégia comumente utilizada nesta etapa é a observação e cópia da trajetória da pata dos animais. Ou seja, estes animais são filmados a partir de técnicas especiais, enquanto caminham sobre uma esteira, e o resultado da filmagem é analisado. A partir desta análise, a trajetória de cada pata é extraída com o propósito de implementá-las o mais similar possível nos robôs com pernas. Exemplos desta abordagem podem ser vistos em [5] sobre o estudo da barata, em [108] sobre o estudo do ouriço e em [55] sobre o estudo do grilo.

Outras estratégias, frequentemente adotadas, consideram que a trajetória das patas do robô, no espaço Cartesiano, são funções matemáticas baseadas em funções seno e cosseno [27, 70, 106] ou combinações destas [52]. Diferentes formulações matemáticas, tais como arcos de círculo [78], ovais [53], elipses [27] e funções cicloidais [30] também têm sido adotadas.

A partir do conhecimento das abordagens acima citadas, optou-se pela geração de uma trajetória elíptica para as patas. Tal escolha foi motivada principalmente pelo fato da elipse ser matematicamente ajustável no espaço Cartesiano, por constituir uma curva fechada no

espaço e por permitir uma regulagem de amplitude em dois eixos coordenados.

Por constituir uma curva fechada no espaço Cartesiano, a elipse se torna adequada para uma implementação como sistema oscilatório. Por permitir um ajuste de amplitude em dois eixos coordenados, a amplitude de cada eixo da elipse pode ser associada a um parâmetro do caminhar, ou seja, à altura do passo e ao comprimento do passo. Estes aspectos abrem várias possibilidades de ajuste para o caminhar.

Após a escolha da forma elíptica como padrão de trajetória, realizou-se uma pesquisa bibliográfica com o objetivo de encontrar um oscilador elíptico já estabelecido na literatura. No entanto, não foi encontrada nenhuma proposta de oscilador que apresentasse uma curva elíptica no plano de fase.

Com isso, o trabalho da tese focou-se na proposta de um sistema não-linear oscilatório que fornecesse um ciclo limite estável na forma de uma elipse. Para isso, realizou-se um estudo na área de sistemas dinâmicos não-lineares, analisando a característica de vários sistemas oscilatórios bem conhecidos, como, por exemplo, o oscilador de Van Der Pol, o oscilador de Rayleigh, o oscilador de Hopf e o oscilador de Kuramoto. A maior inspiração para a proposta do oscilador surgiu da estrutura oscilatória de Hopf, a qual apresenta possibilidade de associação direta e única de seus parâmetros com as características da curva gerada. Além disso, as razões de aspecto da forma do ciclo limite gerado pelo oscilador de Hopf não são alteradas com a variação dos parâmetros.

Assim, propõe-se o seguinte oscilador elíptico:

$$\dot{x} = \alpha \left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}\right)x + \frac{wa}{b}y \quad (4.6)$$

$$\dot{y} = \beta \left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}\right)y - \frac{wb}{a}x \quad (4.7)$$

onde x e y são variáveis e as suas oscilações têm amplitudes definidas por a e b , respectivamente. A frequência angular do ciclo limite é definida por w . Os parâmetros α e β são utilizados para ajustar a convergência do ciclo limite com relação aos eixos de x e y , respectivamente.

Para uma escolha particular dos parâmetros, o ciclo limite gerado pelo oscilador proposto (equações (4.6) e (4.7)) pode ser visto na Figura 4.3. A figura foi obtida através do programa *PPLANE8*, o qual é utilizado para a análise do plano de fase de sistemas de equações diferenciais [22].

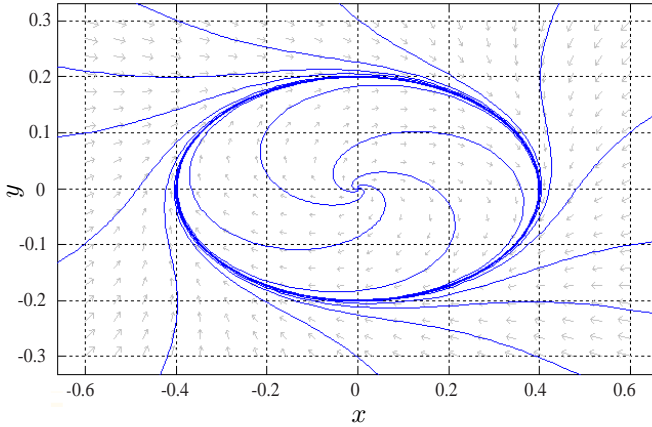


Figura 4.3: Valores das variáveis x e y associadas ao ciclo limite de forma elíptica gerado pelo oscilador proposto ($\alpha = 1$; $\beta = 1$; $a = 0.4$; $b = 0.2$; $w = 1$).

As formas de onda geradas no tempo e a frequência angular do oscilador podem ser vistas na Figura 4.4 para o exemplo da Figura 4.3.

A demonstração da convergência do oscilador e da frequência de oscilação estão descritas no Apêndice A.

Neste estágio da formulação do TCPG, o oscilador elíptico já possibilita a associação com três parâmetros do caminhar: a altura do passo e o comprimento do passo, como anteriormente mencionado; e a velocidade do caminhar, que por consequência da aplicação é uma função da velocidade angular do oscilador elíptico.

Assim, se considerado que as variáveis x e y (do oscilador proposto nas equações (4.6) e (4.7)) podem ser associadas ao comprimento do passo, denotado por L_s , e à altura do passo, denotada por H_s , respectivamente, já é possível realizar a modulação direta de dois parâmetros do caminhar.

Na Figura 4.5 é apresentado um exemplo da modulação dos dois parâmetros. Observa-se que é possível obter transições suaves para a altura e comprimento do passo durante o caminhar, mesmo que o sinal proveniente da modulação seja descontínuo. Salienta-se também que esta velocidade de transição entre uma referência e outra pode ser ajustada pela sintonia dos parâmetros relacionados à convergência do

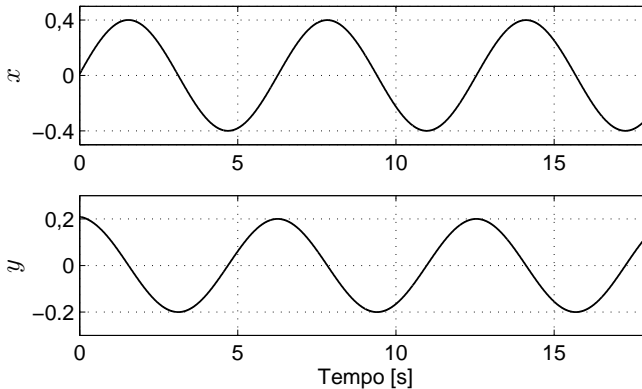


Figura 4.4: Ciclo limite elíptico gerado pelo oscilador proposto ($\alpha = 1$, $\beta = 1$, $a = 0.4$ e $b = 0.2$).

ciclo limite, α e β .

A característica de transição contínua e suave é intrínseca destes osciladores, uma vez que o sistema passa por uma ação integral para obtenção da saída. Esta ação integral permite evitar esforços excessivos pelo sistema de controle e atuação das juntas, bem como a realização de movimentos abruptos durante o caminhar, aumentando a suavidade do mesmo.

Contudo, a trajetória fornecida pelo oscilador elíptico às patas ainda não é satisfatória quando comparada à executada na natureza, a qual se aproxima de uma meia elipse (ver Figura 4.1(b)). Logo, é preciso que o oscilador proposto seja modificado para agregar funções que modificam a forma do seu ciclo limite, sem a perda das propriedades de estabilidade e continuidade, tornando o sinal adequado para o caminhar. Estas funções foram propostas e definidas como funções de transição, e estão descritas no próximo item do capítulo.

4.1.5 Funções de Transição

A trajetória desejada para uma pata pode ser vista como uma curva fechada cujas derivadas são moduladas com base nos objetivos envolvidos em um passo. A variação destas trajetórias também pode ser compreendida como a variação do comportamento de um passo.

Quando a pata de um animal encontra o solo, é como se a sua tra-

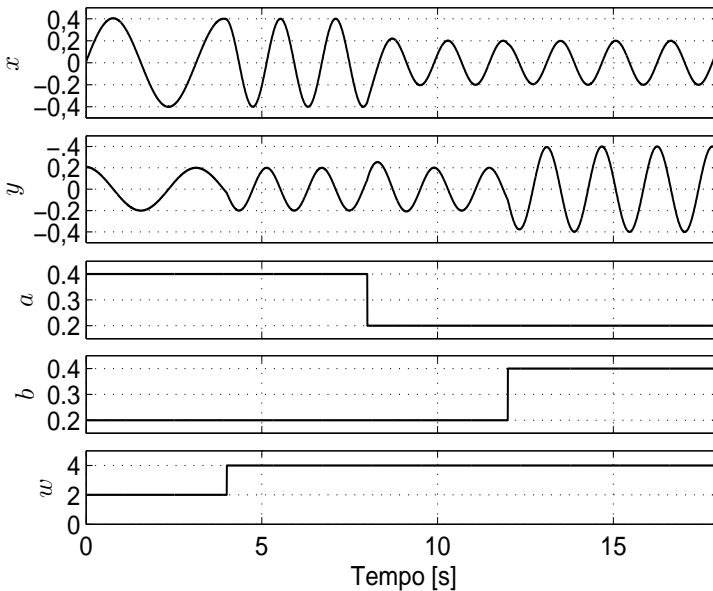


Figura 4.5: Resposta do oscilador à variação paramétrica ($\alpha = 1$, $\beta = 1$ e $w = 1$). A variação do parâmetro a afeta somente a amplitude da variável x (transição em $t = 8s$). A variação do parâmetro b afeta somente a variável y (transição em $t = 12s$). A variação do parâmetro w modifica somente a frequência de oscilação das variáveis x e y (transição em $t = 4s$).

jetória fechada gerada pelo sistema nervoso fosse interrompida, sendo "ceifada ao meio". Não apenas do ponto de vista espacial (ao olhar para a trajetória de um passo), mas também temporal (ao observar o ciclo de um passo), o contato da pata com o solo impõe a variação de referências de modo abrupto.

Apesar da transição entre a fase de balanço e a fase de suporte ser caracterizada de forma descontínua, não é coerente que qualquer variação ou modulação da trajetória gerada pelo oscilador ocorra de forma descontínua. Por isso, com inspiração no trabalho proposto em [86], introduz-se a utilização das *funções de transição de comportamento*, ou simplesmente denominadas *funções de transição*, representadas pelo letra grega σ . A ideia das funções de transição é possibilitar variações contínuas, lentas ou rápidas, pelo arranjo de junções expo-

nenciais. Neste trabalho de tese, utilizam-se dois tipos de funções σ :

$$\sigma_{\uparrow}(\chi) = (e^{-C_{\chi}\chi} + 1)^{-1} \quad (4.8)$$

$$\sigma_{\downarrow}(\chi) = (e^{C_{\chi}\chi} + 1)^{-1} \quad (4.9)$$

em que χ representa a variável da função³ e C_{χ} é um coeficiente de transição que define a taxa de transição das funções. Na Figura 4.6 é apresentado um gráfico, podendo ser observado o valor assumido por estas funções de acordo com o valor de χ .

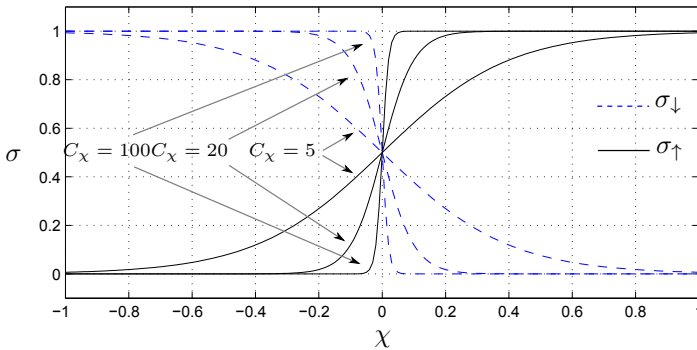


Figura 4.6: Valor das funções de transição σ_{\downarrow} (linha tracejada) e σ_{\uparrow} (linha contínua) em função de uma variável qualquer χ para diferentes coeficientes de transição C_{χ} .

No oscilador elíptico cada parâmetro pode ser associado a um parâmetro do caminhar: a com o comprimento do passo, b com a altura do passo e w com a frequência do passo. Contudo, o oscilador ainda precisa possibilitar uma associação paramétrica com o fator cíclico do passo e a sua trajetória deve ser modulada de modo a assumir forma próxima à apresentada na Figura 4.1(b).

A primeira aplicação das funções de transição se dá para a modulação das velocidades angulares do oscilador e à associação paramétrica com as fases de suporte e de balanço da perna. Para compreender esta aplicação, primeiramente considere o oscilador proposto (equações (4.6) e (4.7)) agora com seus parâmetros associados aos parâmetros do cam-

³A variável χ não tem significado específico na descrição da função σ . Simplesmente representa uma variável de interesse que é utilizada como argumento da função.

inhar:

$$\dot{x} = \alpha \left(1 - \frac{4x^2}{L_s^2} - \frac{z^2}{H_s^2} \right) x + \frac{w_s L_s}{2H_s} z \quad (4.10)$$

$$\dot{z} = \beta \left(1 - \frac{4x^2}{L_s^2} - \frac{z^2}{H_s^2} \right) z - \frac{2w_s H_s}{L_s} x \quad (4.11)$$

em que as variáveis x e z são variáveis pertencentes a um espaço cartesiano, H_s representa a altura desejada para o passo e L_s o comprimento desejado para o passo. O parâmetro w_s está associado à frequência do passo. Tanto as variáveis x e z quanto os parâmetros L_s e H_s são dados em metro.

Ao associar o oscilador proposto aos parâmetros do caminhar L_s e H_s , as variáveis do oscilador recebem um significado físico e a sua modulação se torna intuitiva.

A frequência angular w_s , por sua vez, possibilita a associação com a velocidade desejada V_f para o caminhar do robô e o fator cíclico D_f . Com a utilização das funções de transição a relação de w_s com D_f e V_f é determinada pela seguinte função:

$$w_s = \frac{\pi V_f}{L_s} \left(\frac{D_f}{1 - D_f} \sigma_{\uparrow p}(z) + \sigma_{\downarrow p}(z) \right) \quad (4.12)$$

em que $\sigma_{\uparrow p}(z)$ e $\sigma_{\downarrow p}(z)$ são as funções de transição, com coeficiente de transição b_p , que modulam w_s de forma contínua em função da posição z .

Por w_s ser uma frequência angular modulada não é possível utilizá-la diretamente para obtenção da frequência de oscilação (frequência do passo). Neste caso, a frequência de oscilação é calculada da seguinte forma:

$$f_s = \frac{V_f D_f}{L_s} \quad (4.13)$$

A variação de w_s e das trajetórias geradas x e y pela variação de D_f , com a utilização de $\sigma_{\uparrow p}(z)$ e $\sigma_{\downarrow p}(z)$ conforme a Equação (4.12), está exemplificada na Figura 4.7.

Na Figura 4.7 pode-se observar que a modulação de w_s com a variação de D_f , por meio da Equação (4.12), não preserva a frequência de oscilação. De fato, os quatro parâmetros V_f , L_s , D_f e f_s não podem ser modulados independentemente ao mesmo tempo, pois estão relacionados à apenas três características temporais: a fase de suporte, o fator cíclico e a frequência da oscilação. Ou seja, apenas três dos quatro parâmetros (escolhidos a critério da tarefa) podem ser modulados ao mesmo tempo de forma independente.

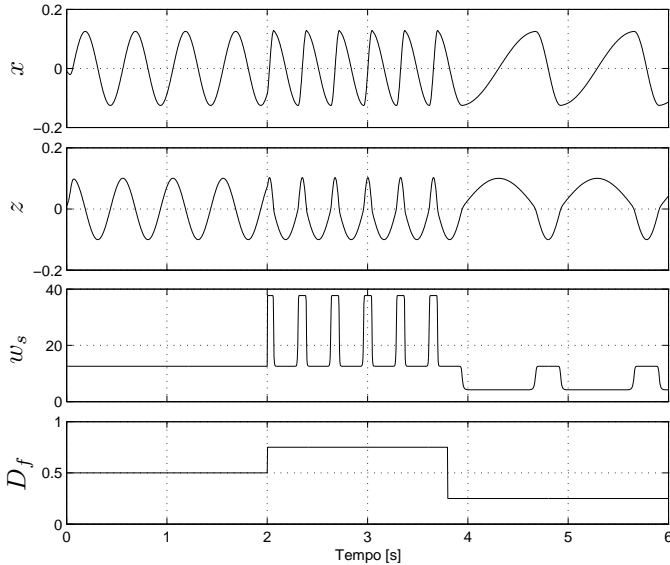


Figura 4.7: Modulação da trajetória de x e z pela variação do parâmetro D_f . Caso em que a frequência de oscilação sofre variação com D_f mas a forma do ciclo limite é preservada.

Na Figura 4.7 a frequência de oscilação (ou frequência do passo) foi variada, mas a forma do ciclo limite foi preservada (amplitudes de x e y preservadas). Neste caso, o que se mantém é a amplitude da variável x determinada por L_s , ou seja, o comprimento do passo. Este tipo de modulação coloca a frequência do passo em segundo plano e valoriza a modulação independente de L_s , que pode ser utilizada em tarefas importantes de posicionamento específico das patas (geralmente realizadas com padrões estaticamente estáveis e $D_f > 0,5$).

Por outro lado, padrões dinamicamente estáveis, para os quais ocorre o movimento balístico do corpo, têm a velocidade, a frequência do passo e o fator cíclico como parâmetros de interesse. Neste caso, é mais coerente que o comprimento do passo seja a consequência matemática da escolha de V_f , D_f e f_s . Para obter este tipo de modulação, a Equação (4.12) deve ser utilizada após o reajuste de L_s , que é calculado como:

$$L_s = \frac{V_f D_f}{f_s} \quad (4.14)$$

O resultado da modulação com a escolha de V_f , D_f e f_s e reajuste de L_s , para a mesma variação de D_f da Figura 4.7, está exemplificada na Figura 4.8.

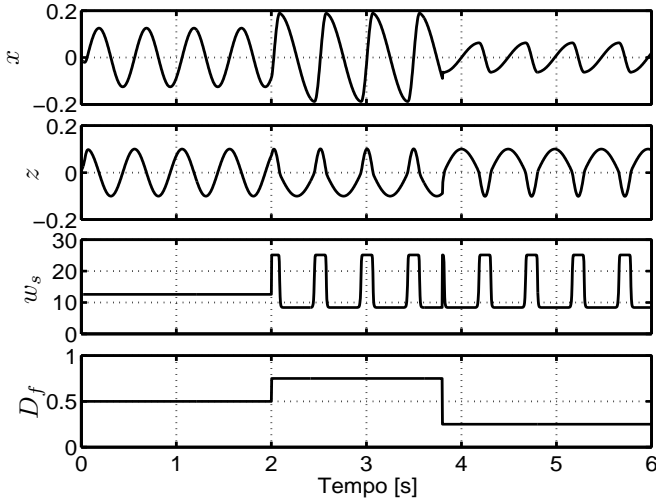


Figura 4.8: Modulação da trajetória de x e z pela variação do parâmetro D_f . Caso em que a forma do ciclo limite é alterada pelo recálculo de L_s para que a frequência de oscilação não varie com o valor de D_f .

4.1.6 Filtro Não-Linear para Adequação das Trajetórias

Apesar da estrutura matemática do oscilador já permitir uma associação de seus parâmetros com todos os parâmetros do caminhar (largura do passo, altura do passo, frequência do passo, velocidade de avanço e fator cíclico), a forma do ciclo limite ainda precisa ser adequada. Esta adequação se resume a tornar a trajetória do ciclo limite uma trajetória semi-elíptica. Para tanto, utilizando novamente as funções de transição, propõe-se um filtro não-linear para o ajuste das velocidades das variáveis x e z em função das regiões do ciclo limite associadas à fase de suporte e à fase de balanço. O filtro não-linear é

descrito da seguinte forma:

$$\dot{x}_f = (\dot{x} + K_c(x - x_f))\sigma_{\uparrow}(z) + V_f\sigma_{\downarrow}(z) \quad (4.15)$$

$$\dot{z}_f = (\dot{z} + K_c(z - z_f))\sigma_{\uparrow}(z) \quad (4.16)$$

em que x_f e z_f são as saídas do filtro e K_c é a constante que determina a resposta do filtro para o seguimento das variáveis x e z . As funções de transição possuem coeficientes de transição b_f (ver definições das Equações 4.8 e 4.9).

A região do oscilador elíptico em que $z < 0$ está associada à fase de suporte, enquanto $z > 0$ à fase de balanço. Assim, o filtro não-linear ajusta a trajetória do oscilador modificando parte da curva inferior, transformando-a em uma semi-elíptica. O efeito do filtro não-linear sobre a trajetória do oscilador está exemplificada na Figura 4.9 para diferentes valores de b_f .

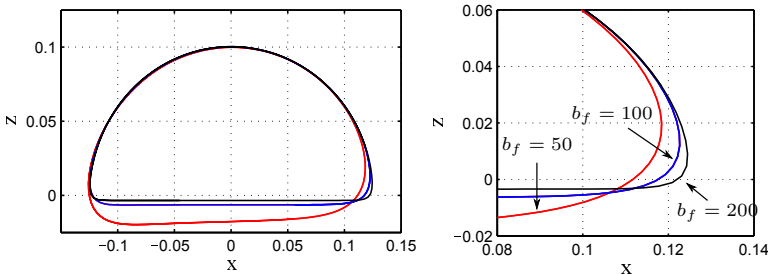


Figura 4.9: Efeito do filtro não-linear sobre a trajetória do oscilador elíptico para diferentes valores de b_f . Quanto maior b_f , mais semi-elíptica se torna a trajetória.

4.1.7 Acoplamento e Sincronização dos Osciladores

Após a definição do oscilador e do filtro não-linear para a geração de trajetórias primitivas para cada pata é possível iniciar a etapa de geração dos padrões.

Para que um robô quadrúpede possa executar um padrão de marcha pré-definido, a trajetória desejada de cada pata deve ser sincronizada às outras. Se é o movimento sincronizado das patas que define o padrão de marcha em um quadrúpede, será o sincronismo entre as referências de cada membro do robô que definirá o padrão de

marcha. Logo, nesta seção, o acoplamento e sincronização de cada oscilador (ciclo limite) serão apresentados.

Primeiramente, considere a generalização do sistema de equações (4.10)-(4.11) e (4.15)-(4.16) para os quatro membros do robô:

$$\dot{x}_i = \alpha \left(1 - \frac{4x_i^2}{L_{s_i}^2} - \frac{z_i^2}{H_{s_i}^2} \right) x_i + \frac{w_f L_{s_i}}{2H_{s_i}} z_i \quad (4.17)$$

$$\dot{z}_i = \beta \left(1 - \frac{4x_i^2}{L_{s_i}^2} - \frac{z_i^2}{H_{s_i}^2} \right) z_i - \frac{w_f 2H_{s_i}}{L_{s_i}} x_i \quad (4.18)$$

$$\dot{x}_{f_i} = (\dot{x}_i + K_c(x_i - x_{f_i}))\sigma_{\uparrow}(z_i) + V_{f_i}\sigma_{\downarrow}(z_i) \quad (4.19)$$

$$\dot{z}_{f_i} = (\dot{z}_i + K_c(z_i - z_{f_i}))\sigma_{\uparrow}(z_i) \quad (4.20)$$

onde i é o índice relacionado à i -ésima pata ($i = 1, 2, 3, 4$).

O acoplamento entre osciladores é obtido tornando a dinâmica da variável de um oscilador dependente da variável de outro oscilador. Além disso, é através da função que acopla as variáveis que se define o tipo do sincronismo dos osciladores.

Segundo [12], a sincronização pode ser classificada da seguinte forma:

- **Sincronização idêntica:** ocorre quando existe um sincronismo de amplitude e fase dos subsistemas;
- **Sincronização de retardo:** ocorre quando existe um tempo de atraso entre as trajetória dos subsistemas, o qual se for compensado resulta em uma sincronização idêntica dos subsistemas;
- **Sincronização de fase:** ocorre quando as fases dos sistemas mantém uma relação proporcional entre ambas, podendo o comportamento em amplitude estar completamente incoerente. Vale ressaltar que a medição da fase precisa ser definida para cada caso;
- **Sincronização de frequência:** ocorrendo sincronismo de fase, as frequências também estarão sincronizadas, devido à relação existente entre fase e frequência. Contudo o contrário não é verdadeiro.

A sincronização também pode ser classificada de acordo com a estrutura da interconexão dos subsistemas. Para tal, duas categorias podem ser estabelecidas [8]: sincronização interna ou mútua, que é o resultado da interação entre todos os subsistemas (acoplamento bidirecional); e sincronização externa, que ocorre quando um dos subsistemas

exerce uma forte influência nos demais sendo fracamente influenciado por estes ou quando o acoplamento é unidirecional, como por exemplo na forma mestre-escravo.

Para que o sinal sincronizado dos osciladores resulte em padrões de marcha para robôs quadrúpedes, deve-se realizar uma sincronização de fase entre os osciladores. Sobre a estrutura de acoplamento, verifica-se na literatura o emprego generalizado da sincronização mútua, ou seja, de acoplamentos bidirecionais entre todos os osciladores.

Considerando que o estudo da sincronização de sistemas oscilatórios não-lineares constitui um conteúdo vasto e complexo, opta-se por utilizar o funcional de sincronização proposto em [86], descrito como:

$$f_i(\zeta) = \sum \Theta_{ij} \zeta_j, \quad j = 1..4 \quad (4.21)$$

onde ζ é uma variável do sistema de equações e Φ_{ij} denota o elemento ij da matriz de acoplamento $\Theta \in \mathfrak{R}^{4 \times 4}$.

Esta função, apesar de formulada para o sincronismo do oscilador proposto no referido trabalho, também é aplicável ao oscilador proposto nesta tese. O que ocorre devido à similaridade estrutural dos osciladores.

O termo descrito na equação (4.21) acopla os sistemas de equações do TCPG da seguinte forma:

$$\dot{x}_i = \alpha \left(1 - \frac{4x_i^2}{L_{s_i}^2} - \frac{z_i^2}{H_{s_i}^2} \right) x_i + \frac{w_f L_{s_i}}{2H_{s_i}} z_i \quad (4.22)$$

$$\dot{z}_i = \beta \left(1 - \frac{4x_i^2}{L_{s_i}^2} - \frac{z_i^2}{H_{s_i}^2} \right) z_i - \frac{w_f 2H_{s_i}}{L_{s_i}} x_i + \sum \Theta_{ij} z_j \quad (4.23)$$

Como pode ser verificado, optou-se por realizar o acoplamento dos osciladores através da variável z . A ideia é não causar perturbações diretas no subsistema de x , uma vez que esta variável está diretamente relacionada a velocidade do caminhar.

Com este acoplamento, os osciladores passam a ser sincronizados de acordo com a matriz Θ , cujos elementos assumem valores específicos de acordo com o padrão de marcha a ser executado, i.e.:

$$\Theta_{Trote} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$\Theta_{Caminhar} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$\Theta_{Passo} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$$\Theta_{Salto} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

Para exemplificar o efeito da função de sincronização, na Figura 4.10 estão apresentadas as sincronizações para três dos quatro padrões acima mencionados: passo, caminhar e trote.

A estrutura de geração apresentada até a inserção do termo de acoplamento e sincronização permite a modulação independente de todos os parâmetros do caminhar. No entanto, a função de sincronização proposta em [86] não contempla o acoplamento de osciladores que possuem amplitudes de oscilação distintas. Como consequência, para o oscilador proposto, a altura dos passos fica restrita a um único valor e a capacidade de modulação independente dos parâmetros é perdida.

Para contornar este inconveniente, apresenta-se a seguir uma proposta de solução.

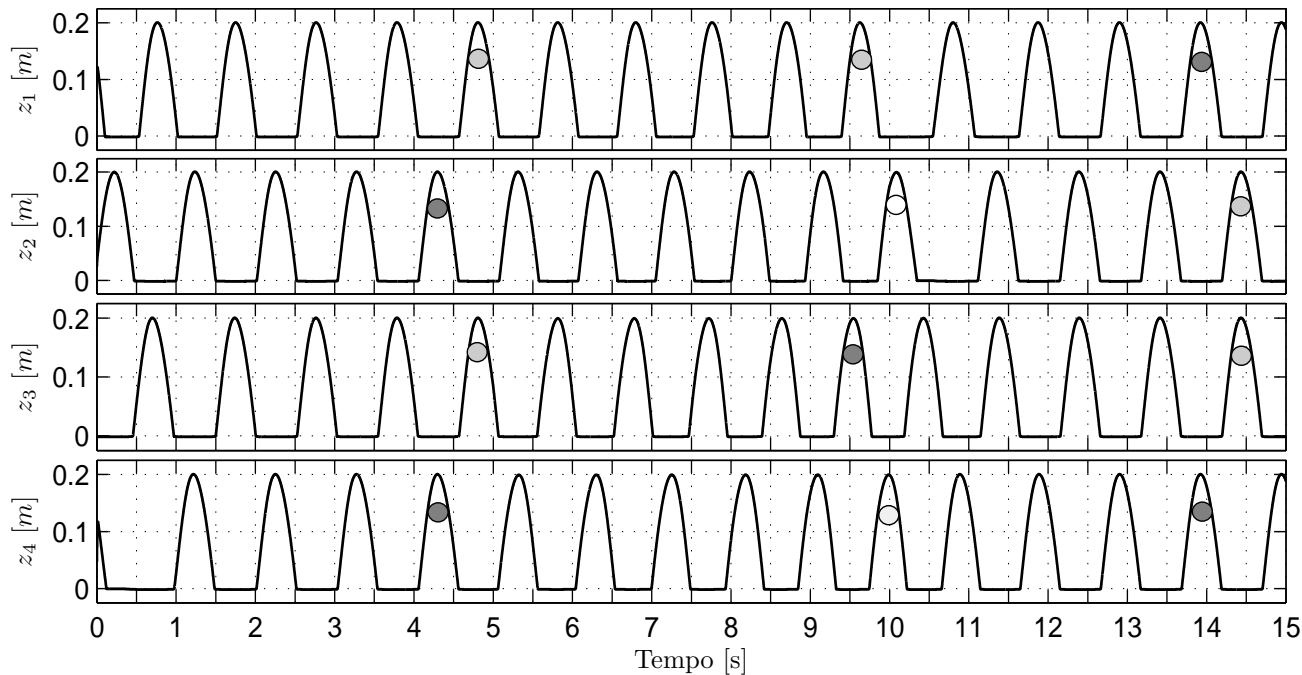


Figura 4.10: Sincronização dos osciladores para obtenção dos padrões passo (aos 5s), caminhar (aos 10s) e trote (aos 15s). Os círculos, de tonalidades diferentes, auxiliam na visualização da diferença de fase entre cada referência.

4.1.8 Normalização da Matriz de Sincronização

Para que o termo de sincronização da Equação (4.23) permita a modulação independente das variáveis envolvidas, propõe-se nesta tese a normalização dos coeficientes de acoplamento Θ_{ij} .

De um modo geral, a ideia consiste em normalizar os elementos da matriz Θ de acordo com a amplitude desejada para as variáveis da função de sincronização. Assim, com base na equação (4.21), define-se a seguinte função de sincronização normalizada:

$$f_{N_i}(\zeta) = \sum \Theta_{ij} \frac{\hat{\zeta}_i}{\hat{\zeta}_j} \zeta_j, \quad j = 1, 2, 3, 4. \quad (4.28)$$

em que $\hat{\zeta}_i$ denota a amplitude de oscilação desejada para a variável ζ_i .

Considerando que as variáveis envolvidas na sincronização do oscilador proposto correspondem à z_1 , z_2 , z_3 e z_4 , com amplitudes de oscilação definidas por H_{s_1} , H_{s_2} , H_{s_3} e H_{s_4} , a função de sincronização normalizada torna-se:

$$f_{N_i}(z) = \sum \Theta_{ij} \frac{H_{s_i}}{H_{s_j}} z_j, \quad j = 1, 2, 3, 4. \quad (4.29)$$

Utilizando a equação (4.29) para a sincronização do TCPG, a altura de cada passo pode ser modulada de forma independente, como pode ser visto na Figura 4.11.

4.1.9 Orientação do Ciclo Limite para a Orientação do Caminhar

Cinco parâmetros do caminhar já foram introduzidos na estrutura do oscilador proposto:

- L_s - a largura do passo;
- H_s - a altura do passo;
- V_f - a velocidade de avanço;
- D_f - o fator cíclico do passo;
- Θ - o padrão de marcha.

Todos estes parâmetros podem ser modulados de forma direta e independente para adaptação do caminhar.

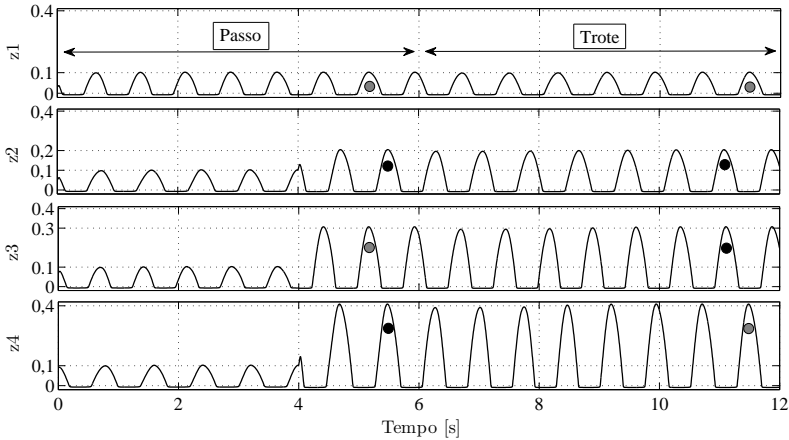


Figura 4.11: Modulação paramétrica independente da altura de cada passo e do padrão de marcha obtida pelo uso da função de sincronização normalizada. A modulação da amplitude de cada sinal não afeta a sincronia dos osciladores.

A sexta ação a ser introduzida na estrutura do oscilador proposto está associada à orientação do caminhar e à locomoção em superfícies inclinadas. Para realizar esta ação, propõe-se a utilização de uma matriz de rotação aplicada à saída do filtro não-linear.

Para melhor compreender a aplicação desta matriz, considere um sistema de coordenadas R_{q_i} fixo em cada quadril do robô quadrúpede, conforme ilustrado na Figura 4.12. Cada um destes sistemas de coordenadas representa um espaço de trabalho do robô onde cada um dos ciclos limite do TCPG é gerado. A posição de cada pata do robô é descrita com base nos eixos coordenados do seu respectivo espaço de trabalho, sendo definida como:

$$X_{q_i} = [x_{q_i}, y_{q_i}, z_{p_i}]^T, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (4.30)$$

Conforme descrito até então, a base de geração de cada ciclo limite é planar e correspondente ao plano XZ , como pode ser visto na Figura 4.13. Esta característica é matematicamente definida no sistema de equações do gerador pela inclusão do termo $\dot{y} = 0$.

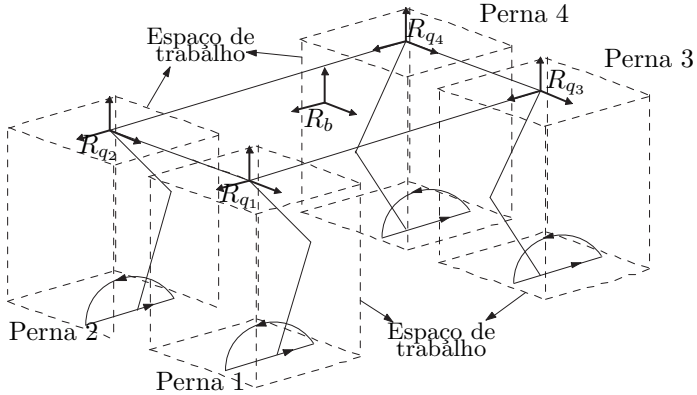


Figura 4.12: Geração dos ciclos limite para cada espaço de trabalho.

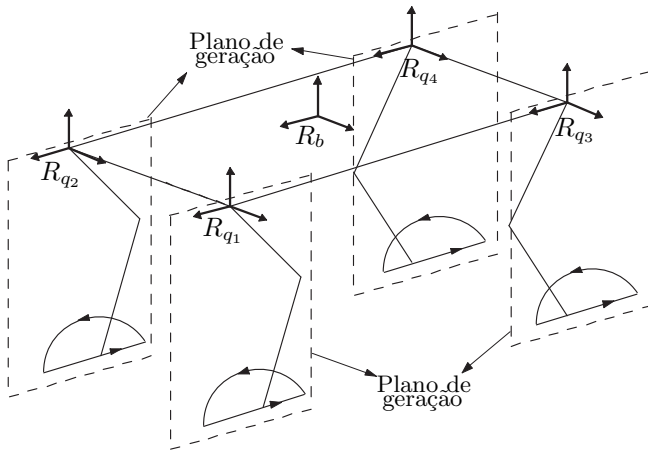


Figura 4.13: Planos de geração dos ciclos limite.

Com isso, o sistema de equações de cada oscilador com relação ao respectivo espaço de trabalho fica definido como:

$$\dot{x}_i = \alpha \left(1 - \frac{4x_i^2}{L_{s_i}^2} - \frac{z_i^2}{H_{s_i}^2} \right) x_i + \frac{w_f L_{s_i}}{2H_{s_i}} z_i \quad (4.31)$$

$$\dot{y}_i = 0 \quad (4.32)$$

$$\dot{z}_i = \beta \left(1 - \frac{4x_i^2}{L_{s_i}^2} - \frac{z_i^2}{H_{s_i}^2} \right) z_i - \frac{w_f 2H_{s_i}}{L_{s_i}} x_i + \sum \Theta_{ij} \frac{H_{s_i}}{H_{s_j}} z_j \quad (4.33)$$

$$\dot{x}_{fi} = (\dot{x}_i + K_c(x_i - x_{fi}))\sigma_{\uparrow}(z_i) + V_{fi}\sigma_{\downarrow}(z_i) \quad (4.34)$$

$$\dot{y}_{fi} = (\dot{y}_i + K_c(y_i - y_{fi}))\sigma_{\uparrow}(z_i) \quad (4.35)$$

$$\dot{z}_{fi} = (\dot{z}_i + K_c(z_i - z_{fi}))\sigma_{\uparrow}(z_i) \quad (4.36)$$

Considerando que cada ciclo limite do gerador tem a posição da sua origem determinada por um vetor $X_{q_{oi}} = [x_{q_{oi}}, y_{q_{oi}}, z_{q_{oi}}]^T$, o vetor X_{q_i} é definido como:

$$X_{q_i} = X_{q_{oi}}^T + X_{f_i}^T, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (4.37)$$

em que $X_{f_i} = [x_{f_i}, y_{f_i}, z_{f_i}]^T$.

A matriz de rotação é composta por funções trigonométricas cujos argumentos estão relacionados aos movimentos de rolagem, arfagem e guinada que são aplicados a cada ciclo limite com centro de rotação em suas origens. A matriz de rotação é descrita como:

$$R(\phi, \theta, \psi) = \begin{bmatrix} c_{\psi}c_{\theta} & -s_{\psi}c_{\theta} + c_{\psi} s_{\theta}s_{\phi} & s_{\psi}s_{\phi} + c_{\psi}c_{\phi}s_{\theta} \\ s_{\psi}c_{\theta} & c_{\psi}c_{\phi} + s_{\phi}s_{\theta}s_{\psi} & -c_{\psi}s_{\phi} + s_{\theta}s_{\psi}c_{\phi} \\ -s_{\theta} & c_{\theta}s_{\phi} & c_{\theta}c_{\phi} \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

com $s_{\phi} = \text{sen}(\phi)$, $c_{\phi} = \text{cos}(\phi)$ e assim por diante. Os ângulos ϕ , θ e ψ denotam, respectivamente, os ângulos de rolagem, arfagem e guinada.

Ao todo são doze ângulos que definem a orientação do caminhar, sendo três ângulos de orientação (ϕ_{q_i} , θ_{q_i} e ψ_{q_i}) para cada ciclo limite. Estes doze ângulos são definidos como os *parâmetros de orientação* e representados pelo vetor $\Xi \in \mathbb{R}^{12 \times 1}$:

$$\Xi = [\phi_{q_1} \ \theta_{q_1} \ \psi_{q_1} \ \dots \ \phi_{q_4} \ \theta_{q_4} \ \psi_{q_4}]^T \quad (4.39)$$

Uma matriz de rotação é implementada para cada um dos quatro osciladores e a orientação coordenada destas matrizes orientará o movimento do robô e/ou ajustará o movimento de cada pata sobre superfícies inclinadas.

A aplicação da matriz de rotação $R(\phi_{q_i}, \theta_{q_i}, \psi_{q_i})$ não é realizada sobre um vetor X_{q_i} , mas sobre a componente proveniente da saída do respectivo filtro não-linear. Assim, o vetor de posição de cada pata fica redefinido como:

$$X_{q_i} = X_{q_{oi}}^T + R(\phi_{q_i}, \theta_{q_i}, \psi_{q_i})X_{f_i} \quad (4.40)$$

$$\dot{X}_{q_i} = R(\phi_{q_i}, \theta_{q_i}, \psi_{q_i})\dot{X}_{f_i} \quad (4.41)$$

$$\ddot{X}_{q_i} = R(\phi_{q_i}, \theta_{q_i}, \psi_{q_i})\ddot{X}_{f_i} \quad (4.42)$$

Para compreender melhor a utilização da matriz de rotação no controle da orientação do caminhar, introduz-se o conceito da *superfície de referências* (SR). A SR é uma superfície gerada para melhor visualizar o ajuste das trajetórias conforme inclinação do terreno. Tal superfície é obtida pela rotação completa do ciclo limite em torno do eixo Z do espaço de trabalho correspondente. Como ilustrado na Figura 4.14.

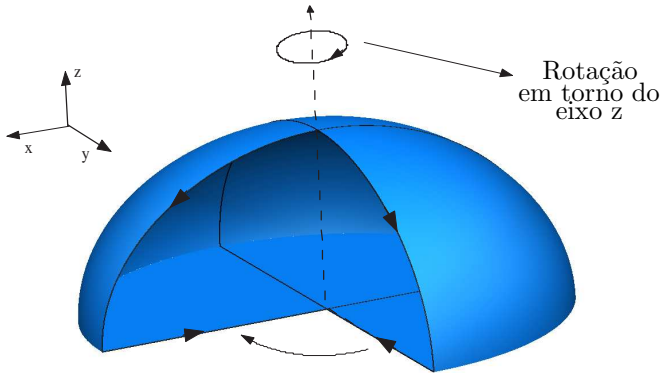


Figura 4.14: Geração da superfície de referências.

Comentário 4.1 *O efeito causado pelo processo de modulação de todas as superfícies de referências pode ser melhor entendido fazendo uma analogia ao controle de direção de um automóvel. Quando a orientação de um ciclo limite é modificada a direção da locomoção é modificada do mesmo modo que a guinada das rodas modifica a orientação de deslocamento de um automóvel. Assim, modificando os parâmetros de orientação cada SR pode ser ajustada de modo a adequar-se à superfície do terreno e melhor orientar a locomoção.*

Na Figura 4.15 exemplifica-se como as SRs são alteradas de acordo com os parâmetros de orientação.

O ajuste das SRs através dos parâmetros de orientação também constitui um artifício que simplifica a modulação do caminhar. Quando o robô caminha sobre um plano inclinado a postura deve ser ajustada de modo a aumentar a margem de estabilidade. Em robôs que possuem CPGs projetados no espaço de juntas a maneira de realizar este ajuste não é clara devido ao problema da modulação paramétrica. Diferentemente, no TCPG a postura pode ser ajustada de modo simples e direto:

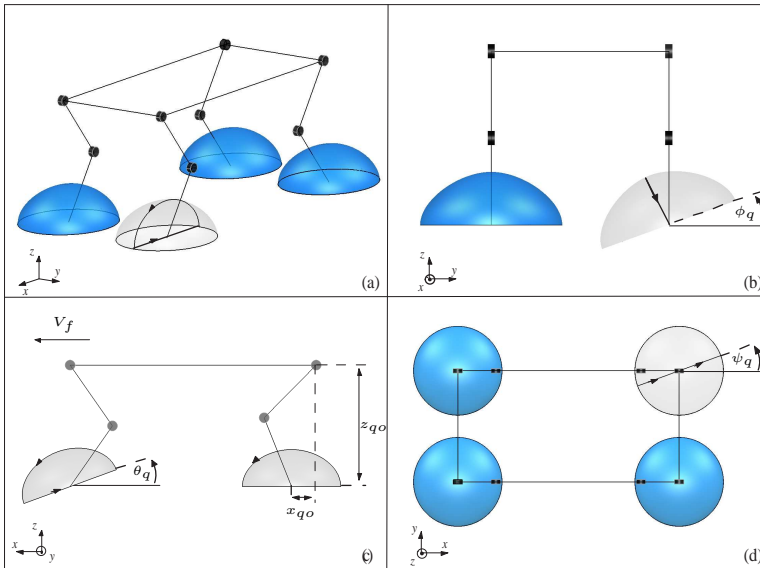


Figura 4.15: Ajuste das SRs de acordo com os parâmetros de orientação: (a) vista isométrica, (b) rolagem do ciclo limite, (c) arfagem do ciclo limite e (d) guinada do ciclo limite.

alteram-se os valores das origens dos ciclos limite dentro de cada espaço de trabalho, ajustando a inclinação do dorso e a região de suporte; e alteram-se os parâmetros de orientação para adequar os ciclos limite a inclinação do terreno, como exemplificado na Figura 4.16.

4.1.10 Filtragem Variável para Adaptação em Terreno Irregular

Esta seção tem por objetivo o aumento da robustez do caminhar quando realizado em terrenos irregulares e é uma contribuição ao estado da arte da locomoção de robôs quadrúpedes.

A estabilidade da locomoção de robôs quadrúpedes é consideravelmente sensível a forma da superfície de contato. A utilização das mesmas referências cinemáticas usadas para terrenos planos em terrenos irregulares pode facilmente levar o robô a perder a estabilidade e tombar. Logo, conclui-se que a adaptação das trajetórias geradas é fundamental para a locomoção em terrenos naturais.

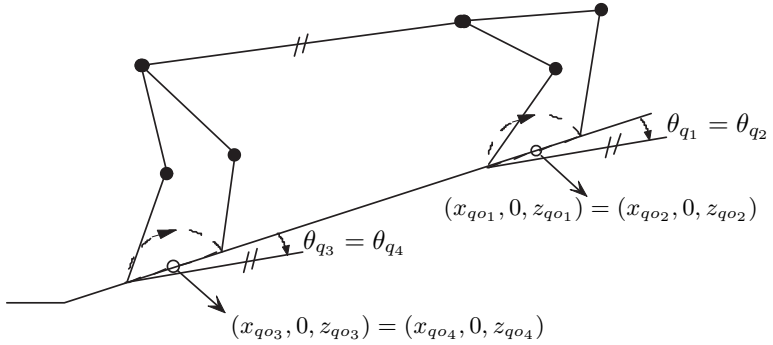


Figura 4.16: Ajuste da postura e da trajetória dos passos para locomoção em terrenos inclinados.

Nesta seção, propõe-se um artifício que agrega ao gerador de padrões a capacidade de geração adaptativa. A adaptação ocorre de forma reativa, porém, sem a introdução de descontinuidades significativas na trajetória gerada. A estratégia visa aumentar a robustez da locomoção, principalmente quando não é possível realizar o posicionamento específico das patas, explorando a capacidade intrínseca de suspensão ativa que os robôs com pernas possuem.

A ação adaptativa é implementada através da inserção, nas funções de transição dos filtros não-lineares, de um parâmetro relativo à *profundidade do passo*, denotado por z_{td} :

$$\sigma_{\uparrow}(\bar{z}_i) = (e^{-b_f(z_i - z_{td_i})} + 1)^{-1} \quad (4.43)$$

$$\sigma_{\downarrow}(\bar{z}_i) = (e^{b_f(z_i - z_{td_i})} + 1)^{-1} \quad (4.44)$$

em que $\bar{z}_i = z_i - z_{td_i}$.

Dependendo do valor assumido pelo parâmetro z_{td} , o qual pertence ao intervalo $[-H_s, 0]$, o ciclo limite é modificado a partir do deslocamento do efeito de retificação, como ilustrado na Figura 4.17.

A ação adaptativa atua da seguinte forma: não havendo contato com o solo, o parâmetro z_{td} é mantido em seu valor limite, ou seja, $z_{td} = -H_s$. Com isso o oscilador gera uma elipse completa, o que pode ser entendido como um movimento realizado pelo robô com o intuito de procurar uma região de contato/suporte (contida no espaço de trabalho) que se encontra mais distante. No entanto, se a pata encontra o solo, em um instante em que a variável z do oscilador se encontra no intervalo $[-H_s, 0]$, o valor da trajetória correspondente a variável z

do oscilador é capturado e atribuído à z_{td} . Esta atribuição adapta a trajetória do caminhar à superfície do terreno, como exemplificado na Figura 4.18.

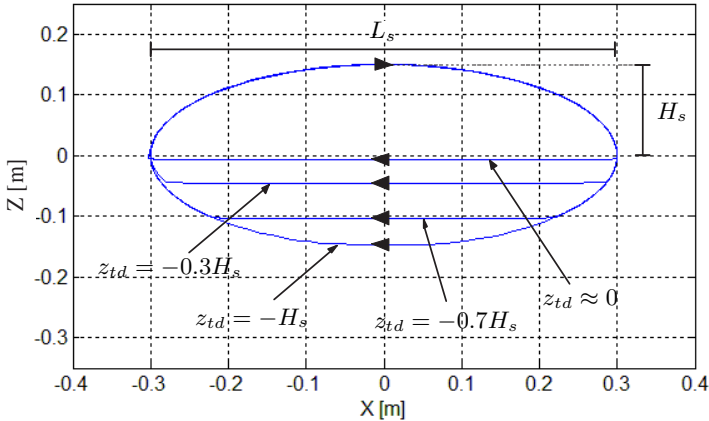


Figura 4.17: Ação adaptativa obtida pela inserção do parâmetro z_{td} nas funções de transição dos filtros não-lineares.

A superfície de referências, por sua vez, também é modificada pelo efeito adaptativo de z_{td} , como mostrado na Figura 4.19.

Assim, a profundidade do passo corresponde à distância, medida sobre o eixo Z de cada espaço de trabalho, entre a origem do ciclo limite e o ponto de contato da pata com o terreno.

4.2 Bloco de Geração de Referências

O bloco de geração de referências é o bloco responsável pela geração das trajetórias de cada pata. No SCR, este bloco é definido basicamente pela estratégia de geração baseada em CPG descrita na seção anterior, porém, com a inclusão de algumas características particulares.

Na seção anterior a abordagem proposta para geração de referências foi descrita de modo generalizado, podendo ser aplicada a qualquer espaço cartesiano. A principal característica do bloco de geração de referências é que as trajetórias são geradas em um sistema de coordenadas peculiar, ou seja, em um sistema de coordenadas horizontal tipo móvel (descrito no Capítulo 3).

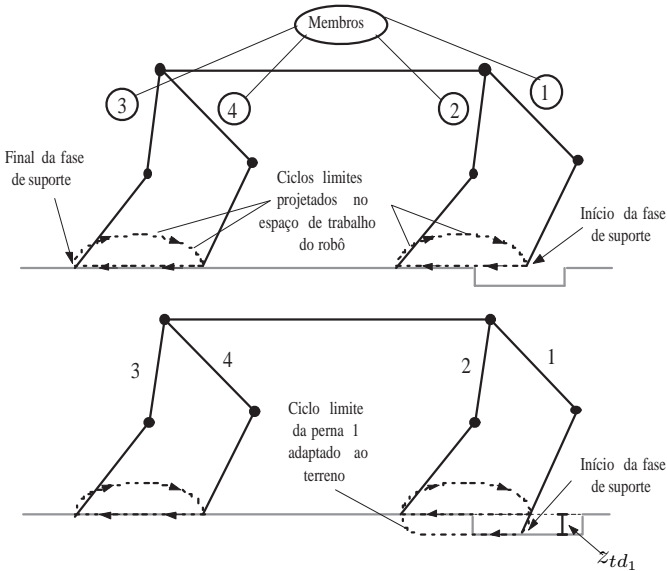


Figura 4.18: Diferença entre um caminhar sem (a) e com (b) ação adaptativa por z_{td} .

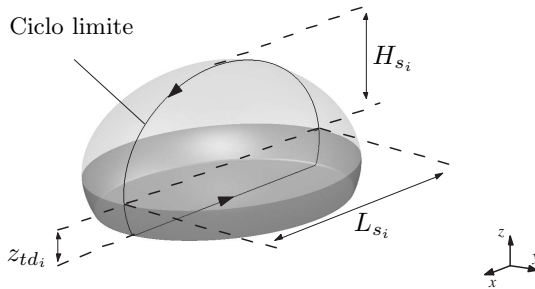


Figura 4.19: Superfície de referências modificada pelo efeito adaptativo de z_{td} .

Como descrito na Seção 3.2, o bloco de geração de referências tem como entradas as informações provenientes da interação robô-ambiente e as informações provenientes do bloco de controle de distúrbio. As informações da interação robô-ambiente são utilizadas para a captura da profundidade do passo z_{td} de cada pata e adaptação das trajetórias

à superfície do terreno. As informações de controle de distúrbio são utilizadas para o deslocamento da origem dos ciclos-limite com relação aos eixos X e Y do SCH.

Com isso, a rede de osciladores responsável pela geração das trajetórias primitivas de cada pata no SCH é definida como:

$$\dot{x}_{p_i}^h = \alpha \left(1 - \frac{4\bar{x}_i^2}{L_s^2} - \frac{\bar{z}_i^2}{H_{s_i}^2} \right) \bar{x}_i + \frac{w_{s_i} L_s}{2H_{s_i}} \bar{z}_i \quad (4.45)$$

$$\dot{y}_{p_i}^h = \beta (-\bar{y}_i) \quad (4.46)$$

$$\dot{z}_{p_i}^h = \gamma \left(1 - \frac{4\bar{x}_i^2}{L_s^2} - \frac{\bar{z}_i^2}{H_{s_i}^2} \right) \bar{z}_i - \frac{w_{s_i} 2H_{s_i}}{L_s} \bar{x}_i + \sum \Theta_{ij} \frac{H_{s_i}}{H_{s_j}} \bar{z}_j \quad (4.47)$$

$$w_{s_i} = \pi \frac{V_f}{L_s} \left(\frac{D_f}{1 - D_f} \sigma_{\uparrow}(\bar{z}_i) + \sigma_{\downarrow}(\bar{z}_i) \right) \quad (4.48)$$

$$\sigma_{\uparrow}(\bar{z}_{p_i}) = (e^{-b_p \bar{z}_{p_i}} + 1)^{-1} \quad (4.49)$$

$$\sigma_{\downarrow}(\bar{z}_{p_i}) = (e^{b_p \bar{z}_{p_i}} + 1)^{-1} \quad (4.50)$$

em que $x_{p_i}^h$, $y_{p_i}^h$ e $z_{p_i}^h$ são as saídas do i -ésimo oscilador que compõem o vetor de referência de posição $X_{p_i}^h = [x_{p_i}^h \ y_{p_i}^h \ z_{p_i}^h]^T$, no sistema de coordenadas horizontal, relacionado à i -ésima pata. Cada elipse é posicionada no SCH pelo uso das variáveis transladadas $\bar{x}_i = x_{p_i}^h - x_{p0_i}^h - \Delta_{x_i}^h$, $\bar{y}_i = y_{p_i}^h - y_{p0_i}^h - \Delta_{y_i}^h$ e $\bar{z}_i = z_{p_i}^h - z_{p0_i}^h$, em que $(x_{p0_i}^h, y_{p0_i}^h, z_{p0_i}^h)$ são as coordenadas da origem da i -ésima elipse e $\Delta_{x_i}^h$ e $\Delta_{y_i}^h$ são os deslocamentos provenientes do controle de distúrbio. A constante b_p ajusta a taxa de transição de $\sigma_{\uparrow}(\bar{z}_{p_i})$ e $\sigma_{\downarrow}(\bar{z}_{p_i})$. As constantes α , β e γ ajustam a taxa de convergência dos ciclos-limite para a forma elíptica.

O filtro não-linear é definido como:

$$\dot{X}_{f_i}^h = (\dot{X}_{p_i}^h + K_c(X_{p_i}^h - X_{f_i}^h))\sigma_{\uparrow}(\bar{z}_{p_i}) - V_i^h \sigma_{\downarrow}(\bar{z}_{p_i}) \quad (4.51)$$

$$\sigma_{\uparrow}(\bar{z}_{p_i}) = (e^{-b_f(\bar{z}_{p_i} - z_{td_i})} + 1)^{-1} \quad (4.52)$$

$$\sigma_{\downarrow}(\bar{z}_{p_i}) = (e^{b_f(\bar{z}_{p_i} - z_{td_i})} + 1)^{-1} \quad (4.53)$$

no qual $X_{f_i}^h$ é a referência de posição associada à i -ésima pata. Durante a fase de suporte a saída do filtro se torna $\dot{X}_{f_i}^h = -V_i$, em que $V_i^h = [V_{x_i}^h \ V_{y_i}^h \ V_{z_i}^h]^T$ é um vetor calculado para prover movimentação omnidirecional ao robô.

Os vetores $X_{f_i}^h$, $\dot{X}_{f_i}^h$ e $\ddot{X}_{f_i}^h$ constituem as saídas do bloco de geração de referências, as quais são enviadas para o bloco de ajuste cinemático.

4.2.1 Modulação de Referências

A abordagem de geração de trajetórias no espaço cartesiano baseada em CPGs proposta nesta tese possui a vantagem de possibilitar a modulação direta e independente dos parâmetros relacionados às características do caminhar. Além disso, por estar em um espaço cartesiano, ela permite a modulação dos parâmetros diretamente no espaço da tarefa.

Nesta seção, dois exemplos de modulação serão descritos: a modulação que proporciona locomoção omnidirecional com satisfação de restrições e a modulação que permite a variação da velocidade da pata ao longo da fase de balanço da perna.

Movimentação Omnidirecional com Satisfação de Restrições

Um dos maiores problemas das abordagens baseadas em CPGs com a geração realizada no espaço de juntas é a dificuldade de se obter referências que satisfaçam restrições de movimento.

As restrições de movimento existem basicamente entre as patas em fase de suporte e correspondem aos movimentos relativos de cada pata que não causam forças internas de reação. Para a maioria dos casos, as forças internas não são desejáveis por levarem ao desperdício de energia (por serem forças que não resultam em movimento), a sobrecargas na estrutura mecânica das pernas e ao deslizamento das patas. O desperdício de energia reduz a autonomia do robô, a sobrecarga na estrutura pode trazer fadiga desnecessária, e o deslizamento pode levar a acidentes danosos para o robô em casos de locomoção em terrenos irregulares ou próxima a degraus, quinas ou encostas.

A geração de referências com restrição de movimentação é tão importante que alguns pesquisadores abandonaram a abordagem via CPG devido à dificuldade de se encontrar uma solução conveniente.

Uma das motivações de levar o conceito de CPGs para o espaço cartesiano está na possibilidade de se agregar à geração de referências as facilidades do planejamento de trajetórias que é realizado no próprio espaço da tarefa, o qual não depende diretamente da configuração cinemática do robô.

No caso do bloco de geração de referências do SCR, o qual utiliza a abordagem TCPG proposta, a trajetória de cada pata no SCH é obtida em função das velocidades desejadas para o dorso (também no SCH), de forma relativamente simples, utilizando um jacobiano que satisfaz intrinsecamente as restrições de movimento. Os vetores de velocidade V_i de cada pata (presentes na Equação (4.51)) durante a

fase de suporte são obtidos de acordo com a seguinte relação:

$$V_p^h = J_v^h(q_r, \phi_b, \theta_b, \Xi) \dot{x}_{b_d}^h \quad (4.54)$$

em que $V_p^h = [(V_1^h)^T (V_2^h)^T (V_3^h)^T (V_4^h)^T]^T$ é o vetor que contém as velocidades desejadas de todas as patas no SCH e $\dot{x}_{b_d}^h = [\dot{x}_{b_d}^h \dot{y}_{b_d}^h \dot{z}_{b_d}^h \dot{\phi}_{b_d}^h \dot{\theta}_{b_d}^h \dot{\psi}_{b_d}^h]^T$ é o vetor de velocidades lineares e angulares desejadas para o dorso. A relação entre os dois vetores de velocidades é obtida por meio do Jacobiano J_v^h que depende dos ângulos das juntas de cada perna (contidos em q_r), dos estados relativos à orientação do dorso (ϕ_b e θ_b) e dos parâmetros de orientação do caminhar (contidos em Ξ).

Fase de Balanço com Velocidade Variável

Quando se realiza uma locomoção sem o conhecimento prévio da superfície do terreno, o modo com que é realizada a aproximação da pata com o solo e as reações que o robô toma após o contato com a superfície são fundamentais para a estabilidade do robô e para a integridade da estrutura mecânica.

O exemplo a seguir mostra como é possível utilizar a capacidade de modulação direta e independente para modular a frequência angular do ciclo limite, durante a fase de balanço da perna, e reduzir as forças de impacto da pata com o solo.

A Figura 4.20 ilustra a trajetória da pata relativa ao dorso durante o ciclo de um passo. O propósito deste exemplo segue a mesma heurística que um ser humano utilizaria para caminhar no escuro: a região do espaço que já foi ocupada pelo próprio corpo é considerada uma região de movimentação segura, ou seja, a região da trajetória em torno e abaixo da perna do robô. A partir desta lógica a frequência angular (a velocidade da pata) do ciclo limite pode ser aumentada na região segura e reduzida na região de contato incerto.

Conforme a ilustração da Figura 4.20, dividiu-se a trajetória em duas regiões simétricas: a segura em cinza escuro e a incerta em cinza claro. A divisão simétrica simplifica a manutenção da frequência de oscilação média e a obtenção das funções de modulação.

As funções que modulam w_s também são construídas a partir das funções de transição. Estas funções permitem escolher a razão entre o período da trajetória na região segura e o período da trajetória na região de contato incerto, a qual indiretamente define a diferença entre a velocidade de aproximação da pata e a velocidade na região segura. A razão entre períodos é definida por K_r , o qual deve ser sempre maior que zero.

A razão K_r em arranjo com as funções de transição resultam no ganho variável K_{vf} . Este ganho variável modula a velocidade angular w_{s_i} (observar Equação (4.48)) na região associada à fase de balanço da perna i da seguinte forma:

$$w_{s_i} = \pi \frac{V_f}{L_s} \left(\frac{D_f}{1 - D_f} K_{vf_i} \sigma_{\uparrow}(\bar{z}_i) + \sigma_{\downarrow}(\bar{z}_i) \right) \quad (4.55)$$

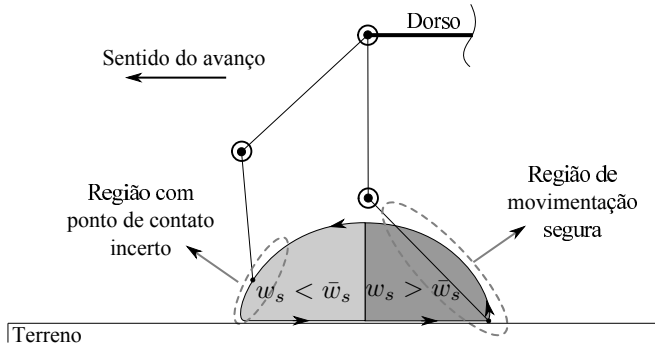


Figura 4.20: Trajetória da pata com relação ao corpo para o ciclo de um passo. Em cinza escuro a região de trajetórias associada à região de movimentação segura. Em cinza claro a região associada à região de contato incerto. O termo \bar{w}_s representa a frequência angular média da fase de balanço.

na qual o i -ésimo ganho K_{vfi} é determinado como:

$$K_{vfi} = K_r \sigma_{\uparrow}(x_{pi}^h) + \frac{K_r}{2K_r - 1} \sigma_{\downarrow}(x_{pi}^h), \quad (4.56)$$

em que a taxa de transição das duas funções σ é definida pelo ganho b_v .

Na Figura 4.21 estão exemplificadas algumas trajetórias obtidas com a modulação da frequência angular para diferentes razões K_r .

Conforme o exemplo, para um $K_r = 2$ obtém-se uma redução de 28% na velocidade de aproximação \dot{z}_f^h na região de contato. Com $K_r = 4$ obtém-se uma redução de 35% e com $K_r = 16$ (não exemplificado na Figura 4.21) uma redução de 39%. Se o aumento do ganho for continuado, se perceberá que a redução da velocidade de aproximação tenderá a um limite diferente de zero, enquanto que a velocidade na região segura tenderá para o infinito. Logo, o projetista deve especificar de forma parcimoniosa as velocidades de modo que uma velocidade de aproximação não exija torques elevados nas juntas para o rastreamento das velocidades na região segura.

Esta relação inversa entre as velocidades provém do fato de que a fase de balanço possui um período fixo que, independentemente da modulação da velocidade, deve ser respeitado.

Velocidades de aproximação menores com menores velocidades na região segura podem ser alcançadas com a utilização de funções de modulação obtidas a partir de regiões assimétricas (aumentando a região segura e reduzindo a incerta) ou de múltiplas regiões.

Comentário 4.2 *O uso deste tipo de modulação é interessante mesmo nos casos em que existe o mapeamento ou a estimação da superfície do terreno. Dependendo da dinâmica de movimentação do robô, os erros de estimação*

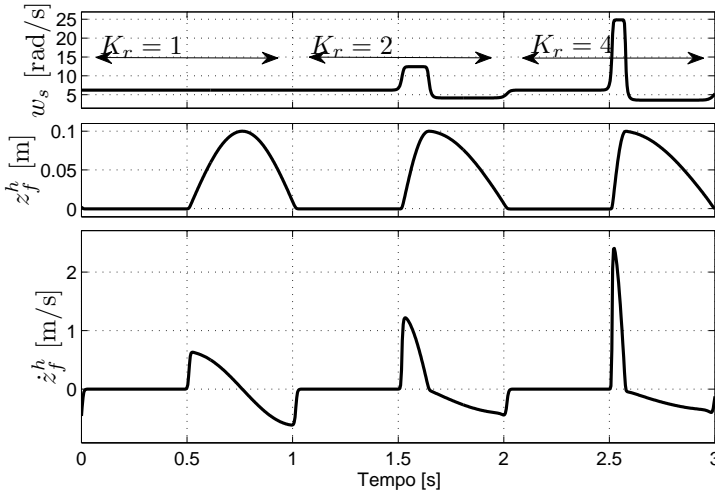


Figura 4.21: Forma das trajetórias geradas com a modulação da frequência angular para diferentes razões de velocidade K_r . Para as funções de transição, utiliza-se $b_v = 200$.

ou de mapeamento da superfície podem ser consideráveis e podem conduzir a forças de contato indesejáveis.

4.3 Bloco de Ajuste Cinemático

O bloco de ajuste cinemático⁴ é responsável por transformar as referências geradas no sistema de coordenadas horizontal para o sistema de coordenadas da base.

A grande peculiaridade do bloco de ajuste cinemático está na transformação de coordenadas que envolve as variáveis correntes relacionadas à arfagem e à rolagem do robô, ou seja, aos ângulos ϕ_b e θ_b e suas derivadas temporais.

As trajetórias de referência para cada pata são transformadas para o sistema de coordenadas da base através da matriz de rotação $R_{kadj}(\phi_b, \theta_b)$. Estas transformações, as quais constituem o chamado ajuste cinemático, são

⁴O bloco de ajuste cinemático foi introduzido na Seção 3.2.2 e está ilustrado na Figura 3.3

descritas como a seguir:

$$X_f^b = R_{kadj}(\phi_b, \theta_b) X_f^b \quad (4.57)$$

$$\dot{X}_f^b = \dot{R}_{kadj}(\phi_b, \theta_b) X_f^b + R_{kadj}(\phi_b, \theta_b) \dot{X}_f^b \quad (4.58)$$

$$\ddot{X}_f^b = \ddot{R}_{kadj}(\phi_b, \theta_b) X_f^b + 2\dot{R}_{kadj}(\phi_b, \theta_b) \dot{X}_f^b + R_{kadj}(\phi_b, \theta_b) \ddot{X}_f^b \quad (4.59)$$

nas quais a matriz de rotação $R_{kadj}(\phi_b, \theta_b)$ é definida como:

$$R_{kadj}(\phi_b, \theta_b) = \begin{bmatrix} \cos(\psi_b)\cos(\theta_b) & 0 & -\text{sen}(\theta_b) \\ \text{sen}(\theta_b)\text{sen}(\phi_b) & \cos(\phi_b) & \cos(\theta_b)\text{sen}(\phi_b) \\ \cos(\phi_b)\text{sen}(\theta_b) & -\text{sen}(\phi_b) & \cos(\theta_b)\cos(\phi_b) \end{bmatrix} \quad (4.60)$$

Conforme já descrito na Seção 3.2.2, a importância do ajuste cinemático para o sistema de controle reativo vai além uma transformação de referências entre dois sistemas de coordenadas. O ajuste cinemático é responsável por possibilitar o desacoplamento entre o controle de postura do dorso e o controle de posição das patas. Diz-se possibilitar o desacoplamento por que o desacoplamento efetivo depende da capacidade do controlador das juntas em seguir as referências cinemáticas.

Para compreender melhor o efeito do ajuste cinemático, considere a existência de um seguimento de referências perfeito por parte do controlador de juntas. O seguimento perfeito implica que as posições de cada pata no SCH, e por consequência no sistema de coordenadas do mundo, permanecem imóveis para os movimentos de rolagem e arfagem do robô. Esta independência gera um efeito particular, aqui chamado de *efeito de pivotamento do dorso*. O efeito de pivotamento está ilustrado na Figura 4.22.

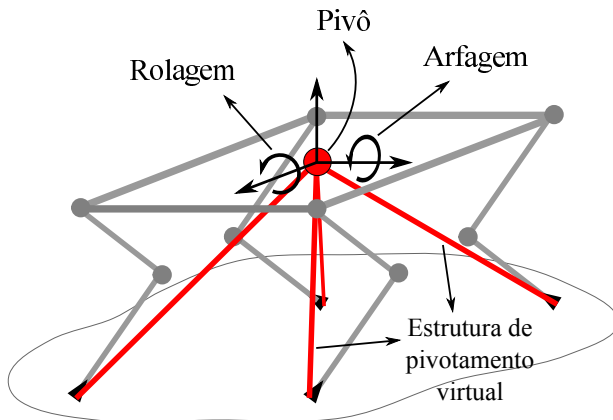


Figura 4.22: Efeito de pivotamento causado pelo ajuste cinemático. O dorso pode realizar movimentos livres de arfagem e rolagem em torno do pivô (localizado na origem do SCB).

Em torno de um pivô, virtualmente criado pelos pontos de apoio das patas, os movimentos de arfagem e rolagem do dorso podem ser executados livremente. Nesta situação, qualquer perturbação sobre a estrutura mecânica do robô levaria a movimentação do dorso.

Da mesma maneira, a movimentação do dorso também é dependente das forças de reação de cada pata com o solo. E, é através desta perspectiva que o controlador do dorso é desenvolvido para produção das forças de reação que controlarão a postura do dorso. Assim, a impedância do dorso pode ser determinada pelo controlador do dorso, independentemente da posição de cada pata, para movimentos de rolagem e arfagem.

O ajuste cinemático não descarta a impedância das pernas que é determinada pelo controlador das juntas. Tal impedância continua presente, porém, apenas se manifesta frente aos distúrbios que resultam em movimentos de translação do dorso.

Outro detalhe importante que envolve as impedâncias do dorso e das pernas é a limitação necessária da região de ajuste cinemático. Se o ajuste cinemático não for limitado à certos valores de rolagem e de arfagem, existe o risco das patas alcançarem o limite do seus espaços de trabalho, o que pode trazer danos a estrutura mecânica do robô (situação exemplificada na Figura 4.23). Os limites do ajuste cinemático criam as, aqui definidas, **regiões de impedância**.

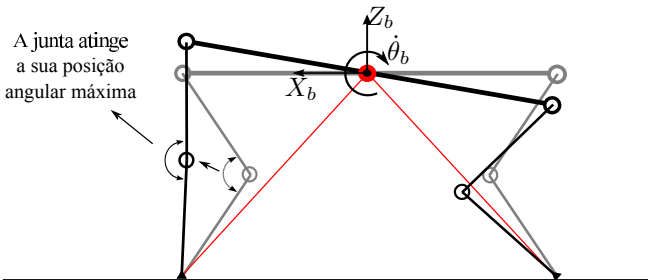


Figura 4.23: A falta de limites angulares para o ajuste cinemático pode fazer com que as juntas atinjam os seus valores máximos de posição, o que pode ser perigoso para a integridade mecânica do robô.

As regiões de impedância estão ilustradas na Figura 4.24, na qual considera-se que o ajuste cinemático é realizado apenas dentro dos intervalos angulares $\phi_b = [\phi_{b_{min}}, \phi_{b_{max}}]$ e $\theta_b = [\theta_{b_{min}}, \theta_{b_{max}}]$. A região azul na Figura 4.24 indica a região de variação de postura em que o ajuste cinemático é realizado. Nesta região, a impedância do dorso é determinada pelo controlador do dorso e o princípio de integração não-confitante é preservado. Na região vermelha o ajuste cinemático está saturado e a impedância do dorso e das pernas se misturam, os controladores do dorso e das juntas não mais partilham dos mesmos objetivos e a integração não-confitante entre controladores

é perdida. Apesar da perda da integração não-confitante, a saturação do ajuste cinemático é uma medida necessária para a preservação da integridade mecânica do robô.

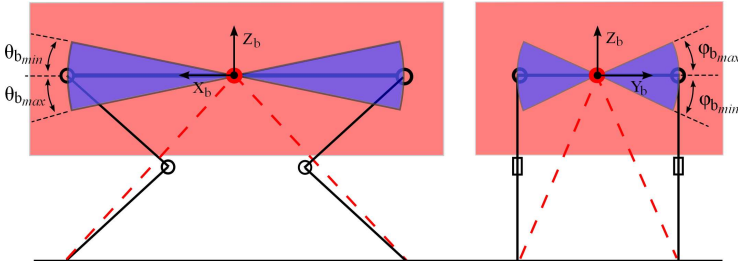


Figura 4.24: Regiões de impedância em função do efeito de pivotação e dos limites de ajuste cinemático. Na região azul translúcida a movimentação de rolagem e arfagem é determinada pelo controlador do dorso independentemente da posição de cada pata. Na região vermelho translúcida, os controladores do dorso e das juntas conflitam pelos seus objetivos

4.4 Bloco do Controlador das Juntas

Conforme já explanado na Seção 3.2.3, o bloco do controlador das juntas é responsável por fazer com que as pernas realizem o seus movimentos de acordo com o padrão de marcha gerado pelo bloco CPG.

Além disso, a estratégia implementada neste bloco define a impedância ou a complacência de cada membro. Por isso, este bloco está diretamente relacionado à robustez do caminhar e ao nível de esforço sofrido pela estrutura mecânica de cada perna do robô.

A estratégia de controle deste bloco pode ser realizada tanto em um espaço cartesiano quanto no espaço de juntas. Este detalhe depende dos critérios tomados pelo projetista e da conveniência do espaço em que as trajetórias de referência são geradas.

Nesta tese, a ação de controle implementada situa-se no espaço de juntas. Seria mais conveniente implementar tal controlador no espaço de tarefa, uma vez que as trajetória são geradas diretamente neste espaço. No entanto, por questões relacionadas a plataforma de estudos utilizada para a realização de experimentos⁵), optou-se pela implementação da estratégia de controle no espaço de juntas. Devido a esta escolha, um pequeno bloco de cinemática inversa teve que ser adicionado após o bloco de ajuste cinemático.

⁵A plataforma de estudos é o robô *HyQ*, descrito no Capítulo 6

A estratégia de controle implementada nesta tese é baseada no modelo dinâmico de corpo rígido já descrito na Seção 2.4.3. No entanto, apenas as equações do modelo relacionadas as quatro pernas são utilizadas para a realização do controle. Assim, o controle de cada perna é realizado com base no seguinte modelo dinâmico:

$$M_i(q_{ri})\ddot{q}_{ri} + h_i(q, \dot{q}) = \tau_{ri} + J_{C_i}^T(q_{ri}, x_b)\lambda_i \quad i = 1, \dots, 4 \quad (4.61)$$

em que o índice i faz referência à i -ésima perna, a qual possui um número n de juntas. A matriz $M_i(q_{ri}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ é a matriz de inércia associada à perna i ; o vetor $h_i(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ representa o vetor de forças centrífugas, de Coriolis e de gravidade; o vetor $\tau_{ri} \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ é o vetor de torques da perna i ; as forças de reação do solo são representadas pelo vetor $\lambda_i \in \mathbb{R}^{1 \times 3}$ e $J_{C_i}(q_{ri}, x_b) \in \mathbb{R}^{n \times 3}$ é o Jacobiano de restrições associado a perna i .

Comentário 4.3 *É importante chamar a atenção ao fato de que o modelo não considera apenas os elementos físicos associados a perna i . Observe que, apesar do modelo ser tomado em partes, os efeitos centrífugos e de Coriolis oriundos do movimento do dorso e dos outros membros também estão contabilizados no vetor $h_i(q, \dot{q})$.*

Tendo por base o modelo descrito na Equação (4.61), a ação de controle utilizada para o seguimento das referências cinemáticas é dado por:

$$\tau_{ci} = M_i(q_{ri})\ddot{q}_{ri}^d + h_i(q, \dot{q}) + K_{D_i}(\dot{q}_{ri}^d - \dot{q}_{ri}) + K_{P_i}(q_{ri}^d - q_{ri}) \quad (4.62)$$

em que o sobre-índice d denota a referência cinemática e $K_{D_i} \in \mathbb{R}^{j \times j}$ e $K_{P_i} \in \mathbb{R}^{j \times j}$ são matrizes de ganho diagonais definidas positivas.

Esta ação de controle compensa as forças centrífugas, de Coriolis e de gravidade resultando na seguinte dinâmica de malha fechada:

$$M_i(q_{ri})\ddot{\tilde{q}}_{ri} + K_{D_i}\dot{\tilde{q}}_{ri} + K_{P_i}\tilde{q}_{ri} = J_{C_i}^T(q_{ri}, x_b)\lambda_i \quad (4.63)$$

em que $\tilde{q}_{ri} = q_{ri}^d - q_{ri}$ é o vetor de erro de posição associado à perna i .

Na ausência de forças externas sobre a pata o vetor λ_i é igual a zero e a dinâmica de \tilde{q}_{ri} se torna assintoticamente estável. Na presença de forças externas ($\lambda_i \neq 0$) a estabilidade dependerá da dinâmica de interação entre a pata e o outro objeto. Porém, para materiais cujo modelo de interação pode ser representado por um sistema massa-mola-amortecedor linear ou não-linear [98], como é o caso dos terrenos naturais, pode-se verificar que a estabilidade em malha fechada é preservada mesmo com $\lambda_i \neq 0$.

Por fim, os valores de K_{D_i} e K_{P_i} são definidos através de uma parcimônia entre a impedância desejada para a perna i e o nível do erro de seguimento de referência. Os valores de K_{D_i} definem o amortecimento das juntas e o valores de K_{P_i} definem a rigidez das juntas da perna i .

4.5 Síntese do Capítulo

As primeiras seções deste capítulo descreveram e exemplificaram algumas das dificuldades encontradas nas abordagens de geração de referências cinemáticas baseadas em CPG's. Expostos os inconvenientes da abordagem via CPG tradicional, propôs-se um método de geração de referências baseado na ideia de CPG's, porém, com o paradigma de geração localizado no espaço da tarefa.

O método de geração proposto, denominado TCPG, é utilizado para compor o bloco de geração de referências cinemáticas do Sistema de Controle Reativo. Com a utilização do TCPG para a composição do bloco de geração de referências cinemáticas, as seguintes capacidades são obtidas:

- modulação independente dos parâmetros do caminhar, como: a altura do passo, o comprimento do passo, a frequência do passo, o fator cíclico e o padrão de marcha;
- as trajetórias geradas podem ser adaptadas de modo a melhor se adequarem à superfície do terreno (caso a superfície do terreno seja irregular);
- geração de deslocamento omnidirecional com satisfação de restrições de movimento para as patas em fase de suporte.

O bloco de ajuste cinemático permite desacoplar o controle de posição das patas e o controle de postura do dorso. O ajuste cinemático causa um efeito de pivotamento virtual em que o dorso pode mover-se livremente com relação aos movimentos de rolagem e arfagem. A saturação do ajuste cinemático resulta nas regiões de impedância, as quais definem as regiões onde o dorso e as pernas preservam o seu comportamento de resposta pré-definido pela respectiva estratégia de controle utilizada.

Por fim, descreveu-se a estratégia de controle utilizada para o controle de posição das juntas.

A união dos três blocos provê uma geração e execução de trajetórias para as patas que permite:

- evitar geração de forças internas indesejáveis entre as pernas, reduzindo o escorregamento e a perda de energia;
- reduzir os distúrbios aplicados ao dorso que são ocasionados por erros na estimação de estados, evitando forças de reação do solo excessivas;
- aumentar a robustez da locomoção com respeito a irregularidades do terreno inesperadas, evitando forças de reação do solo excessivas.

Capítulo 5

Controle do Movimento

O grande bloco de controle de movimento é responsável por manter a estabilidade da locomoção quando as trajetórias das patas não são geradas de modo a se adequarem perfeitamente a superfície na qual o robô se desloca; quando existe erro de seguimento de trajetórias por parte do controlador de posição das juntas; quando existe imprecisão na estimação de estados relacionados ao ambiente ou ao próprio robô; e quando o robô sofre distúrbios externos. Para manter o equilíbrio do robô frente a todos estes possíveis problemas, a tarefa do controle de movimento é composta basicamente por dois blocos: o *controlador do dorso* e o *controlador de distúrbios*. Cada um destes controladores conduzem a efeitos similares, porém, com características bastante distintas que se complementam ao longo do ciclo de um passo do robô. O controlador do dorso é associado a ações tomadas durante a fase de suporte e o controlador de distúrbio é associado a ações tomadas durante a fase de balanço da perna.

Para compor o bloco do controlador do dorso diversas abordagens, como as citadas no Capítulo 2, podem ser utilizadas. Nesta tese, a estratégia utilizada para o controle do dorso se assemelha ao controle baseado em modelo virtual [2]. A diferença encontra-se na adaptação ao sistema de coordenadas horizontal e na proposta de diferentes soluções para as relações entre as forças generalizadas do dorso e o torque nas juntas.

Em geral, a maioria das abordagens que envolvem o controle de postura estão baseadas em matrizes jacobianas que descrevem a relação entre as velocidades lineares e angulares do dorso e as velocidades nas juntas. Para obtenção da matriz Jacobiana, nestas estratégias assume-se que a movimentação de cada pata em fase de suporte está naturalmente restrita pelas forças de atrito da superfície. Ao longo dos estudos bibliográficos, não foram encontrados trabalhos que relatam as consequências da violação da restrição natural das patas. Neste Capítulo, as abordagens propostas para obtenção dos torques nas juntas são apresentadas e analisadas frente a situações de

cunho estático e de cunho dinâmico com violação da premissa da restrição natural.

Com respeito ao controlador de distúrbios, existem inúmeros trabalhos que tratam da rejeição de distúrbios na área de robôs bípedes. Por outro lado, durante a revisão bibliográfica foram encontrados apenas duas publicações de trabalhos relacionados a rejeição de distúrbios para robôs quadrúpedes.

Em [23], um trabalho envolvendo controle de postura e rejeição de distúrbios é apresentado, porém, os resultados são obtidos aproximando o modelo dinâmico do robô quadrúpede a um modelo de pêndulo invertido. Neste trabalho, as soluções para a rejeição de distúrbios laterais e frontais não são independentes. Além disso, não contempla a rejeição de distúrbios de rotação.

Uma solução que contempla a rejeição de distúrbios laterais e de guinada, com base em um modelo simplificado do robô quadrúpede é apresentado em [6]. As soluções apresentadas neste trabalho, foram as primeiras obtidas no decorrer do desenvolvimento do controlador de distúrbio desta tese e não contemplam a rejeição de distúrbio frontal. Por isso, a seção deste capítulo que descreve o controlador de distúrbios contém uma das principais contribuições da tese por apresentar um controlador de distúrbio para o controle do movimento que permite rejeitar distúrbios translacionais e de guinada.

A seguir, o controlador do dorso e o controlador de distúrbios serão descritos em detalhes. O capítulo é finalizado com a descrição do bloco de estimador de estados utilizado para a estimação das velocidades translacionais do dorso.

5.1 Controlador do Dorso

O propósito deste bloco de controle é prover o comando para as juntas que resulta na aplicação de certas forças sobre o dorso do robô, por exemplo, de forças que corrijam a atitude do robô. A fundamentação do algoritmo reside na computação de uma matriz Jacobiana que fornece a velocidade das patas em função das velocidades das juntas e das velocidades da base fluante [95].

Uma vez calculada a matriz Jacobiana, utiliza-se o espaço gerado por ela para obtenção das relações entre as forças generalizadas aplicadas sobre a base e os torques nas juntas. Neste caso, consideram-se as forças generalizadas como as ações de controle e os torques nas juntas como a saída do controlador que é enviada como comando para as juntas.

O vetor de forças generalizadas desejadas para o dorso é denominado por:

$$\Upsilon_{h_{des}} = [F_{b_x}^d \ F_{b_y}^d \ F_{b_z}^d \ M_{b_x}^d \ M_{b_y}^d \ M_{b_z}^d]^T \quad (5.1)$$

em que as componentes F_b^d 's são as forças desejadas sobre o dorso e as componentes M_b^d 's são os momentos desejados sobre o dorso. O vetor de forças

generalizadas é composto por forças e momentos em relação aos eixos do sistema de coordenadas horizontal.

As forças e momentos desejados são determinados em função das ações de controle sobre o dorso. Nesta tese, as forças e momentos desejados são determinados pelas seguintes ações de controle:

$$F_{b_x}^d = K_{dx}(\dot{x}_b^d - \dot{x}_b) \quad (5.2)$$

$$F_{b_y}^d = K_{dy}(\dot{y}_b^d - \dot{y}_b) \quad (5.3)$$

$$F_{b_z}^d = K_{pz}(z_b^d - \hat{z}_b) + K_{dz}(z_b^d - \dot{z}_b) \quad (5.4)$$

$$M_{b_x}^d = K_{p\phi}(\phi_b^d - \phi_b) + K_{d\phi}(\dot{\phi}_b^d - \dot{\phi}_b) \quad (5.5)$$

$$M_{b_y}^d = K_{p\theta}(\theta_b^d - \theta_b) + K_{d\theta}(\dot{\theta}_b^d - \dot{\theta}_b) \quad (5.6)$$

$$M_{b_z}^d = K_{d\psi}(\dot{\psi}_b^d - \dot{\psi}_b) \quad (5.7)$$

em que K_p 's são ganhos proporcionais e K_d 's são ganhos derivativos associados aos erros de postura e de movimentação angular e linear do robô, respectivamente. A variável \hat{z}_b representa uma altura estimada do robô com relação à superfície na qual o robô se desloca. O algoritmo que estima a altura do dorso não é descrito nesta tese.

Comentário 5.1 *Esta ação proporcional sobre o erro de altura é utilizada quando a ação adaptativa do grande bloco da geração de movimento (rever Seções 4.1.10 e 4.2) está ativada. Quando a superfície é plana e regular esta ação de controle sobre a altura não é necessária, pois a geração de trajetórias adaptativas pelo bloco de geração de padrões não necessita ser ativada.*

A seguir são apresentadas duas abordagens para obter o mapeamento entre as forças generalizadas sobre a base e os torques nas juntas.

5.1.1 Controlador Baseado em Projeção de Espaço Nulo

A fundamentação deste algoritmo reside na computação da matriz Jacobiana que relaciona a velocidade das patas com a velocidade das juntas e as velocidades angulares e lineares do sistema de coordenadas da base. Tal Jacobiano é obtido pela diferenciação das relações da cinemática direta de cada pata, as quais são expressas em um sistema de coordenadas horizontal de tipo fixo. A Figura 5.1 auxilia na compreensão da cinemática direta de cada pata.

A formulação deste algoritmo de controle de postura utiliza as seguintes definições:

- $q_{r_i} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$: vetor de posição das juntas da perna i (n é o número de juntas por perna);
- $\Phi_b \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$: vetor de ângulos de orientação do SCB (rolagem, arfagem e guinada), com respeito ao SCH tipo fixo (a guinada é sempre 0);

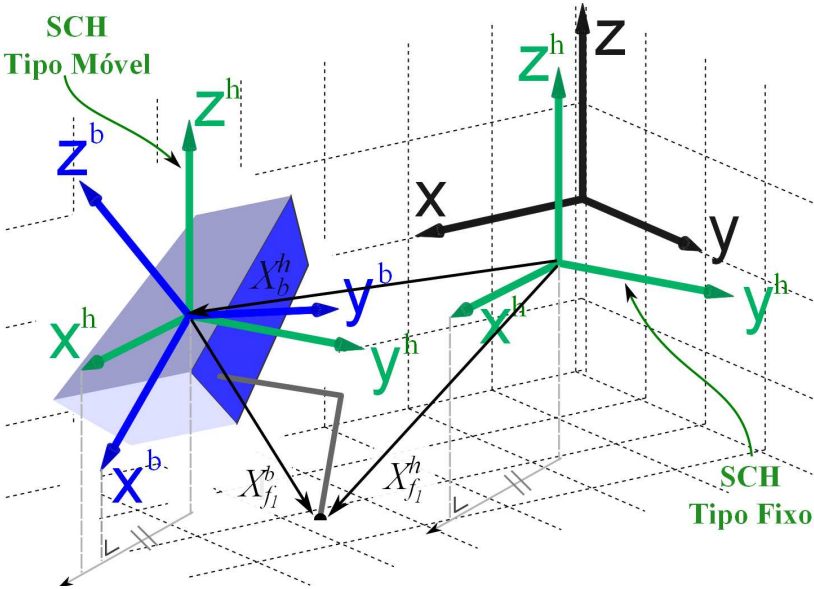


Figura 5.1: Ilustração dos vetores envolvidos na formulação da matriz Jacobiana J_H . O vetor X_b^h representa a posição do SCB com respeito ao SCH do tipo fixo; o vetor $X_{f_i}^b$ representa a posição da pata i com respeito ao SCB; e o vetor $X_{f_i}^h$ representa a posição da pata i com respeito ao SCH do tipo fixo.

- $R_b^h(\Phi_b)$: matriz de rotação do SCB para o SCH tipo fixo;
- $X_{f_i}^b \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$: vetor de posição da pata i no SCB (o qual pode ser escrito como $k(q_{r_i})$, em que $k(\cdot)$ é a função de cinemática direta);
- $J_b(q_{r_i}) \in \mathbb{R}^{3 \times n}$: Jacobiano que relaciona a velocidade da pata i no SCB com a velocidade das juntas da perna i . Por simplicidade, $J_b(q_{r_i})$ é escrita como J_{b_i} ;
- $X_{f_i}^h \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$: posição da pata i descrita no SCH;
- $X_b^h \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$: posição do SCB descrita no SCH.

A posição de cada pata i do robô pode ser descrita no SCH como:

$$X_{f_i}^h = X_b^h + R_b^h X_{f_i}^b \quad (5.8)$$

Diferenciando a Equação (5.8) com respeito ao tempo, tem-se:

$$\dot{X}_{f_i}^h = \dot{X}_b^h + \dot{R}_b^h X_{f_i}^b + R_b^h \dot{X}_{f_i}^b \quad (5.9)$$

$$\dot{X}_{f_i}^h = \dot{X}_b^h + \frac{\partial R_b^h}{\partial \Phi_b} \dot{\Phi}_b k(q_{r_i}) + R_b^h J_{b_i} \dot{q}_{r_i} \quad (5.10)$$

$$\dot{X}_{f_i}^h = [R_b^h J_{b_i} \quad I \quad M(\Phi_b, q_{r_i})] [\dot{q}_{r_i}^T \quad (\dot{X}_b^h)^T \quad \dot{\Phi}_b^T]^T \quad (5.11)$$

$$\dot{X}_{f_i}^h = J_{h_i}(\Phi_b, q_{r_i}) [\dot{q}_{r_i}^T \quad \dot{X}_b^h \quad \dot{\Phi}_b^T]^T \quad (5.12)$$

O Jacobiano utilizado para o controle do dorso ($(J_H(\Phi_b, q_r))$, ou simplesmente J_H) é construído pelo empilhamento somente dos Jacobianos J_{h_i} associados as pernas em fase de suporte, por isso, o número de colunas de J_H é variante. Se considerado um robô quadrúpede com todas as pernas em fase de suporte tem-se $J_H \in \mathfrak{R}^{12 \times (4n+6)}$. A estrutura de J_H pode ser descrita como:

$$\underbrace{[\dot{X}_{f_1}^T \dots \dot{X}_{f_j}^T]^T}_{\dot{X}_f^h} = J_H(\Phi_b, q_r) \underbrace{[\dot{q}_{r_1}^T \dots \dot{q}_{r_j}^T \quad \dot{X}_b^h \quad \dot{\Phi}_b^T]^T}_{\dot{q}_h} \quad (5.13)$$

em que j é o número de pernas em fase de suporte.

O usuário ou uma tarefa de controle de mais alto nível definem o vetor de forças e momentos $\Upsilon_{h_{des}} \in \mathfrak{R}^{(jn+6) \times 1}$ a serem aplicados sobre o tronco. Um exemplo típico são forças aplicadas sobre o tronco para compensar um erro de postura.

Dado um vetor de forças e momentos desejados a ideia é então mapear este vetor para um vetor de torque de comando $\tau_{tc} \in \mathfrak{R}^{n \times 1}$ para as juntas, tentando não mover a posição das patas no sistema de coordenadas horizontal. Para isso, tais torques são obtidos através da projeção do vetor de momentos e forças desejadas $\Upsilon_{h_{des}}$ no espaço nulo de J_H^T [93]:

$$\tau_{tc} = S(I - J_H^T J_H^{+T}) \Upsilon_{h_{des}} \quad (5.14)$$

em que $S \in \mathfrak{R}^{nj \times (nj+6)}$ é matriz de seleção que preserva somente os torques associados as juntas atuadas.

A matriz J_H^+ na Equação (5.14) é a inversa generalizada de J_H à direita:

$$J_H^+ = W^{-1} J_H^T (J_H W^{-1} J_H^T)^{-1} \quad (5.15)$$

Na abordagem proposta nesta tese, seleciona-se uma matriz de ponderação $W \in \mathfrak{R}^{(jn+6) \times (jn+6)}$ que resulta na minimização das forças e momentos da base flutuante para um uso mais efetivo das juntas atuadas.

5.1.2 Controlador Baseado na Restrição de Movimentos

Este controlador fundamenta-se no fato de que as patas em fase de suporte estão naturalmente submetidas a restrições de movimento com relação

ao sistema de coordenadas horizontal. Considerando um contato pontual, as patas em fase de suporte podem realizar apenas movimentos de rotação. Ou seja, a velocidade translacional de cada pata em fase de suporte é considerada igual a zero para o sistema de coordenadas horizontal. O Jacobiano que mapeia as forças generalizadas sobre o dorso e os torques nas juntas é extraído com base nesta premissa.

Sendo assim, considerando a Equação (5.9) e o fato de que a velocidade translacional das patas em fase de suporte é igual a zero, obtém-se:

$$\dot{X}_{f_i}^h = \dot{X}_b^h + \dot{R}_b^h X_{f_i}^b + R_b^h \dot{X}_{f_i}^b = 0 \quad (5.16)$$

$$\dot{X}_b^h + \frac{\partial R_b^h}{\partial \Phi_b} \dot{\Phi}_b k(q_{r_i}) = -R_b^h J_{b_i} \dot{q}_{r_i} \quad (5.17)$$

$$[I \quad M(\Phi_b, q_{r_i})][\dot{X}_b^{hT} \quad \dot{\Phi}_b^T]^T = -R_b^h J_{b_i} \dot{q}_{r_i} \quad (5.18)$$

$$J_c[\dot{X}_b^{hT} \quad \dot{\Phi}_b^T]^T = -R_b^h J_{b_i} \dot{q}_{r_i} \quad (5.19)$$

A partir da Equação (5.19), existem dois passos que podem ser seguidos e que levam à soluções diversas. A primeira solução toma a inversa generalizada de J_c para obtenção do Jacobiano final e obedece uma sequência tradicional dos passos matemáticos nesta situação, ou seja:

$$J_c[\dot{X}_b^{hT} \quad \dot{\Phi}_b^T]^T = -R_b^h J_{b_i} \dot{q}_{r_i} \quad (5.20)$$

$$[\dot{X}_b^{hT} \quad \dot{\Phi}_b^T]^T = -J_c^+ R_b^h J_{b_i} \dot{q}_{r_i} \quad (5.21)$$

$$[\dot{X}_b^{hT} \quad \dot{\Phi}_b^T]^T = J_{CM} \dot{q}_{r_i} \quad (5.22)$$

$$\dot{q}_b^h = J_{CM} \dot{q}_{r_i} \quad (5.23)$$

em que \dot{q}_b^h é o vetor de velocidades do SCB com relação ao SCH e $J_{CM} = -J_c^+ R_b^h J_{b_i}$ é o Jacobiano de restrições.

Com isso, o vetor de torque nas juntas que levam às forças generalizadas desejadas sobre o dorso é obtido como:

$$\tau_{tc} = J_{CM}^T \Upsilon_{h_{des}} \quad (5.24)$$

A segunda solução para relação entre os torques nas juntas e as forças generalizadas é obtida por meio da pré-multiplicação da Equação (5.19) pela inversa generalizada do termo $R_b^h J_{b_i}$. Este passo é realizado da seguinte

forma:

$$J_c[\dot{X}_b^{hT} \quad \dot{\Phi}_b^{T}]^T = -R_b^h J_{b_i} \dot{q}_{r_i} \quad (5.25)$$

$$(R_b^h J_{b_i})^+ J_c[\dot{X}_b^{hT} \quad \dot{\Phi}_b^{T}]^T = -(R_b^h J_{b_i})^+ R_b^h J_{b_i} \dot{q}_{r_i} \quad (5.26)$$

$$J_{c'}[\dot{X}_b^{hT} \quad \dot{\Phi}_b^{T}]^T = -\dot{q}_{r_i} \quad (5.27)$$

$$[\dot{X}_b^{hT} \quad \dot{\Phi}_b^{T}]^T = -J_{c'}^+ \dot{q}_{r_i} \quad (5.28)$$

$$[\dot{X}_b^{hT} \quad \dot{\Phi}_b^{T}]^T = J_{CM'} \dot{q}_{r_i} \quad (5.29)$$

$$\dot{q}_b^h = J_{CM'} \dot{q}_{r_i} \quad (5.30)$$

em que \dot{q}_b^h é o vetor de velocidades do SCB com relação ao SCH, $J_{c'} = (R_b^h J_{b_i})^+ J_c$ e $J_{CM'} = -J_{c'}$ é o Jacobiano de restrições.

5.1.3 Diferenças na Aplicação das Estratégias de Controle

As duas formas de controlar o dorso apresentadas nas Seções 5.1.1 e 5.1.2 se resumem em um mapeamento entre as forças aplicadas sobre o dorso e o equivalente torque nas juntas de cada perna. Ambas as estratégias estão fundamentadas no resultado obtido pela inversão generalizada de matrizes. Em função das redundâncias dos Jacobianos envolvidos, cada abordagem apresenta uma solução distinta para a relação entre o torque nas juntas e as forças generalizadas sobre o dorso. Consequentemente, a resposta dinâmica do sistema é diferente para cada estratégia com uma mesma entrada de controle (mesmo vetor de forças generalizadas desejadas para o dorso).

Para uma discussão a cerca das diferenças verificadas durante os estudos da tese, a seguir serão apresentadas duas situações simuladas, uma situação estática e uma situação dinâmica, para a comparação das soluções dadas pelas Equações (5.14) e (5.23). As situações são simuladas utilizando o ambiente de simulação *SL Simulator* [88] e o modelo dinâmico do robô *HyQ* [90].

Situação Estática: considere que cada uma das estratégias é utilizada para obter os torques nas juntas que compensem a força peso do robô, ou seja, as forças gravitacionais. Nesta situação o robô possui referências angulares de posição para cada junta com o intuito de que o robô mantenha uma determinada postura. O controlador das juntas (presente no bloco de controle de movimento) gera os torques em cada junta de acordo com o resultado de uma ação proporcional-derivativa (PD) sobre os erros de posição. Devido à ação PD, haverá um erro de posição angular em cada junta se a ação da gravidade não for compensada. Para compensar a ação da gravidade através do controle de postura, o vetor de forças generalizadas desejadas para o dorso é escolhido de modo que exista uma força desejada $F_{b_z}^d = m_b g$ para o dorso com respeito ao eixo azimutal do SCH. Logo, o vetor das forças generalizadas

desejadas é escolhido como:

$$\Upsilon_{h_{des}} = [F_{b_x}^d \ F_{b_y}^d \ F_{b_z}^d \ M_{b_x}^d \ M_{b_y}^d \ M_{b_z}^d]^T \quad (5.31)$$

$$\Upsilon_{h_{des}} = [0 \ 0 \ m_b g \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (5.32)$$

Nesta primeira situação, a diferença que se deseja salientar está na orientação das forças de contato resultantes das força exercidas por cada pata sobre a superfície. A Figura 5.2 ilustra o robô na postura pré-escolhida e as forças de reação do solo geradas pelo controle de postura que é baseado na restrição de movimento das patas com solução dada pela Equação (5.24). A Figura 5.3, por sua vez, ilustra os mesmos detalhes para a aplicação do controle de postura que é baseado na projeção do espaço nulo.

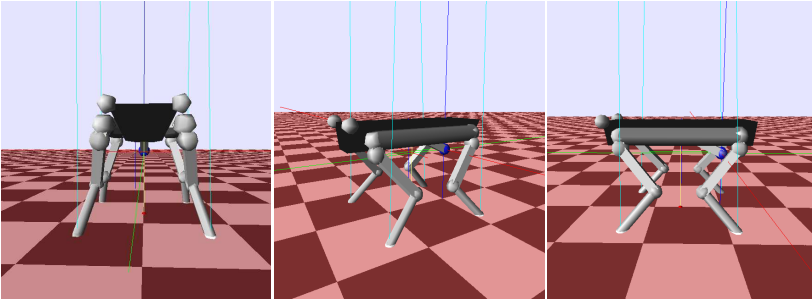


Figura 5.2: As linhas azuis que saem dos pontos de contato de cada pata com o solo representam o vetor das forças de reação. A utilização do Jacobiano baseado na restrição de movimento para o controle do dorso leva a geração de forças de reação ortogonais à superfície.

Ambas as estratégias de controle aplicam a força desejada sobre o dorso, porém, o conjunto solução de torques nas juntas para tal é diferente em cada estratégia. Observando as Figuras 5.2 e 5.3 é possível verificar que o controle de postura baseado na restrição de movimento tende a gerar forças de reação ortogonais a superfície. Esta é uma característica muito interessante se a superfície, sobre a qual o robô se desloca, é plana e possui coeficientes de atrito relativamente baixos. A pata de um robô sofre escorregamento em uma superfície quando as forças de reação extrapolam o chamado *Cone de Atrito*¹ [85], cuja abertura é diretamente proporcional aos coeficientes de atrito estático e dinâmico da superfície. Logo, a estratégia baseada na restrição de movimento é interessante para superfícies lisas porque gera automaticamente forças de reação que localizam-se no centro do cone de atrito.

¹O cone de atrito (do inglês *Friction Cone*) possui o vértice no ponto de contato, a parte mais larga - a abertura - é voltada para fora da superfície e a sua geometria é simétrica com relação ao eixo ortogonal à superfície

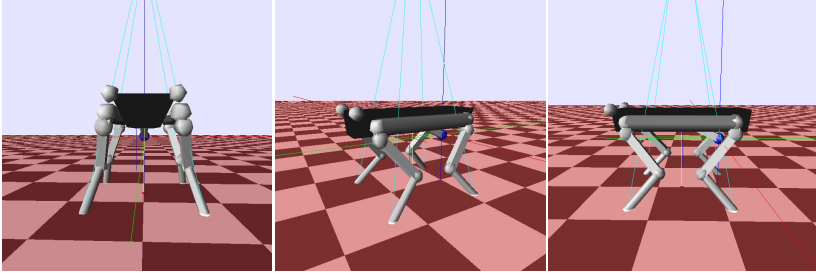


Figura 5.3: As linhas azuis que saem dos pontos de contato de cada pata com o solo representam o vetor das forças de reação. A utilização do Jacobiano baseado no espaço nulo compensa ação da gravidade ao mesmo tempo que preserva a orientação das forças de reação anteriormente geradas somente com a utilização do controlador PD.

Com respeito às forças de reação geradas pelo controle baseado em espaço nulo, estas tendem a preservar a mesma orientação dos vetores que são obtidos sem a compensação da gravidade, ou seja, que são obtidos somente pelos torques fornecidos pelos controladores PD de cada junta.

Situação Dinâmica: na situação dinâmica o robô encontra-se inicialmente nas condições da situação estática quando um movimento de salto é solicitado por um bloco hipotético de alto nível. Para isso, esta tarefa de alto nível envia ao controlador do dorso uma referência de força $F_{b_z}^d = F_{grav} + F_{salto}(t)$, em que F_{grav} é a compensação da gravidade já utilizada na situação estática e $F_{salto}(t)$ é um perfil de força que leva a um movimento de salto puramente vertical. O movimento resultante simulado para a aplicação da estratégia de controle baseada no espaço nulo está mostrado na Figura 5.4. Do mesmo modo, o resultado para a aplicação da estratégia baseada na restrição de movimento está mostrado na Figura 5.5.

Comparando os saltos das Figuras 5.4 e 5.5 verifica-se uma diferença substancial na orientação das forças de reação e, principalmente, no movimento das pernas após a perda de contato com o solo. Neste ponto, a diferença na orientação das forças de reação é uma característica já esperada devido à situação estática analisada anteriormente. Porém, na situação dinâmica, é a diferença no movimento realizado pelas pernas, após a perda de contato com a superfície, que evidencia a diferença entre as estratégias.

Para a estratégia baseada no espaço nulo, após a perda de contato com a superfície, as patas apresentam um movimento coerente que sucede no sentido oposto ao sentido da força desejada $F_{b_z}^d$. Ou seja, as patas tendem a se deslocar verticalmente para baixo no sentido negativo do eixo z do SCH.

Para a estratégia baseada na restrição de movimento, após a perda de contato com a superfície, as patas se movimentam com elevadas componentes de velocidade que são tangenciais à superfície. Estas componentes

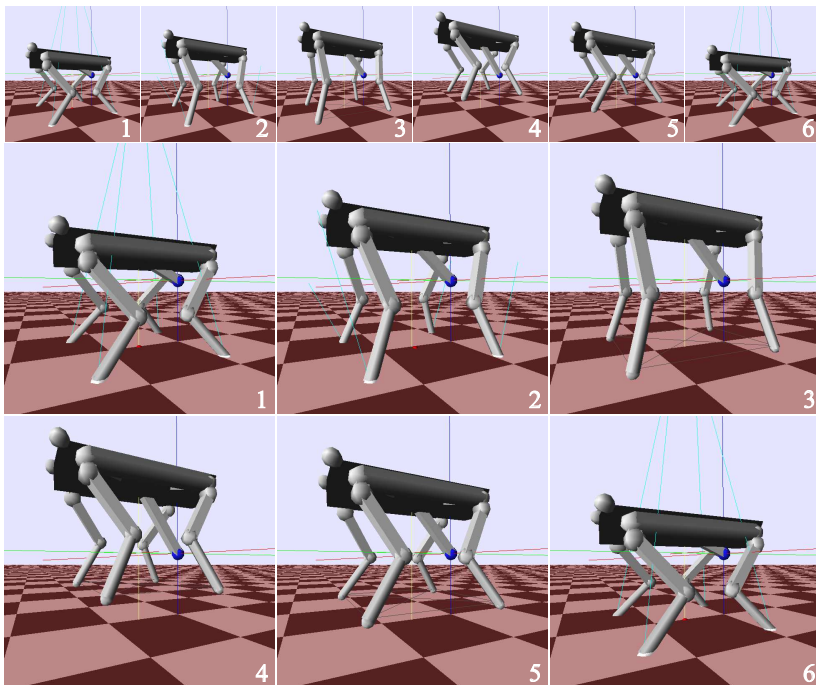


Figura 5.4: Sequência do movimento de salto realizado com a utilização do controle baseado em espaço nulo. As patas apresentam movimentação coerente, no sentido oposto da força desejada sobre o dorso, e permitem que o robô aterrisse com condições de manter a postura anterior ao salto.

fazem com que a pernas se retraiam e eventualmente possam se chocar. Esta retração, além de indesejada, dificulta uma aterrissagem correta e a retomada da postura inicial no caso do salto.

A situação dinâmica acima exemplificada auxilia na resposta de um questionamento muito importante: "Qual é o desempenho de cada estratégia frente à violação das considerações admitidas durante suas formulações?" Com respeito a este questionamento, o que se pode concluir, com o exemplo da situação dinâmica, é que estratégia baseada na restrição de movimento pode levar a comportamentos indesejáveis quando a consideração de restrição de movimento é violada.

Outra diferença entre as soluções de cada estratégia está na norma do vetor de torques para um mesmo vetor de forças generalizadas desejadas. Ao longo das análises numéricas e de simulação, percebeu-se que o vetor de torques fornecido pela estratégia baseada em espaço nulo apresenta norma menor que a estratégia baseada na restrição de movimento. Não foi possível

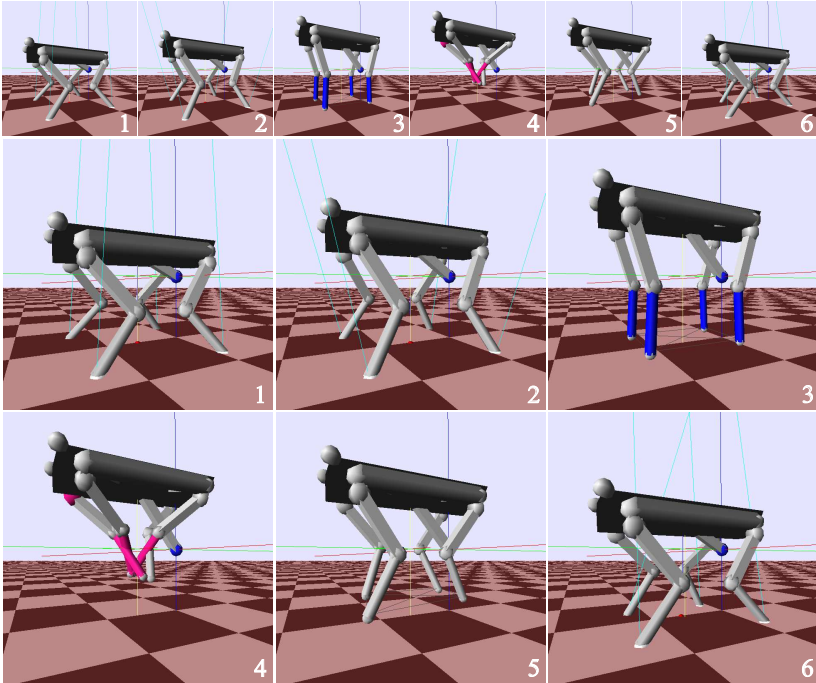


Figura 5.5: Sequência do movimento de salto realizado com a utilização do controle baseado na restrição de movimento. As patas apresentam movimentação indesejada com grandes componentes de velocidade ortogonais ao sentido da força desejada. Estas componentes conduzem ao choque entre as pernas e dificultam a manutenção da postura original após a aterrissagem.

verificar matematicamente esta característica, no entanto, realizou-se uma análise numérica a partir da variação do vetor de forças generalizadas. Nesta análise, o controle baseado em espaço nulo apresentou a menor norma para o vetor de torques para todos os vetores $\Upsilon_{h_{des}}$. Esta característica sugere que o controlador baseado em espaço nulo é mais interessante para aplicações que visam uma maior autonomia de deslocamento para o robô, ou seja, que visam a economia de energia.

Cada solução também afeta à dinâmica de locomoção de maneira diferente. Em simulações utilizando o padrão de marcha trote, verificou-se que soluções que resultam em forças de reação ortogonais à superfície excitam menos os movimentos oscilatórios de guinada (*swing* de guinada). Em um trote, *swings* de guinada são indesejáveis e podem ser reduzidos utilizando o

próprio controlador do dorso².

Apesar de explicitamente distintas as soluções matemáticas para o mapeamento entre torques nas juntas e forças generalizadas em cada estratégia, durante os estudos da tese o principal fator matemático que distingue cada solução foi identificado. Resumidamente, a solução baseada em espaço nulo pode ser vista como a solução baseada na restrição de movimento da Equação (5.23) em que a solução da inversa generalizada possui uma matriz de ponderação S_w . Tal matriz de ponderação é dada por:

$$S_w = J_l^T J_l \quad (5.33)$$

em que J_l é uma matriz composta por blocos diagonais de Jacobianos J_{b_i} 's relativos às pernas em fase de suporte. Esta componente de ponderação também está presente na solução baseada na restrição de movimento dada pela Equação (5.30). Simulações das situações estática e dinâmica para a solução da Equação (5.30) foram realizadas e os resultados obtidos se aproximam dos resultados encontrados para a solução baseada em espaço nulo.

Comentário 5.2 *Este é um resultado que leva a um questionamento sobre a utilização de uma matriz de ponderação com ponderações baseadas nas características estruturais do robô. Diferentemente de uma matriz de ponderação tradicional, a matriz do tipo S_w possui elementos $s_{ij} = s_{ji} \neq 0$ e varia de acordo com a postura do robô. A compreensão do relacionamento entre os elementos de S_w e os efeitos da solução obtida constitui um tópico de estudo em aberto.*

Os resultados obtidos com as situações estática e dinâmica, nas quais cada solução apresenta vantagens e desvantagens sobre a outra, sugerem que a estratégia para o bloco do controlador do dorso seja feita com base em uma ação de controle mista que explore as vantagens de cada solução. Por exemplo, uma ação de controle em que a solução baseada na restrição de movimento é utilizada para a compensação da gravidade e a solução baseada no espaço nulo é utilizada para a correção da postura e da movimentação do dorso. Contudo, um estudo para o desenvolvimento de uma ação de controle mista não foi realizado e permanece como um tópico em aberto.

Nesta tese, a solução baseada em espaço nulo foi escolhida para o bloco do controlador de distúrbio por fornecer um vetor de torques com menor norma e devido aos resultados obtidos frente à perda de contato da pata com a superfície.

²O *swing* de guinada pode ser reduzido definindo um momento desejado $M_{b_z}^d$ (ver Equação (5.31)) a partir de uma ação de amortecimento sobre a velocidade angular do dorso $\dot{\psi}_b$.

5.2 Controlador de Distúrbios

O propósito do algoritmo deste controlador é reduzir o efeito dos distúrbios que levam a movimentos de rotação e translação indesejáveis para o dorso. A ideia central é encontrar os pontos de apoio para cada pata que naturalmente neutralizam os distúrbios, conduzindo o robô à parada ou ao movimento desejado.

A análise é inspirada no conceito de *N-step capturability* descrito em [51]. Este conceito considera os estados e as ações que permitem a um sistema com pernas eventualmente ser conduzido a uma parada e provê uma métrica com relação a probabilidade do robô tombar. No caso desta tese, o interesse é encontrar os pontos de captura instantâneos (*instantaneous capture points*), que permitem que o robô pare ou corrija o seu movimento em um único passo.

Para a análise dos pontos de captura, faz-se o uso de um modelo linear do robô quadrúpede que considera duas pernas diagonais em fase de suporte. Este modelo permite estudar os pontos de captura instantâneos de acordo com as velocidades translacionais do dorso, ao longo dos eixos x e y do SCH, e do movimento de guinada. Este modelo, juntamente com a análise dos pontos de captura, também é considerado como uma das contribuições da tese.

O modelo proposto, ilustrado na Figura 5.6, é um modelo de robô quadrúpede descrito no SCH e simplificado pela consideração de pernas com massas desprezíveis e da inexistência dos movimentos de rolagem e arfagem. Os pontos de apoio são descritos como distâncias relativas Δp_j 's para cada quadril j .

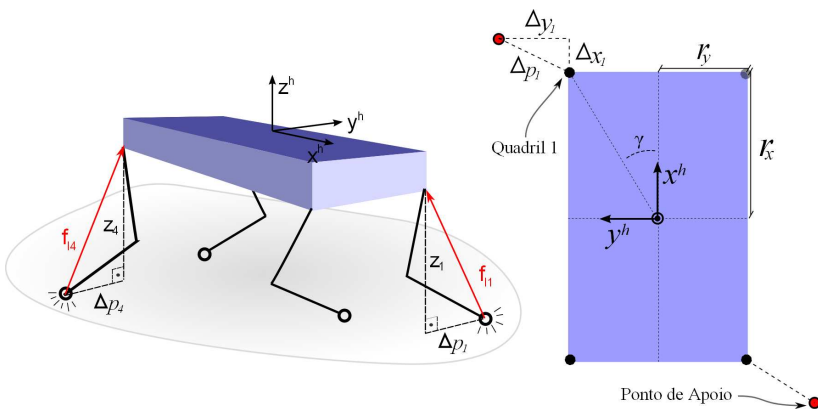


Figura 5.6: Modelo simplificado do robô considerando pernas com massas desprezíveis e fase de suporte com pontos de apoio diagonais. As setas vermelhas indicam as forças exercidas sobre o dorso pelas pernas em fase de suporte. À direita, vista superior com definições métricas.

As equações de movimento resultantes para este modelo simplificado são descritas como:

$$m_b \ddot{x}_b = -f_{l1} \frac{\Delta x_1}{l_1} - f_{l4} \frac{\Delta x_4}{l_4} \quad (5.34)$$

$$m_b \ddot{y}_b = -f_{l1} \frac{\Delta y_1}{l_1} - f_{l4} \frac{\Delta y_4}{l_4} \quad (5.35)$$

$$m_b \ddot{z}_b = f_{l1} \frac{z_1}{l_1} + f_{l4} \frac{z_4}{l_4} - m_b g \quad (5.36)$$

$$I_{b_x} \ddot{\phi}_b = r_y f_{l1} \frac{z_1}{l_1} - r_y f_{l4} \frac{z_4}{l_4} \quad (5.37)$$

$$I_{b_y} \ddot{\theta}_b = -r_x f_{l1} \frac{z_1}{l_1} + r_x f_{l4} \frac{z_4}{l_4} \quad (5.38)$$

$$I_{b_z} \ddot{\psi}_b = r_y f_{l1} \frac{\Delta x_1}{l_1} - r_x f_{l1} \frac{\Delta y_1}{l_1} - r_y f_{l4} \frac{\Delta x_4}{l_4} + r_x f_{l4} \frac{\Delta y_4}{l_4} \quad (5.39)$$

em que m_b é a massa do robô e I_{b_x} , I_{b_y} e I_{b_z} são as inércias rotacionais em torno dos eixos x_h , y_h , e z_h , respectivamente. A variável z_j é a posição da pata j com respeito ao eixo z_h e Δy_j é a posição relativa da pata j ao longo do eixo y_h entre o quadril j e a respectiva perna j (de modo análogo para Δx_j). A distância entre cada quadril j e o relativo ponto de contato é definido como l_j , g é a aceleração da gravidade e f_{lj} é a força de reação do solo sobre o quadril j . Os demais parâmetros encontram-se ilustrados na Figura 5.6.

Assumindo que a altura de cada quadril é mantida constante durante a fase de suporte das pernas (o que implica em $\dot{\theta}_b = \dot{\phi}_b = \dot{z}_b = 0$) e que o dorso assume postura em torno de $\phi_b = \theta_b = 0$, após manipulações matemáticas obtém-se o seguinte conjunto de equações lineares:

$$m_b \ddot{x}_b = -\frac{m_b g}{2} \left(\frac{\Delta x_1}{z_1} + \frac{\Delta x_4}{z_4} \right) \quad (5.40)$$

$$m_b \ddot{y}_b = -\frac{m_b g}{2} \left(\frac{\Delta y_1}{z_1} + \frac{\Delta y_4}{z_4} \right) \quad (5.41)$$

$$I_{b_z} \ddot{\psi}_b = \frac{m_b g}{2} \left(r_y \left(\frac{\Delta x_1}{z_1} - \frac{\Delta x_4}{z_4} \right) - r_x \left(\frac{\Delta y_1}{z_1} - \frac{\Delta y_4}{z_4} \right) \right) \quad (5.42)$$

Dado que as posições relativas Δx_1 , Δy_1 , Δx_4 e Δy_4 podem ser escolhidas durante a fase de balanço da perna, estas podem ser consideradas como entradas de controle. O problema então resume-se em encontrar uma solução para cada Δ , a partir das condições iniciais do sistema no início da fase de suporte, que leve a estabilização do sistema descrito pelas Equações (5.40)-(5.42).

Observando o sistema de equações (5.40)-(5.42), verifica-se que a tarefa de encontrar o valor de cada Δ constitui um problema com infinitas soluções, o que decorre do número de entradas de controle. Existem duas somas ($\Delta x_1/z_1 + \Delta x_4/z_4$ e $\Delta y_1/y_1 + \Delta y_4/y_4$) e duas diferenças ($\Delta x_1/z_1 - \Delta x_4/z_4$

e $\Delta y_1/y_1 - \Delta y_4/y_4$ utilizadas para controlar apenas três variáveis (x_b , y_b e ψ_b).

Para contornar este problema propõe-se a inclusão de uma função de restrição que restringe as soluções relativas a rejeição de distúrbios de guinada. Este passo matemático é obtido reescrevendo a Equação (5.42) em termos de duas outras equações:

$$I_{b_z} c_\gamma^2 \ddot{\psi}_b = \frac{r_x m_b g}{2} \left(\frac{\Delta y_4}{z_4} - \frac{\Delta y_1}{z_1} \right) \quad (5.43)$$

$$I_{b_z} s_\gamma^2 \ddot{\psi}_b = \frac{r_y m_b g}{2} \left(\frac{\Delta x_1}{z_1} - \frac{\Delta x_4}{z_4} \right) \quad (5.44)$$

de modo que a soma destas equações retorna à Equação (5.42). O símbolos c_γ e s_γ simplificam as nomenclaturas $\cos(\gamma)$ e $\sin(\gamma)$, respectivamente. O argumento γ das funções trigonométricas é um parâmetro da forma estrutural do robô, ilustrado na Figura 5.6.

A restrição permite obter um conjunto de soluções para os distúrbios de guinada que reside sobre retas tangentes aos quadris. Estas retas possuem orientação fixa no plano XY do SCH e estão ilustradas na Figura 5.7.

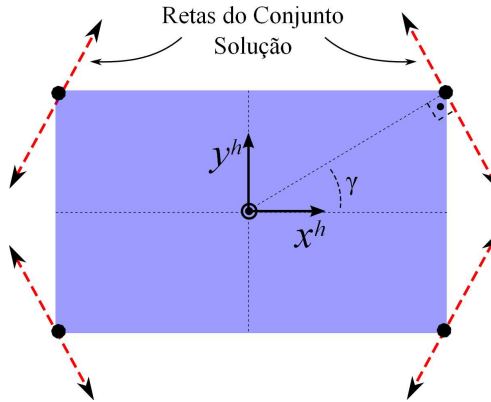


Figura 5.7: As linhas tracejadas, tangentes aos seus respectivos quadris, representam as soluções para o posicionamento das patas considerando somente os distúrbios de guinada. Na presença de distúrbios frontais e/ou laterais este conjunto de linhas tracejadas sofre translações em x^h e/ou y^h .

Manipulando o novo conjunto de equações, formado pelas Equações (5.40), (5.41), (5.43) e (5.44), obtém-se um sistema de equações que permite

melhor visualizar a solução para cada variável Δ , ou seja:

$$\ddot{x}_b - \frac{I_{b_z} s_\gamma^2}{m_b r_y} \ddot{\psi}_b = -\frac{g}{z_1} \Delta_{x_1} \quad (5.45)$$

$$\ddot{x}_b + \frac{I_{b_z} s_\gamma^2}{m_b r_y} \ddot{\psi}_b = -\frac{g}{z_4} \Delta_{x_4} \quad (5.46)$$

$$\ddot{y}_b + \frac{I_{b_z} c_\gamma^2}{m_b r_x} \ddot{\psi}_b = -\frac{g}{z_1} \Delta_{y_1} \quad (5.47)$$

$$\ddot{y}_b - \frac{I_{b_z} c_\gamma^2}{m_b r_x} \ddot{\psi}_b = -\frac{g}{z_4} \Delta_{y_4} \quad (5.48)$$

A partir das Equações (5.45)-(5.48) é possível derivar uma quantidade conservadora, denominada *energia orbital* [48], relativa ao movimento de cada quadril associado a uma perna j . Esta energia orbital representa a quantidade de energia que transita entre os estados cinético e potencial. Para o sistema de equações acima, considere as seguintes funções de energia:

$$E_{hip1x} = \frac{1}{2} (\dot{x}_b - \frac{I_{b_z} s_\gamma^2}{m_b r_y} \dot{\psi}_b)^2 + \frac{1}{2} \frac{g}{z_1} \Delta_{x_1}^2 \quad (5.49)$$

$$E_{hip1y} = \frac{1}{2} (\dot{y}_b + \frac{I_{b_z} c_\gamma^2}{m_b r_x} \dot{\psi}_b)^2 + \frac{1}{2} \frac{g}{z_1} \Delta_{y_1}^2 \quad (5.50)$$

$$E_{hip4x} = \frac{1}{2} (\dot{x}_b + \frac{I_{b_z} s_\gamma^2}{m_b r_y} \dot{\psi}_b)^2 + \frac{1}{2} \frac{g}{z_4} \Delta_{x_4}^2 \quad (5.51)$$

$$E_{hip4y} = \frac{1}{2} (\dot{y}_b - \frac{I_{b_z} c_\gamma^2}{m_b r_x} \dot{\psi}_b)^2 + \frac{1}{2} \frac{g}{z_4} \Delta_{y_4}^2 \quad (5.52)$$

Se cada $E_{hipj} = \text{constante}$ e a energia potência for igual à energia cinética no momento do contato da pata com solo, então cada quadril j se posicionará com velocidade zero sobre cada pata j ($\Delta_{x_j} = \Delta_{y_j} = 0$) ao final de cada passo. Ou seja, a energia cinética é transformada em energia potencial. Logo, resolvendo as Equações (5.49)-(5.52) para que se tenha energia orbital zero obtém-se os valores dos Δ 's que equivalem aos pontos de captura instantâneos para cada pata. Esta solução é dada por:

$$\Delta_{x_{c1}} = \sqrt{\frac{z_1}{g}} (\dot{x}_{b0} - \frac{I_{b_z} s_\gamma^2}{m_b r_y} \dot{\psi}_{b0}) \quad (5.53)$$

$$\Delta_{y_{c1}} = \sqrt{\frac{z_1}{g}} (\dot{y}_{b0} + \frac{I_{b_z} c_\gamma^2}{m_b r_x} \dot{\psi}_{b0}) \quad (5.54)$$

$$\Delta_{x_{c4}} = \sqrt{\frac{z_4}{g}} (\dot{x}_{b0} + \frac{I_{b_z} s_\gamma^2}{m_b r_y} \dot{\psi}_{b0}) \quad (5.55)$$

$$\Delta_{y_{c4}} = \sqrt{\frac{z_4}{g}} (\dot{y}_{b0} - \frac{I_{b_z} c_\gamma^2}{m_b r_x} \dot{\psi}_{b0}) \quad (5.56)$$

em que o símbolo c nos sub-índices de cada Δ faz referência a pontos de captura. As variáveis \dot{x}_{b0} e $\dot{\psi}_{b0}$ dizem respeito à leitura das velocidades lineares e angulares, respectivamente, no instante anterior ao contato da pata com solo (pois o ponto de contato não pode ser alterado após a entrada em fase de suporte).

Para que se possa entender melhor a resposta do sistema, considere a substituição da solução dada pela Equação (5.53) na Equação (5.45) e que $\dot{x}_{b0} = \dot{x}_b$ e $\dot{\psi}_{b0} = \dot{\psi}_b$. A conseqüente resposta em malha fechada é dada por:

$$\ddot{x}_b - \frac{I_{b_z} s_\gamma^2}{m_b r_y} \ddot{\psi}_b + \frac{g}{z_1} \sqrt{z_1} \left(\dot{x}_b - \frac{I_{b_z} s_\gamma^2}{m_b r_y} \dot{\psi}_b \right) = 0 \quad (5.57)$$

Assumindo a seguinte mudança de variável:

$$\delta = \dot{x}_b - \frac{I_{b_z} s_\gamma^2}{m_b r_y} \dot{\psi}_b \quad (5.58)$$

$$\dot{\delta} = \ddot{x}_b - \frac{I_{b_z} s_\gamma^2}{m_b r_y} \ddot{\psi}_b \quad (5.59)$$

a Equação (5.57) pode ser reescrita como:

$$\dot{\delta} + \frac{g}{z_1} \sqrt{z_1} \delta = \dot{\delta} + \sqrt{\frac{g}{z_1}} \delta = 0 \quad (5.60)$$

Com isso, verifica-se que a variável δ tende a zero com constante de tempo igual a $\sqrt{z_1/g}$. Esta constante de tempo é igual à constante de tempo de resposta para a dinâmica linearizada de um pêndulo invertido de comprimento z_1 . Esta associação é feita porque o robô quadrúpede ao realizar um suporte com pernas diagonais apresenta dinâmica natural instável similar a um pêndulo invertido. Assim, a constante de tempo $\sqrt{z_1/g}$ obtida para a resposta verifica a coerência da análise uma vez que esta é baseada na resposta passiva do sistema.

5.2.1 Tempo de resposta *versus* frequência do passo

Para um sistema com pernas, o conceito de pontos de captura diz respeito ao estados iniciais que levam o sistema (o robô) ao equilíbrio em um único passo. As soluções apresentadas na seção anterior para o controlador de distúrbio representam pontos de captura. Porém, estes pontos de captura levam a uma resposta que obedece a uma dinâmica natural associada a um pêndulo invertido. Ou seja, para que a solução seja um ponto de captura, levando o sistema ao equilíbrio em um único passo, a frequência do passo deve estar associada ao tempo de resposta dado pela constante de tempo $\sqrt{z_1/g}$.

Esta restrição se torna um inconveniente para a dinâmica da locomoção por pernas, visto que a frequência do passo e a fase de suporte são

parâmetros que variam de acordo com o padrão de marcha e com a velocidade que o robô deve executar. Se o ponto de captura é mantido e a frequência do passo é aumentada, reduzindo o tempo em fase de suporte, o robô tomará mais de um passo para rejeitar o distúrbio. Se o ponto de captura é mantido e a frequência do passo é reduzida, aumentando o tempo em fase de suporte, o robô poderá não ser capaz de rejeitar o distúrbio.

Na realidade, o problema da situação em que a frequência do passo é reduzida é difícil de ser presenciado. Os robôs quadrúpedes dificilmente possuem estatura superior a um metro. Pela dinâmica linearizada do pêndulo invertido, esta estatura resulta em uma constante de tempo de aproximadamente 0,32 segundos, ou seja, em uma fase de suporte de aproximadamente 1,2 segundos. Considerando esta fase de suporte e um padrão de marcha diagonal (o trote) com fator cíclico de 0,5, resulta em uma frequência de passo de aproximadamente 0,42 Hz. Esta frequência de passo é impraticável, do ponto de vista do controle da locomoção, para um padrão de trote diagonal com fator cíclico menor ou igual a 0,5. Em geral, a frequência de passo utilizada por animais quadrúpedes é superior a 1 Hz [43].

Com isso, para fazer frente aos problemas citados, propõe-se associar a resposta do controlador de distúrbio à frequência do passo. A ideia é ajustar a energia potencial do sistema (termos à direita das Equações (5.49)-(5.52)) de modo que a energia cinética de cada quadril vá a zero ao final do período da fase de suporte. A modificação da energia potencial é dada de acordo com o seguinte conjunto de soluções para os pontos de captura:

$$\Delta x_{c1} = \frac{z_1}{g\tau_{pr}} (\dot{x}_{b0} - \frac{I_{b_z} s_\gamma^2}{m_b r_y} \dot{\psi}_{b0}) \quad (5.61)$$

$$\Delta y_{c1} = \frac{z_1}{g\tau_{pr}} (\dot{y}_{b0} + \frac{I_{b_z} c_\gamma^2}{m_b r_x} \dot{\psi}_{b0}) \quad (5.62)$$

$$\Delta x_{c4} = \frac{z_1}{g\tau_{pr}} (\dot{x}_{b0} + \frac{I_{b_z} s_\gamma^2}{m_b r_y} \dot{\psi}_{b0}) \quad (5.63)$$

$$\Delta y_{c4} = \frac{z_1}{g\tau_{pr}} (\dot{y}_{b0} - \frac{I_{b_z} c_\gamma^2}{m_b r_x} \dot{\psi}_{b0}) \quad (5.64)$$

De forma análoga como realizado na seção anterior, a substituição da solução dada pela Equação (5.61) na Equação (5.45) resulta na seguinte resposta em malha fechada:

$$\dot{\delta} + \frac{1}{\tau_{pr}} \delta = 0 \quad (5.65)$$

em que τ_{pr} é a constante de tempo do sistema em malha fechada que pode ser associada à frequência do passo e ao fator cíclico do padrão de marcha. A partir de então, propõe-se relacionar τ_{pr} com a frequência do passo f_s e com o fator cíclico D_f como segue:

$$\tau_{pr} = \frac{D_f}{f_s} \quad (5.66)$$

o que equivale a associar o tempo de resposta do controlador de distúrbios ao período da fase de suporte do passo.

Para finalizar a seção, o controlador de distúrbio é estendido de modo que os distúrbios sejam rejeitados não somente para que o robô retorne a um equilíbrio com velocidade desejada igual a zero, ou seja, é estendido de modo a alterar a energia orbital de acordo com a velocidade de locomoção desejada.

Quando um robô caminha em velocidade constante, ele apresenta uma certa quantidade de energia orbital para o movimento de cada quadril. Logo, a ideia de extensão consiste em tornar relativas às soluções das Equações (5.61)-(5.64) de modo a realizar a manutenção desta energia orbital. Para isso, as Equações (5.61)-(5.64) são modificadas para:

$$\Delta x_{c1} = \frac{z_1}{g\tau_{pr}} (\dot{x}_{pr} - \frac{I_{b_z} s_\gamma^2}{m_b r_y} \dot{\psi}_{pr}) \quad (5.67)$$

$$\Delta y_{c1} = \frac{z_1}{g\tau_{pr}} (\dot{y}_{pr} + \frac{I_{b_z} c_\gamma^2}{m_b r_x} \dot{\psi}_{pr}) \quad (5.68)$$

$$\Delta x_{c4} = \frac{z_1}{g\tau_{pr}} (\dot{x}_{pr} + \frac{I_{b_z} s_\gamma^2}{m_b r_y} \dot{\psi}_{pr}) \quad (5.69)$$

$$\Delta y_{c4} = \frac{z_1}{g\tau_{pr}} (\dot{y}_{pr} - \frac{I_{b_z} c_\gamma^2}{m_b r_x} \dot{\psi}_{pr}) \quad (5.70)$$

em que $\dot{x}_{pr} = \dot{x}_{b0} - \dot{x}_b^{des}$, $\dot{y}_{pr} = \dot{y}_{b0} - \dot{y}_b^{des}$ e $\dot{\psi}_{pr} = \dot{\psi}_{b0} - \dot{\psi}_b^{des}$ são os erros de movimentação.

Durante um trote com velocidade constante, a trajetória de uma pata, durante a fase de suporte, possui simetria com relação ao seu respectivo quadril. De acordo com esta perspectiva, o que o controlador de distúrbios faz consiste em enviar os deslocamentos relativos Δ ao bloco de geração de trajetórias de forma a retirar a simetria do passo com relação ao quadril. Idealmente, esta assimetria no passo conduz à energia orbital desejada e, conseqüentemente, ao movimento de locomoção desejado.

5.3 Estimador de Estados

O desempenho das técnicas de controle de movimento descritas nas seções anteriores dependem substancialmente da qualidade da estimação dos estados da base (do dorso). Quantidades como as velocidades laterais, necessárias para a tarefa de controle de distúrbio, são as mais críticas uma vez que não é possível obtê-las por meio de uma medição direta (diferentemente das velocidades angulares que são diretamente medidas pelo sensor giroscópico das Unidades de Medição de Inércia - IMU).

Tendo em vista que tanto o controlador de distúrbios quanto o controlador do dorso funcionam com base no sistema de coordenadas horizontal, se faz coerente a utilização do mesmo sistema de coordenadas para a estimação

dos estados. As IMU's utilizadas em robôs quadrúpedes provêm a estimação das velocidades angulares e da orientação do dorso do robô já no sistema de coordenadas horizontal. Isto é, os ângulos de rolagem e arfagem expressam quanto o sistema de coordenadas da base (ou o dorso) do robô está inclinado com respeito a uma referência horizontal.

Para estimar as velocidades laterais do dorso utiliza-se a expressão descrita pela Equação (5.16), na qual assume-se que as patas estão naturalmente restringidas pelas forças de atrito durante a fase de suporte, ou seja, $\dot{X}_{f_i}^h = 0$. Este procedimento é análogo ao adotado em [66] e fornece uma estimação das velocidades translacionais do dorso no SCH:

$$\dot{X}_{f_i}^h = \dot{X}_b^h + \dot{R}_b^h X_{f_i}^b + R_b^h \dot{X}_{f_i}^b = 0 \quad (5.71)$$

$$\dot{X}_b^h = -\frac{\partial R_b^h}{\partial \Phi_b} \dot{\Phi}_b k(q_{r_i}) - R_b^h J_{b_i} \dot{q}_{r_i} \quad (5.72)$$

$$\dot{X}_{f_i}^h = -[M(\Phi_b, q_{r_i}) \quad R_b^h J_{b_i}] [\dot{\Phi}_b \quad \dot{q}_{r_i}] \quad (5.73)$$

$$\hat{X}_b^h = J_{Hest} [\dot{\Phi}_b \quad \dot{q}_{r_i}] \quad (5.74)$$

em que \hat{X}_b^h é o vetor de velocidades estimadas e $J_{Hest} \in \mathfrak{R}^{jn \times (jn+3)}$ é o Jacobiano da estimação de estados.

Note que é possível realizar a estimação das velocidades da base tendo apenas uma pata em contato com o solo. Assim, a existência de duas ou mais patas em contato com o solo leva à redundância de informação. Quando existe apenas uma pata em contato com o solo a matriz I_c é uma matriz identidade $\in \mathfrak{R}^{3 \times 3}$ e a sua inversa generalizada é a própria matriz I_c ($I_c^+ = I_c$). Quando existe mais de uma pata em contato com o solo a matriz I_c assume dimensão $\mathfrak{R}^{3n \times 3}$, em que n é o número de pernas em contato com o solo, e a sua inversa generalizada I_c^+ resulta em uma matriz que pondera igualmente as informações provenientes de cada perna em contato com o solo.

5.4 Síntese do Capítulo

Neste Capítulo foram detalhados os três blocos que compõem o sistema de controle reativo proposto e que são responsáveis pelo controle de movimento, sendo eles: o controlador do dorso, o controlador de distúrbios e o estimador de estados.

Para o bloco do controlador do dorso, foram apresentadas duas estratégias: uma baseada na projeção do espaço nulo do Jacobiano que relaciona a velocidade das patas com as velocidades lineares e angulares do dorso no SCH; e outra baseada no Jacobiano que relaciona as velocidades das juntas com as velocidades lineares e angulares do dorso no SCH, sendo obtido por meio da consideração de que as patas durante a fase de suporte possuem restrições de movimento. Ambas as estratégias foram analisadas e comparadas

frente à situações estáticas e dinâmicas considerando uma superfície plana de deslocamento. Nesta análise, verificou-se que:

- A estratégia baseada na restrição de movimento permite obter vetores de forças de reação orientados de modo ortogonal à superfície. Esta característica é adequada se a locomoção deve ser realizada sobre superfícies com baixos coeficientes de atrito;
- A estratégia baseada na projeção de espaço nulo é mais adequada para o deslocamento sobre superfícies irregulares onde existe a chance da perda de contato da pata com o solo. A estratégia baseada na restrição de movimento leva a uma movimentação indesejada para as patas quando a suposição da movimentação restrita é violada;
- A estratégia baseada na projeção de espaço nulo provê um vetor de torques nas juntas com a menor norma, o que leva à execução de tarefas com um menor consumo de energia;
- A estratégia baseada na restrição de movimento, por resultar em forças de reação ortogonais à superfície, induz menos *swings* de guinada³ durante uma locomoção que utiliza o trote como padrão de marcha.

Contudo, as análises sugerem o estudo de uma ação de controle mista para o bloco do controlador do dorso, de modo a aproveitar as vantagens apresentadas por cada solução.

A solução baseada no espaço nulo foi escolhida para compor o bloco do controlador do dorso.

Para o bloco do controlador de distúrbios, apresentou-se um modelo simplificado (linear) de um robô quadrúpede considerando a locomoção por meio do padrão trote. O controlador de distúrbio proposto provê pontos de apoio relativos para cada pata que entrará em fase de suporte. Estes pontos de apoio fazem com que o dorso seja naturalmente conduzido ao movimento desejado após distúrbios translacionais e de guinada.

Por fim, detalhou-se o bloco de estimação de estados, o qual é responsável pela estimação das velocidades translacionais do dorso.

³Movimentos oscilatórios do dorso em torno do eixo z do SCH.

Capítulo 6

Resultados

Este capítulo de resultados tem como objetivo avaliar o sistema de controle reativo proposto ao longo deste documento. Mediante simulações e experimentos procura-se verificar a importância e a funcionalidade dos principais blocos que compõem o SCR para a locomoção quadrúpede.

Com o propósito de abranger a maioria dos cenários de locomoção que um robô pode se defrontar, as funcionalidades do sistema de controle reativo são testadas para locomoção em terrenos planos, em terrenos inclinados, em terrenos irregulares e na presença de perturbações externas aplicadas ao dorso.

Os tópicos envolvidos neste capítulo são:

- Análise e aplicação da capacidade de modulação direta e independente dos parâmetros do caminhar;
- Análise da modulação paramétrica para locomoção em terrenos inclinados;
- Análise da funcionalidade e influência dos blocos no desempenho da locomoção em terrenos inclinados;
- Análise da geração de trajetórias adaptativa para a locomoção em terrenos irregulares;
- Análise da resposta do sistema frente à aplicação de distúrbios externos.

Em todos os tópicos são considerados resultados de simulação e experimentais, de modo a verificar na prática a factibilidade dos algoritmos propostos e dos resultados teóricos.

Na maioria das simulações e testes experimentais, o desempenho da sistema de controle reativo é analisado do ponto de vista das alterações na velocidade de deslocamento e na postura do robô.

O desempenho relacionado à postura é avaliado com base nas alterações da altura e angulação do dorso. Os critérios de velocidade e postura

são escolhidos devido às respectivas variações estarem relacionadas ao nível de robustez da locomoção. Quanto mais o robô é capaz de manter sua velocidade e postura durante a modulação do caminhar ou frente a desníveis no terreno, mais robusta é a locomoção.

A maioria dos testes experimentais apresentados nesta tese foram realizados durante o período de doutorado sanduíche (11/2011 à 09/2012), junto ao Departamento de Robótica Avançada do *Istituto Italiano di Tecnologia* (IIT), localizado em Gênova/Itália, e com o apoio dos integrantes do projeto *HyQ* (*HyQ Team*).

O ambiente de simulação, a plataforma de testes experimentais e os detalhes relacionados à sintonia de controladores e parâmetros utilizados são descritos na próxima seção.

6.1 Plataforma Experimental e Ambiente de Simulação

Ambos os resultados de simulação e experimentais são obtidos com base em uma plataforma robótica quadrúpede denominada *HyQ*¹ [90].

O robô *HyQ* possui 3 graus de liberdade por perna (duas juntas no quadril e uma junta como joelho) sendo que todas as 12 juntas apresentam controle de torque. O robô atinge postura com até 1 *m* de altura, pesa aproximadamente 70 *Kg* e atualmente possui um cabo umbilical que o conecta à fontes externas de energia elétrica e de energia hidráulica. Todas as 12 juntas apresentam um ângulo de excursão de 120°. Enquanto as juntas de quadril de abdução/adução são atuadas eletricamente por motores DC *brushless*, as juntas de quadril e de joelho que realizam movimentos de flexão/extensão são atuadas por cilindros hidráulicos. Algumas imagens do robô *HyQ* estão apresentadas na Figura 6.1.

Informações sobre posições e velocidades angulares do dorso são fornecidas por um sensor de medição de inércia IMU embarcado (modelo MicroS-train 3DM-GX3-25). O robô não possui sensores de contato nas patas. O instante de contato é obtido pelo monitoramento das forças de contato, que são estimadas por meio do jacobiano de cada perna e o torque nas juntas.

Detalhes de parâmetros do robô *HyQ* como massas, inércias, comprimento de membros e dados de cunho estrutural podem ser encontrados em [89].

O *software* utilizado como ambiente de simulação é o mesmo *software* utilizado para o controle do robô. O *software SL Simulator* [88] permite realizar simulações em tempo real e contém toda a informação do modelo dinâmico do robô e sua interação com o ambiente. Uma imagem do ambiente de simulação pode ser vista na Figura 6.2. Os códigos escritos, em linguagem C, para realização dos testes em simulação são os mesmos utilizados para o

¹*Hydraulically Actuated Quadruped Robot*

controle do robô na realização dos testes experimentais.

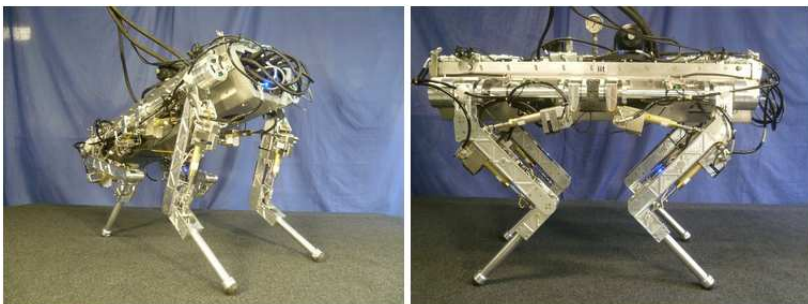


Figura 6.1: Imagens do robô *HyQ* do Departamento de Robótica Avançada do *Istituto Italiano di Tecnologia*. As imagens foram retiradas do sítio eletrônico do IIT (www.iit.it).

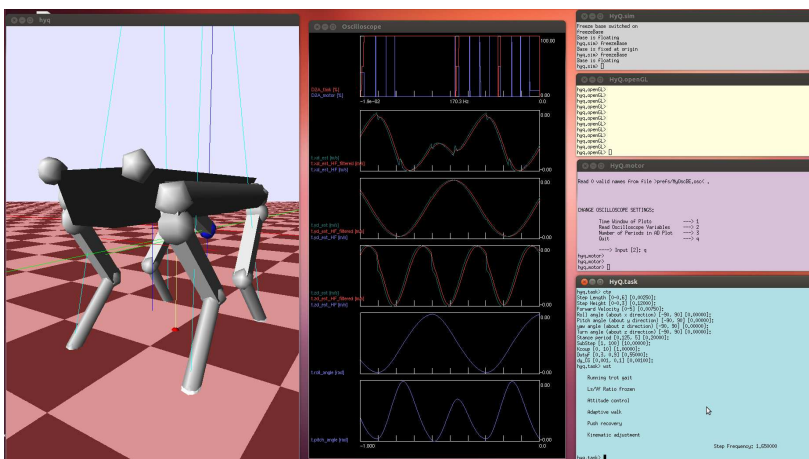


Figura 6.2: Imagem do ambiente de simulação utilizado para obtenção dos resultados. A imagem foi extraída de uma impressão de tela.

Todas as simulações utilizam as mesmas ações de controle e ajuste de ganhos para composição do vetor de forças generalizadas do controlador do dorso. A solução baseada na projeção do espaço nulo é utilizada para obtenção dos torques nas juntas. O vetor de forças generalizadas (Equação

5.1) é composto pelas seguintes ações de controle:

$$F_{b_x}^d = 0 \quad (6.1)$$

$$F_{b_y}^d = 0 \quad (6.2)$$

$$F_{b_z}^d = m_b g - K_{dz} \hat{z}_b^h \quad (6.3)$$

$$M_{b_x}^d = -K_{p\phi} \phi_b - K_{d\phi} \dot{\phi}_b \quad (6.4)$$

$$M_{b_y}^d = -K_{p\theta} \theta_b - K_{d\theta} \dot{\theta}_b \quad (6.5)$$

$$M_{b_z}^d = 0 \quad (6.6)$$

em que as posições desejadas para os ângulos de arfagem e guinada são iguais a zero. Os ganhos do controlador utilizados neste capítulo estão definidos na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Ganhos utilizados para o controlador do dorso.

Ganho	Valor
$K_{p\phi}$	2000 Nm/rad
$K_{d\phi}$	100 Nms/rad
$K_{p\theta}$	4000 Nm/rad
$K_{d\theta}$	200 Nms/rad
K_{dz}	800 Nm/s

Os ganhos do controlador do dorso foram escolhidos de modo a manter os valores dos torques de controle em níveis aceitáveis, sem que haja a saturação dos atuadores. Para o robô *HyQ*, o limite de torque para as juntas está definido em ± 145 Nm.

Os ganhos utilizados para a ação proporcional-derivativa do controlador de juntas, descrito na Seção 4.4, estão apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Ganhos da ação proporcional-derivativa do controlador de juntas.

Ganho	Valor
$K_{pquadril}$ (Adução/Abdução)	500 Nm/rad
$K_{dquadril}$ (Adução/Abdução)	16 Nms/rad
$K_{pquadril}$ (Flexão/Estensão)	300 Nm/rad
$K_{dquadril}$ (Flexão/Estensão)	6 Nms/rad
$K_{pjoelho}$ (Flexão/Estensão)	300 Nm/rad
$K_{djoelho}$ (Flexão/Estensão)	6 Nms/rad

Os ganhos da ação proporcional-derivativa do controlador das juntas

foram escolhidos de modo a obter um erro de posição aceitável sem tornar as juntas do robô demasiadamente rígidas.

Os valores das constantes α , β e γ , que ajustam a taxa de convergência dos ciclos-limite para a forma elíptica, e dos coeficientes de transição b_p e b_f utilizados para geração das trajetórias de referência estão descritos na Tabela 6.3.

Tabela 6.3: Parâmetros do bloco de geração de trajetórias (ver Equações (4.45)-(4.53)).

Ganho	Valor
α	50 s^{-1}
β	50 s^{-1}
γ	50 s^{-1}
b_p	500
b_f	200

Por fim, os limites de saturação para o ajuste cinemático (ver Seção 4.3) estão apresentados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4: Limites de saturação para o ajuste cinemático.

Ganho	Valor
$\phi_{b_{min}}$	-10°
$\phi_{b_{max}}$	10°
$\theta_{b_{min}}$	-5°
$\theta_{b_{max}}$	5°

6.2 Modulação de Parâmetros em Terreno Plano

6.2.1 Variação da Altura do Passo e Padrão de Marcha

As primeiras modulações a serem analisadas são a variação do padrão de marcha e os efeitos causados sobre o comportamento do caminhar com a variação da altura do passo de cada perna.

A locomoção realizada na tarefa simulada é dividida em quatro fases:

1. Inicialmente o robô se locomove utilizando um padrão de marcha caminhar e a altura do passo é igual para todas as pernas;
2. Após aproximadamente 7 segundos a altura de cada passo é modificada, sendo que cada perna assume um passo com altura diferente;
3. Passados mais 7 segundos, o padrão de marcha é modificado para o padrão trote. Relembra-se que a modulação do padrão de marcha é realizada por meio da matriz de sincronismo Θ_{ij} (ver Equações (4.24) e (4.25));
4. Para finalizar a modulação, após aproximadamente 21 segundos, o robô volta a assumir a altura de passo inicial para todas as pernas.

As trajetórias de referência de posição, relativas a altura do passo, geradas para cada pata estão descritas na Figura 6.3.

Para esta simulação foram escolhidos fator cíclico $D_f = 0,65$, frequência de passo $f_s = 2,25 \text{ Hz}$, velocidade de avanço desejada $V_f = 0,5 \text{ m/s}$ e ângulos de arfagem e rolagem desejados iguais a zero. Os resultados obtidos para a velocidade de avanço, ângulo de rolagem e ângulo de arfagem estão apresentados na Figura 6.4.

Observando-se os resultados da Figura 6.4 verifica-se que a variação do padrão de marcha e a variação na altura do passo de cada perna são realizados com sucesso e não afetam a qualidade da locomoção. A mudança no padrão de marcha é realizada suavemente, mesmo com a mudança abrupta da matriz de sincronismo, e não conduz ao desequilíbrio ou mudança substancial na movimentação do dorso. Conforme proposto nesta tese, o termo de acoplamento normalizado permite que cada perna possua altura de passo independente sem a perda do sincronismo do padrão de marcha.

Durante todo o trecho de modulação, a velocidade de avanço se mantém próxima da velocidade de avanço desejada e os ângulos de arfagem e rolagem se mantêm em uma amplitude de oscilação inferiores a 5° . A amplitude máxima de oscilação do ângulo de rolagem é de aproximadamente 4° e do ângulo de arfagem é de $0,7^\circ$. A diferença de amplitude entre as oscilações de rolagem e arfagem estão relacionadas a razão de aspecto entre os comprimentos lateral e longitudinal do dorso. O dorso é mais longo no sentido de

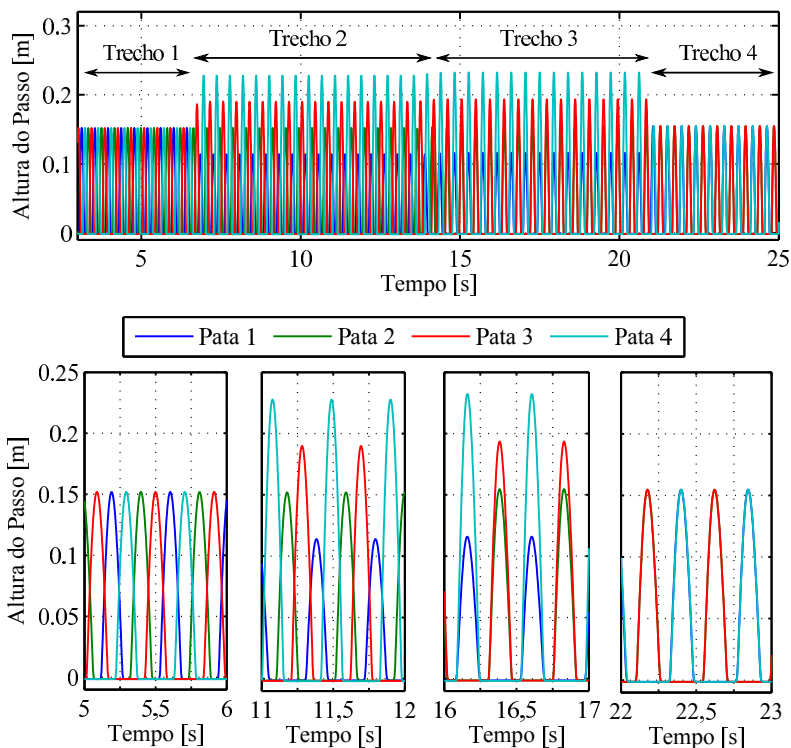


Figura 6.3: Modulação da trajetória de referência gerada para cada pata. As trajetórias correspondem a geração da coordenada de referência $z_{f_i}^h$ de cada pata i . No gráfico superior mostra-se a variação no padrão das trajetórias geradas ao longo do processo de modulação, possuindo quatro trechos com características distintas. Nos quatro gráficos inferiores mostra-se uma vista ampliada das referências geradas em cada trecho.

seu eixo longitudinal, fazendo com que a amplitude das oscilações de arfagem seja proporcionalmente menor que a de rolagem.

6.2.2 Variação da Velocidade de Avanço

O controle da velocidade avanço de um robô é uma tarefa executada com frequência durante um caminhar, principalmente quando ocorre a transição do caminhar entre diferentes topologias de terreno. Nesta seção procura-se analisar o comportamento da velocidade de avanço do robô em termos da velocidade de avanço desejada V_f imposta para o sistema de con-

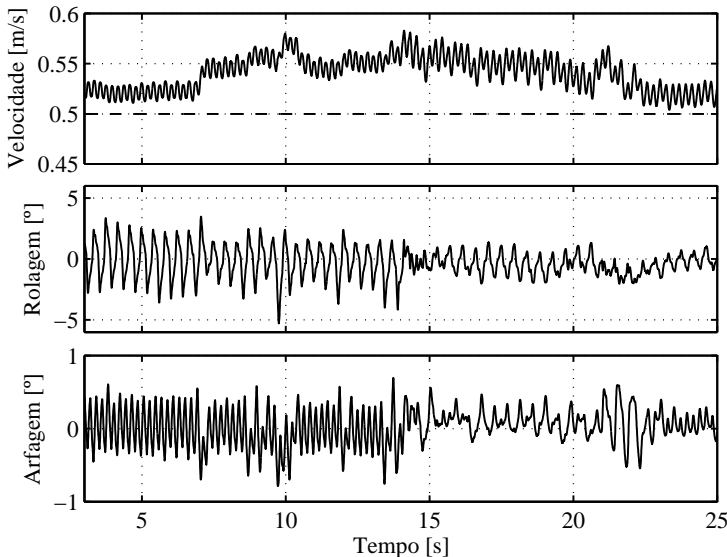


Figura 6.4: Resultados para o comportamento da velocidade de avanço (gráfico superior), do ângulo de rolagem (gráfico central) e do ângulo de arfagem (gráfico inferior) para a variação do padrão de marcha e da altura dos passos.

trole relativo.

O teste de simulação consiste no aumento gradativo da velocidade de avanço desejada, partindo de $V_f = 0,25 \text{ m/s}$ à $V_f = 2,0 \text{ m/s}$. Para que se possa compreender a influência dos blocos relativos ao controle de movimento no desempenho da locomoção, o teste gradativo de velocidade é realizado para três diferentes *set-ups*:

- *Set-up NA* - Locomoção com o bloco do controlador de distúrbio **desligado** e **sem a utilização** do controlador do dorso para o controle da velocidade de avanço;
- *Set-up CDI* - Locomoção com o bloco do controlador de distúrbio **ligado** e **sem a utilização** do controlador do dorso para o controle da velocidade de avanço;
- *Set-up CDI+CDO* - Locomoção com o bloco do controlador de distúrbio **ligado** e **utilização** do controlador do dorso para o controle da velocidade de avanço;

No *Set-up CDI+CDO*, o controlador do dorso é utilizado para o controle da velocidade de avanço pela inserção de uma ação de controle que

atribui valores para a força desejada $F_{b_x}^d$ (ver Equação (5.1)), ou seja:

$$F_{b_x}^d = K_{V_f}(V_f - \hat{x}_b^h) \quad (6.7)$$

em que $K_{V_f} = 500 \text{ Ns/m}$ é um ganho escolhido e \hat{x}_b^h é a velocidade de avanço estimada pelo bloco de estimação de estados.

Os resultados obtidos com os testes simulados para a velocidade de avanço estão apresentados na Figura 6.5. Os erros de velocidade de cada *set-up* estão apresentados na Figura 6.6. Para uma melhor visualização das diferenças de resposta entre cada *set-up*, realizou-se uma filtragem² sobre o sinal da velocidade.

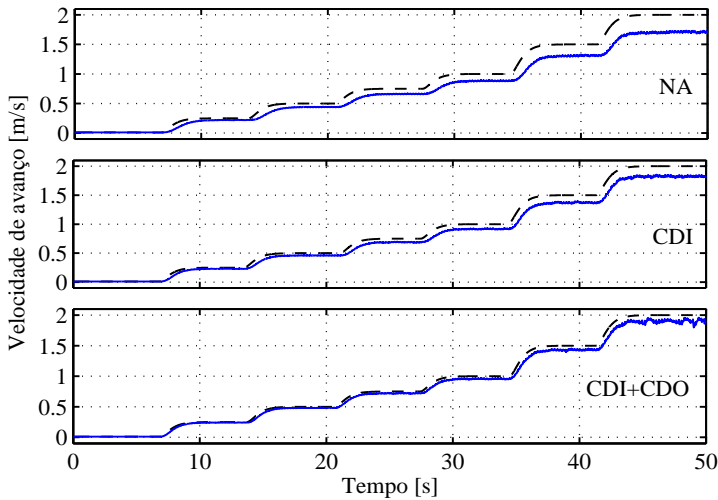


Figura 6.5: Resposta da velocidade de avanço para os *set-ups* NA (gráfico superior), CDI (gráfico central) e CDI+CDO (gráfico inferior). A linha tracejada representa a velocidade de avanço desejada e a linha azul contínua representa a velocidade desempenhada pelo robô.

Com base nos resultados das Figuras 6.5 e 6.6, verifica-se que o erro de velocidade é reduzido ao passo que os blocos de controle de distúrbio e controle do dorso são acionados.

Quando o controlador de distúrbios é ligado (*set-up* CDI) o erro de velocidade é reduzido aproximadamente à metade do valor de erro obtido no *set-up* NA. Isto ocorre porque um erro de velocidade $\tilde{V}_f = V_f - \hat{x}_b^h$, visto pelo controlador de distúrbios (ver Equações (5.67)-(5.67)), faz com que o

²Utilizou-se um filtro de primeira ordem com frequência de corte igual a 1 Hz.

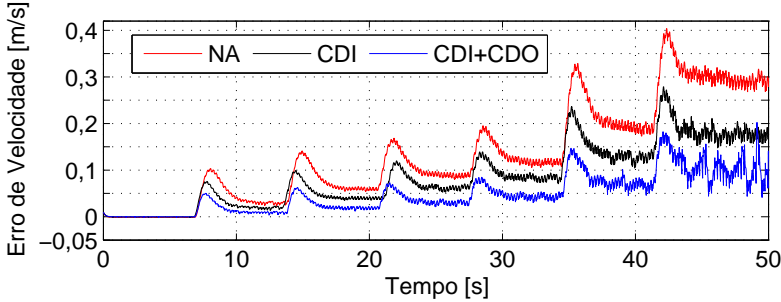


Figura 6.6: Erro de velocidade de avanço para os *set-ups* NA, CDI e CDI+CDO.

controlador de distúrbios gere deslocamentos relativos (Δ 's) que aumentam a energia orbital do dorso no sentido do movimento desejado.

No terceiro *set-up*, em que o controlador do dorso é acionado para auxiliar na correção do movimento, o erro de velocidade é novamente reduzido em torno de 50%. O erro de velocidade obtido para uma velocidade desejada de 2 m/s é de aproximadamente 5%.

Os baixos valores de erro alcançados para o terceiro *set-up* são frutos da integração não-confitante e do conceito de partilha de informação do sistema de controle reativo proposto. Neste *set-up*, todos os blocos partilham da mesma informação e trabalham com um objetivo em comum, o de alcançar a velocidade de avanço desejada V_f .

6.2.3 Resultados Experimentais

As seções 6.2.1 e 6.2.2 mostraram resultados relacionados à capacidade de modulação direta e independente de alguns dos parâmetros do caminhar (o padrão de marcha, a altura do passo e a velocidade de avanço).

A modulação direta, independente e na qual os parâmetros do gerador (CPG) são os próprios parâmetros do caminhar é uma das contribuições desta tese. O propósito é facilitar a modulação da geração que é realizada por tarefas de mais alto nível hierárquico, como por exemplo, uma tarefa cognitiva. Além disso, relembra-se que as características de modulação direta e independente permitem que os parâmetros do caminhar sejam considerados como entradas de controle.

Nesta seção, apresentam-se resultados de um experimento realizado com o robô *HyQ* para um exemplo de aplicação que explora a capacidade de modulação direta e independente dos parâmetros do caminhar. A tarefa do experimento consiste no rastreamento de um alvo pelo robô *HyQ*. Para isso, o robô é equipado com um sistema de visão binocular que, ao processar as imagens, informa a distância relativa e o ângulo de guinada entre o robô

e o alvo. Uma tarefa de mais alto nível é criada para a modulação dos parâmetros: velocidade de avanço e velocidade de guinada desejadas. A modulação destes parâmetros é realizada pela tarefa de mais alto nível em função da seguinte lei de controle:

$$V_f = K_{Pv}(Po - P_{alvo}) \quad (6.8)$$

$$\dot{\psi}_{b_{des}} = -K_{Pg}\psi_{alvo} \quad (6.9)$$

em que P_{alvo} é a distância relativa entre o robô e o alvo, Po é a distância relativa desejada, ψ_{alvo} é o ângulo de guinada entre o robô e o alvo e K_{Pv} e K_{Pg} são os ganhos da ação de controle.

Para manter a coerência com os conceitos do sistema de controle reativo proposto, a tarefa de mais alto nível também envia ao bloco do controlador do dorso uma referência de força e uma referência de momento. Estas forças generalizadas são dadas por:

$$F_{b_x}^d = K_f(V_f - \hat{x}_b^h) \quad (6.10)$$

$$M_{b_z}^d = K_m(\dot{\psi}_{b_{des}} - \dot{\psi}_b) \quad (6.11)$$

em que \hat{x}_b^h é a velocidade de avanço estimada e $\dot{\psi}_b$ é a velocidade angular de guinada do dorso.

Neste experimento, realizado em laboratório, o robô trota sobre uma esteira enquanto rastreia um alvo colorido e tenta manter a distância relativa desejada Po , conforme fotografias na Figura 6.7. Os resultados do experimento estão mostrados na Figura 6.8.



Figura 6.7: À esquerda, imagem do sistema de visão do robô com o alvo rastreado ao centro. À direita, imagem da câmera do sistema de visão e do posicionamento do robô sobre a esteira. Obs: o sistema de coordenadas visto na figura à direita é o sistema de coordenadas da câmera.

A velocidade do robô é modificada para manter a distância mesmo na presença de distúrbios externos. Por exemplo, se um operador muda a

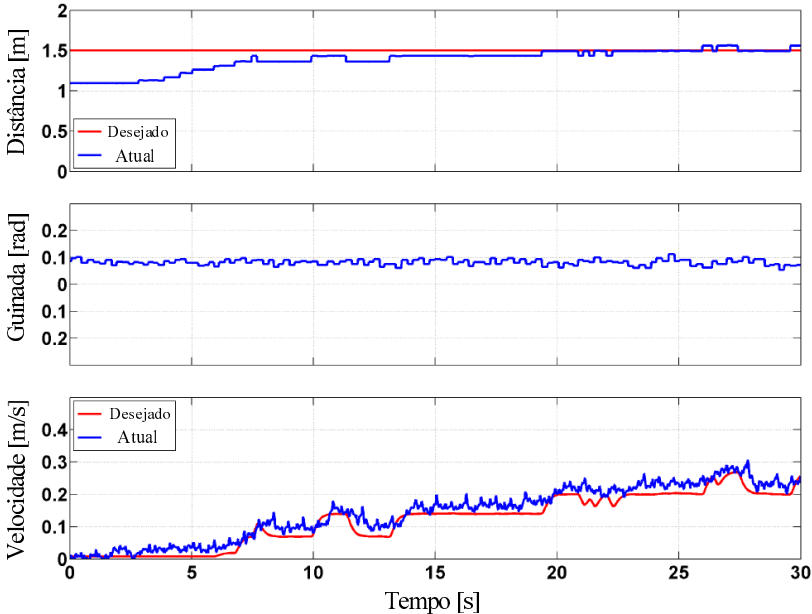


Figura 6.8: Resultados para o experimento de rastreamento de alvo realizado sobre a esteira: distância relativa (gráfico superior), guinada relativa (gráfico central) e velocidade de avanço (gráfico inferior).

velocidade da esteira, o robô adapta a sua velocidade para manter a distância relativa desejada. Ao mesmo tempo, o controle na guinada corrige automaticamente qualquer *drift* lateral na direção da locomoção e ajuda a manter o robô no centro da esteira. Este experimento mostra como um certo grau de autonomia pode ser dado ao robô a partir de um aparato de visão computacional em conjunto com o sistema de controle reativo proposto.

Como uma extensão para este experimento é possível utilizar um alvo móvel ao invés de um alvo estático. Neste caso, o robô seria capaz de seguir, por exemplo, um "líder".

Este experimento, realizado juntamente com integrantes do *HyQ Team*, também envolveu a modulação de outros parâmetros do caminhar, como a altura do passo H_s e o fator cíclico D_f . Os resultados relacionados a estas modulações, bem como maiores detalhes do experimento, podem ser encontrados em [7].

6.3 Locomoção em Terreno Inclinado

6.3.1 Resultados de Simulação

Para avaliação do sistema de controle reativo em terrenos inclinados, três *set-ups* são utilizados:

- *Set-up NA* - Locomoção **sem** a adequação das trajetórias à superfície inclinada e **sem** a utilização do bloco do controlador de distúrbio;
- *Set-up CDI* - Locomoção **sem** a adequação das trajetórias à superfície inclinada e **com** a utilização do bloco do controlador de distúrbio;
- *Set-up AD+CDI* - Locomoção **com** a adequação das trajetórias à superfície inclinada e **com** a utilização do bloco do controlador de distúrbio.

As trajetórias são adequadas à superfície pela mudança da posição da origem de cada ciclo limite, em seu respectivo espaço de tarefa, e pela aplicação da matriz de rotação $R(\phi, \theta, \psi)$ em cada ciclo limite. Esta adaptação tende a preservar a orientação da velocidade de avanço paralela à superfície e a ajustar a postura do robô, mantendo-a com ângulo de arfagem $\theta_b = 0$, de modo a obter uma maior margem de estabilidade durante subidas e descidas.

A utilização e não utilização do bloco do controlador de distúrbio complementa o teste simulado para mostrar as consequências que este bloco traz ao desempenho da locomoção em superfícies inclinadas.

A partir dos três *set-ups* pretende-se analisar o desempenho do robô na travessia de um terreno inclinado com perfil triangular isósceles, conforme ilustrado na Figura 6.9. O robô trota com velocidade de avanço desejada de $0,5 \text{ m/s}$ ao longo de todo o percurso.

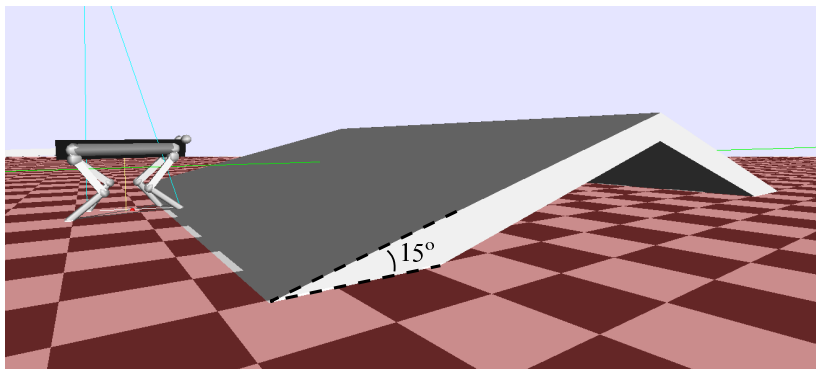


Figura 6.9: Cenário de simulação para locomoção em terreno inclinado. A travessia é realizada com velocidade de avanço desejada de $0,5 \text{ m/s}$ ao longo de todo o percurso.

O trote é simulado para três diferentes níveis de inclinação: 5° , 10° e 15° . Para este cenário de simulação o ganho $K_{p\theta}$ do controlador do dorso é nulo e o bloco de ajuste cinemático é desligado para melhor visualização dos efeitos da adaptação das trajetórias. Os resultados de simulação estão apresentados nas Figuras 6.10 e 6.11.

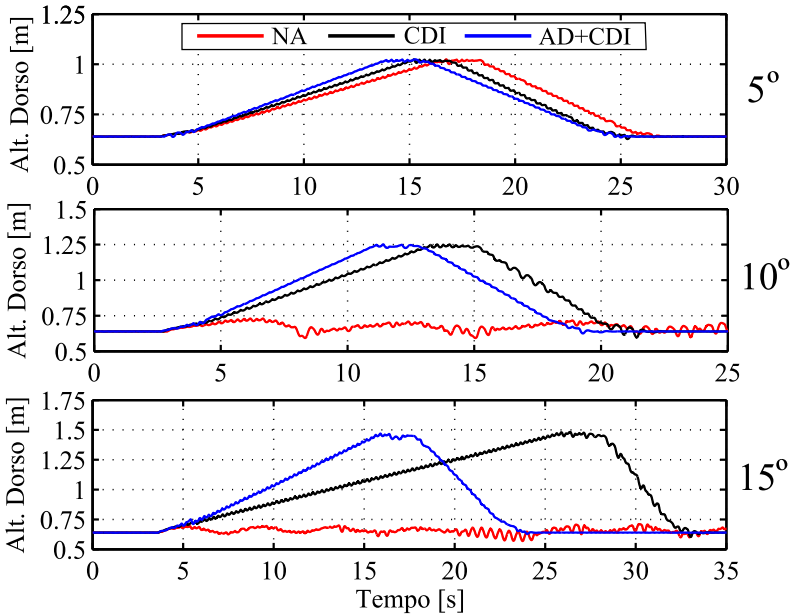


Figura 6.10: Altura do dorso do robô ao longo do tempo durante a travessia em terreno inclinado com: 5° (gráfico superior), 10° (gráfico central) e 15° (gráfico inferior) de inclinação. A altura do dorso desejada para o robô, associada a sua postura de locomoção, é de $0,7\text{ m}$.

Os gráficos da Figura 6.10 mostram os valores da altura do dorso ao longo do tempo durante o percurso. No gráfico superior, relativo à inclinação de 5° o robô é capaz de atravessar o terreno para todos os *set-ups*. Porém, o erro de velocidade aumenta consideravelmente quando comparado aos *set-ups* CDI e AD+CDI. Para os terrenos de 10° (gráfico central) e 15° (gráfico inferior) de inclinação, o robô somente é capaz de atravessar o terreno com o controlador de distúrbio ligado (*set-up* CDI) ou com o controlador de distúrbio mais o ajuste de trajetórias (*set-up* AD+CDI). Nos gráficos da Figura 6.10 o erro de velocidade é percebido pela assimetria dos resultados. Quanto maior o erro de velocidade durante a subida e a descida do terreno mais assimétrica é a trajetória da altura do dorso, pois o erro de velocidade faz com que o robô obtenha um tempo de subida maior que o tempo de descida.

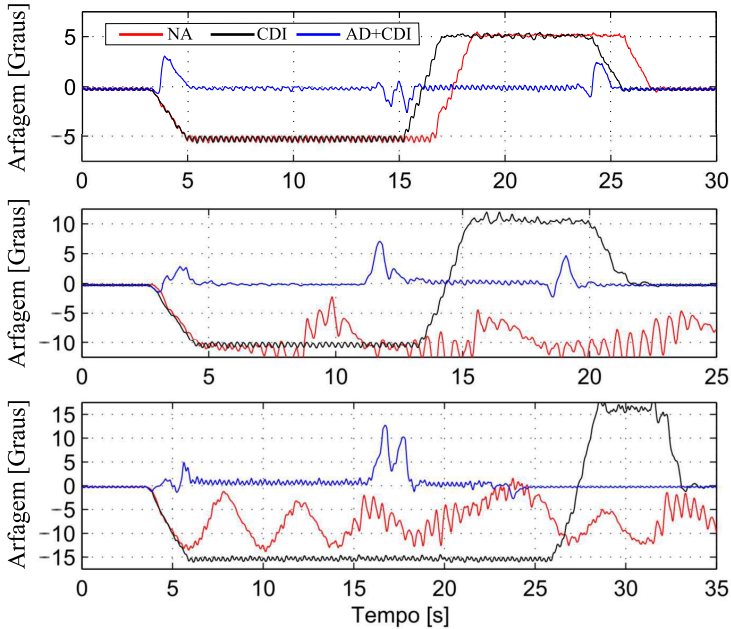


Figura 6.11: Ângulo de arfagem do dorso ao longo do tempo durante a travessia em terreno inclinado com: 5° (gráfico superior), 10° (gráfico central) e 15° (gráfico inferior) de inclinação.

A partir dos gráficos da Figura 6.11 é possível observar que a postura do robô é preservada com a adaptação das trajetórias à inclinação da superfície. Os maiores erros de postura ocorrem sobre os trechos em que existe a variação da inclinação do terreno, pois nesses momentos ocorre a transição dos parâmetros de modulação envolvidos na adaptação das trajetórias de cada passo.

É importante observar as características do controlador de distúrbio e o seus efeitos sobre o desempenho da locomoção em terrenos inclinados. O controlador de distúrbio, diferentemente da adaptação de trajetórias (a qual necessita de conhecimento acerca da superfície), identifica o terreno inclinado como uma perturbação. Durante a subida, a velocidade tende a ser reduzida. Este erro de velocidade faz com que o controlador de distúrbio envie deslocamentos relativos Δ_x 's negativos para o bloco de geração de trajetórias. Este comando causa o efeito de deslocar o dorso para frente com relação aos pontos de apoio aumentando a margem de estabilidade, reduzindo o erro de velocidade e evitando um capotamento traseiro. É o aumento da margem de

estabilidade que, por fim, evita a perda ou o contato fraco com a superfície e possibilita a travessia do terreno.

De modo análogo, o erro de velocidade durante uma descida faz com que o controlador de distúrbio envie Δ_x 's positivos para o gerador de trajetórias. Este comando aumenta a margem de estabilidade ao mesmo tempo que reduz o erro de velocidade e freia o robô, evitando o capotamento frontal.

6.3.2 Resultados Experimentais

Para os testes experimentais tenta-se reproduzir o cenário com terreno inclinado utilizando uma esteira com inclinação ajustável, conforme mostrado na Figura 6.12.

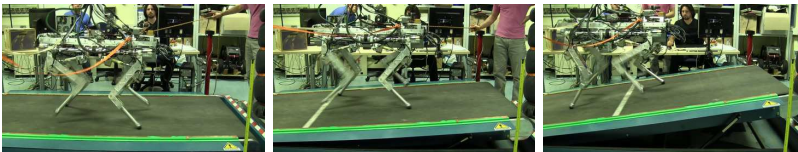


Figura 6.12: Sequência de fotografias tiradas durante a realização do experimento. Da esquerda para a direita: o robô *HyQ* trota sobre a esteira com inclinação de 0° , 5° e 10° .

O nível de inclinação da esteira excursiona entre 0° e 13° . Os experimentos são realizados para quatro diferentes níveis de inclinação: 0° , 5° , 10° e 13° . O intuito do experimento é observar o comportamento do ângulo de arfagem do dorso e os erros de velocidade para uma avaliação qualitativa do processo de adaptação das trajetórias.

A velocidade de avanço desejada é de $0,5 \text{ m/s}$, a mesma utilizada para os resultados de simulação. Os resultados experimentais estão mostrados na Figura 6.13.

Os baixos níveis de oscilação do dorso e o baixo erro de postura obtidos nos experimentos corroboram os benefícios da abordagem proposta na tese. Os baixos níveis de oscilação e a preservação da postura estão diretamente relacionados à geração de trajetórias mais adequadas para a locomoção, como discutido no início do Capítulo 4. Ainda que exista um pequeno erro de medição da velocidade de deslocamento sobre a esteira, é possível observar que, apesar do erro aumentar com a inclinação da esteira, a velocidade de deslocamento é pouco afetada pela inclinação e encontra-se próxima da velocidade desejada de $0,5 \text{ m/s}$.

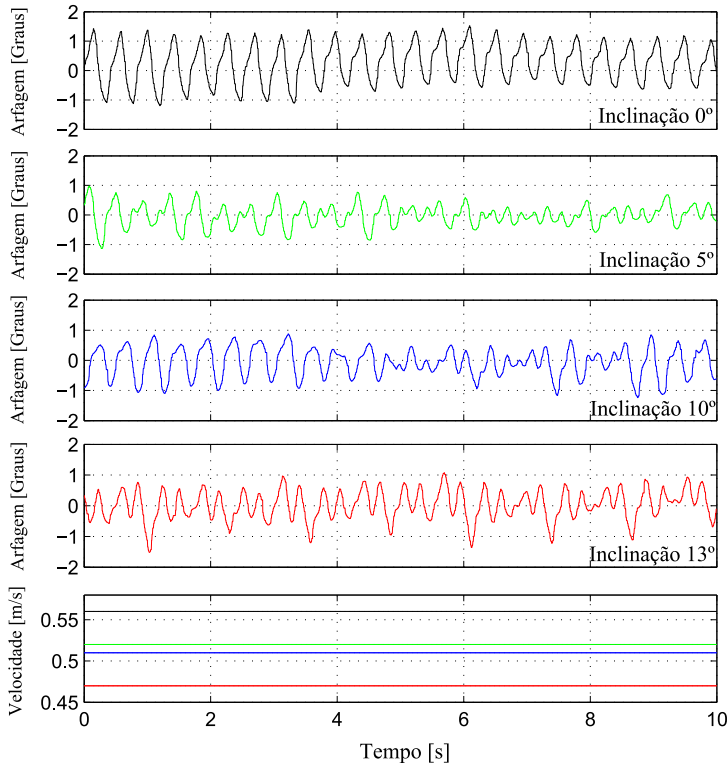


Figura 6.13: Resultado experimental para locomoção em terreno inclinado: ângulo de arfagem do dorso (em graus) para cada um dos níveis de inclinação da esteira (quatro gráficos superiores) e respectivas velocidades de deslocamento (gráfico inferior).

6.4 Locomoção em Terreno Irregular

6.4.1 Resultados de Simulação

Neste cenário de simulação, o robô trota em um terreno irregular construído a partir da dispersão de alguns blocos paralelepípedos, conforme ilustrado na Figura 6.14a. Nesta situação a robustez da locomoção é qualitativamente avaliada por meio da utilização da variável profundidade de passo z_{td_1} .

Primeiramente, o robô trota sem a geração de trajetórias adaptativa,

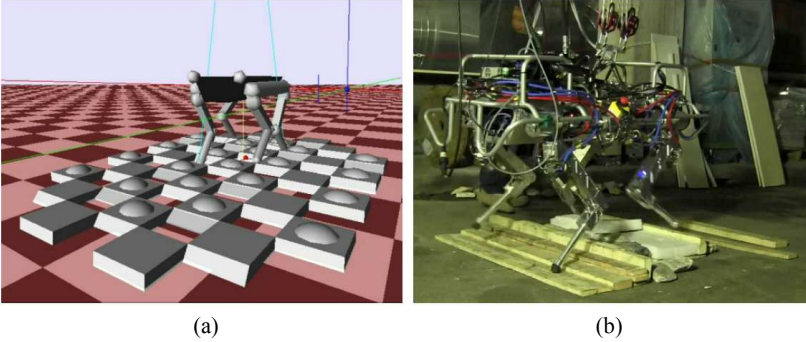


Figura 6.14: À esquerda, imagem do ambiente de simulação para teste da locomoção em terreno irregular. À direita, imagem dos testes experimentais com o robô se deslocando sobre um terreno irregular construído por meio de pedaços de madeiras, espumas e pedras.

o que significa que a superfície é considerada plana e com isso a profundidade de passo z_{td_i} é fixada em zero. Em uma segunda tentativa, o robô trotta sobre o mesmo terreno, porém, com a profundidade de passo sendo adaptada em função da superfície de contato. Para realizar a adaptação da trajetória neste último caso, a profundidade do passo z_{td_i} deve ser pré-ajustada em um valor negativo menor que $-H_s$. Isto faz com que a pata alcance a posição mais baixa da trajetória elíptica gerada. No entanto, se a pata toca o solo durante o seu movimento descendente, a profundidade de passo relativa é adquirida e a trajetória do passo é adaptada.

Cada um dos casos (locomoção adaptativa e não-adaptativa) foram simuladas cinco vezes para um tempo fixo de 15 segundos. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 6.15.

Os resultados de simulação da Figura 6.15 indicam que a ação adaptativa introduzida por z_{td} melhora a robustez da locomoção. Os distúrbios transmitidos ao dorso são consideravelmente reduzidos, preservando a postura e a velocidade de avanço desejadas para o robô. Além disso, a ação adaptativa reduz as forças de impacto da pata com o solo.

Para as tentativas com locomoção adaptativa a trajetória da altura do dorso estabiliza em um valor ligeiramente mais alto. Este efeito é causado pelo erro de posicionamento entre a posição atual da pata e a sua posição desejada no momento em que ocorre o contato da pata com o solo e z_{td} é adquirido.

6.4.2 Resultados Experimentais

Para avaliar experimentalmente as contribuições da geração de trajetórias adaptativa, o robô é solicitado para atravessar um terreno irregular

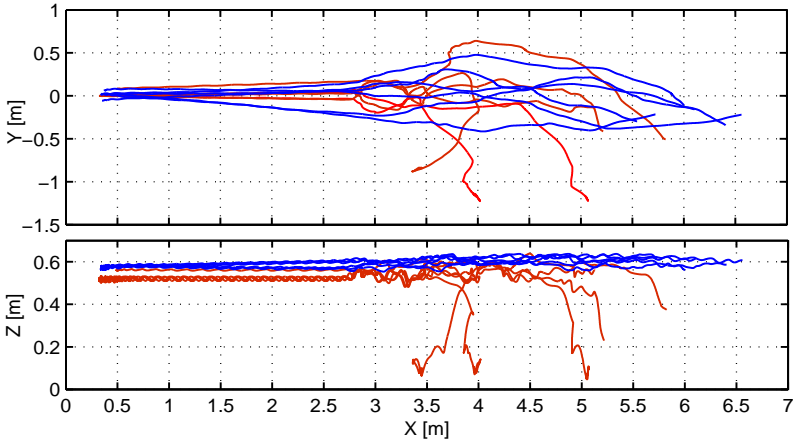


Figura 6.15: Trajetória do centro geométrico do dorso durante o trote em terreno irregular: com trajetória de passo adaptativa (linhas azuis) e sem trajetória adaptativa (linhas vermelhas). As linhas vermelhas descendentes indicam travessias mal sucedidas, nas quais o robô perde o seu equilíbrio.

construído por meio de pedaços de madeira, espumas e pedras, conforme a fotografia da Figura 6.14b. Os obstáculos têm até 10 *cm* de altura, o que representa aproximadamente 25% da capacidade de extensão de cada perna.

Para a travessia do terreno o robô trotava com altura de passo $H_s = 12$ *cm*, fator cíclico $D_f = 0,55$ e velocidade de avanço desejada $V_f = 0,35$ *m/s*, resultando em uma frequência de passo de 1,65 *Hz*. O robô atravessa o terreno sem controle no movimento de guinada.

Do mesmo modo que nos testes simulados, a robustez da locomoção é qualitativamente avaliada em função da utilização da geração de trajetórias adaptativa por meio de z_{td_i} . Lembra-se que para os experimentos sem geração adaptativa o valor da profundidade de passo é fixado em zero ($z_{td_i} = 0$).

Para avaliar a qualidade da locomoção, observa-se a trajetória desenvolvida pelo robô ao longo do terreno irregular. Para obter a trajetória realizada pelo robô, as velocidades estimadas do dorso (provenientes do bloco de estimação de estados) são integradas com relação ao sistema de coordenadas global. O resultado dos experimentos estão apresentados na Figura 6.16.

Observando as linhas vermelhas na Figura 6.16, verifica-se que o robô não é capaz de atravessar o terreno sem a geração adaptativa das trajetórias. Quando as trajetórias das patas não são adaptadas, as forças de reação aparecem proporcionalmente à altura dos obstáculos. Neste caso em que o robô trotava sem adaptação, as componentes das forças de reação, que são criadas no sentido oposto da velocidade de avanço, são grandes o suficiente para impedir

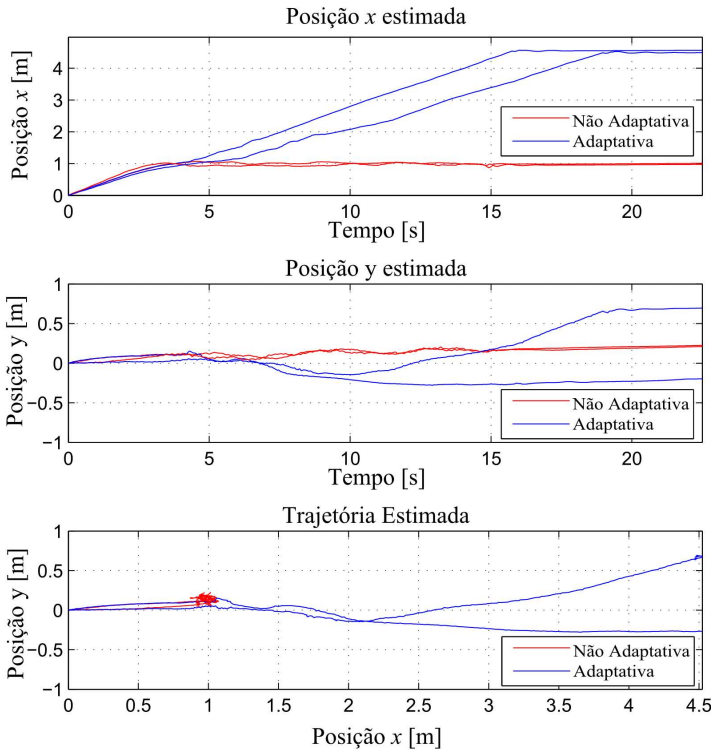


Figura 6.16: Resultados experimentais para os testes em terreno irregular: cada um dos três gráficos mostra quatro tentativas de travessia, duas com locomoção adaptativa (em azul) e duas sem locomoção adaptativa (em vermelho). No gráfico superior e central, respectivamente, a evolução no tempo das posições x e y estimadas do robô no sistema de coordenadas global. No gráfico inferior, uma vista superior das tentativas (plano xy), ilustrando que durante a locomoção não adaptativa o robô não é capaz de avançar além de $x = 1\text{m}$.

que o robô prossiga.

Por outro lado, observando as linhas azuis na Figura 6.16, quando a geração adaptativa está acionada o robô é capaz de atravessar o terreno. Como esperado devido aos resultados simulados, a ação adaptativa leva a uma redução nas componentes das forças de reação que se opõem ao movimento

de avanço desejado, justamente por adaptar a trajetória do passo à superfície do terreno. Logo, verifica-se que a geração adaptativa aumenta a capacidade do robô na travessia de terrenos irregulares.

6.5 Análise de Estabilidade Pós-Distúrbio

6.5.1 Resultados de Simulação

A melhora na capacidade de manutenção do equilíbrio pelo uso do bloco de controle de distúrbio é avaliada submetendo o dorso do robô a diferentes distúrbios laterais e de guinada. Os distúrbios de guinada são reproduzidos pela aplicação de valores de torque constantes sobre o dorso do robô de modo a produzir momentos positivos em torno do eixo z^h . Os distúrbios laterais, por sua vez, são reproduzidos pela aplicação de um força perpendicularmente ao centro de um dos lados do dorso. O perfil temporal de cada distúrbio possui forma do tipo degrau com a duração de um segundo.

O robô executa um padrão de marcha trote e os distúrbios são introduzidos no início da fase de balanço do mesmo par de pernas diagonais. O padrão de marcha executado possui uma frequência de passo $f_s = 1,65 \text{ Hz}$, um fator cíclico $D_f = 0,55$ e uma altura de passo $H_s = 0,08 \text{ m}$ igual para todas as pernas.

Os torques $\Upsilon_{h_{des}}$ do controlador do dorso são computados de acordo com os ganhos apresentados na Tabela 6.1 e ângulos de arfagem e de rolagem desejados são iguais a zero. As respostas para os distúrbios laterais e de guinada são mostrados separadamente.

Primeiramente, para analisar a rejeição de distúrbios de guinada, três diferentes torques constantes são aplicados ao dorso do robô. Os deslocamentos angulares de guinada devido a cada torque aplicado, com e sem a utilização do controlador de distúrbio, estão mostrados na Tabela 6.5.

Tabela 6.5: Resultados para a rejeição de distúrbios de guinada com o controlador de distúrbio ligado e desligado.

Modo\Torque	100 Nm	200 Nm	300 Nm
Ligado	23,5°	47,0°	60,7°
Desligado	31,5°	60,2°	85,4°

A partir dos resultados apresentados na Tabela 6.5, verifica-se que o controlador de distúrbios é capaz de reduzir o efeito de deslocamento de guinada em até 29%. Este resultado é satisfatório uma vez que o controlador de distúrbio não tem efeito durante a fase de balanço da perna, quando o distúrbio começa a ser aplicado.

Para analisar a resposta a distúrbios laterais, mostra-se a capacidade do robô em preservar o equilíbrio quando alguns dos blocos do sistema de con-

trole reativo são desligados. Para estas simulações consideram-se os seguintes *set-ups*:

- *Set-up NA* - Bloco do controlador de distúrbio **desligado** e bloco do ajuste cinemático **desligado**;
- *Set-up CDI* - Bloco do controlador de distúrbio **ligado** e bloco do ajuste cinemático **desligado**;
- *Set-up CDI+AC* - Bloco do controlador de distúrbio **ligado** e bloco do ajuste cinemático **ligado**;

O bloco do controlador de distúrbio é ligado e desligado para analisar a sua contribuição na manutenção do equilíbrio lateral. O bloco de ajuste cinemático é ligado e desligado para analisar os seus benefícios à rejeição de distúrbios.

Várias aplicações de distúrbio foram simuladas aplicando lateralmente ao robô uma força constante durante o intervalo de um segundo. Três valores de força foram utilizados ($400 N$, $500 N$ e $600 N$) para cada um dos *set-ups* mencionados. Os resultados estão apresentados na Figura 6.17.

A Figura 6.17 mostra que o robô tomba para todas as três forças de distúrbio quando o controlador de distúrbios está desligado. Na realidade, o robô é muito sensível a distúrbios laterais quando o trote é executado com as pernas quase paralelas. Em simulação, o robô sem o controlador de distúrbios pode somente suportar distúrbios laterais até $120 N$. Com o controlador de distúrbios ligado, o equilíbrio é retomado mesmo que o bloco de ajuste cinemático esteja desligado, demonstrando um crescimento na robustez do movimento. Em teoria, com um algoritmo de controle de distúrbio baseado em pontos de captura, um robô começará a cair somente quando os pontos instantâneos de captura estiverem fora do espaço de trabalho do robô ou se os controladores de posição de cada junta não forem capazes de seguir as trajetórias desejadas.

Para distúrbios de $500 N$, o robô com *set-up* CDI ou CDI+AC apresenta uma dinâmica de estabilização similar. Entretanto, para $600 N$, apenas o *set-up* CDI não é suficiente para manter o equilíbrio e a partir deste ponto os benefícios do bloco de ajuste cinemático tornam-se notórios. Um forte distúrbio lateral excita o movimento de rolagem devido ao braço de alavanca azimutal entre a posição da pata e o ponto em que a força é aplicada. Se as trajetórias das patas são geradas no sistema de coordenadas da base, ao invés de utilizar o sistema de coordenadas horizontal, o movimento de rolagem levará as trajetórias geradas a penetrarem no solo. Neste caso, a pata tocará o solo em um ponto anterior ao ponto de captura calculado pelo controlador de distúrbio. Como consequência, o robô se torna incapaz de reduzir o movimento lateral indesejado e o movimento de rolagem permanece, conduzindo-o à queda.

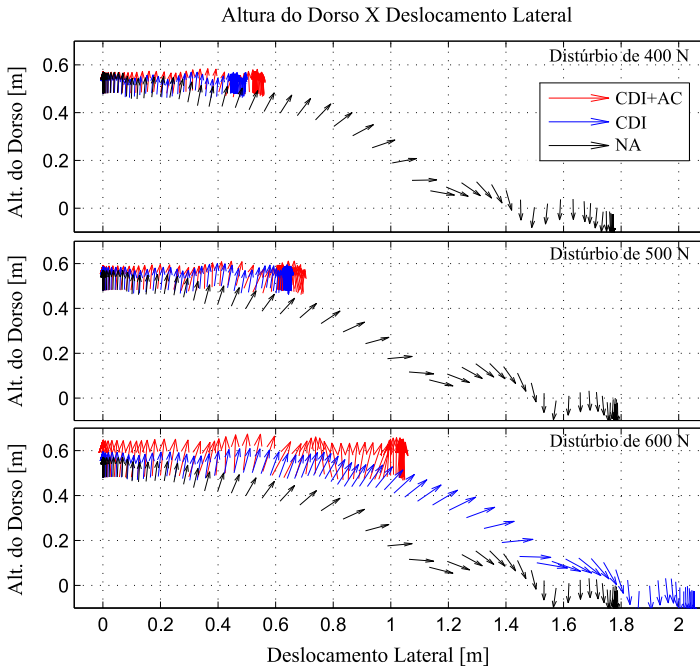


Figura 6.17: Resultados de simulação para diferentes forças de distúrbio aplicadas lateralmente ao dorso. As setas representam o eixo z do sistema de coordenadas da base do robô e ilustram o movimento do dorso (deslocamento lateral, altura do dorso e ângulo de rotação) após o distúrbio lateral. As setas que atingem uma altura para o dorso igual a zero indicam a perda do equilíbrio, ou seja, uma queda.

6.5.2 Resultados Experimentais

Para o teste experimental do controlador de distúrbios utilizou-se um sensor de força ATI Mini45 para medição da força de distúrbio aplicada ao robô. O sensor é posicionado no centro de uma barra de alumínio que é fixada em uma das laterais do robô. Com o sensor IMU do robô adquire-se a posição angular de rotação como o sinal de saída do experimento. O resultado dos experimentos está apresentado na Figura 6.18.

Observando os resultados da Figura 6.18, verifica-se que o robô suporta forças de distúrbio mais elevadas (pico de força de 500 N em $t=0,5s$) quando o controlador de distúrbio está ligado. Quando o controlador de distúrbio está desligado, uma pequena força (pico de 200 N em $t=1,6s$) leva ao

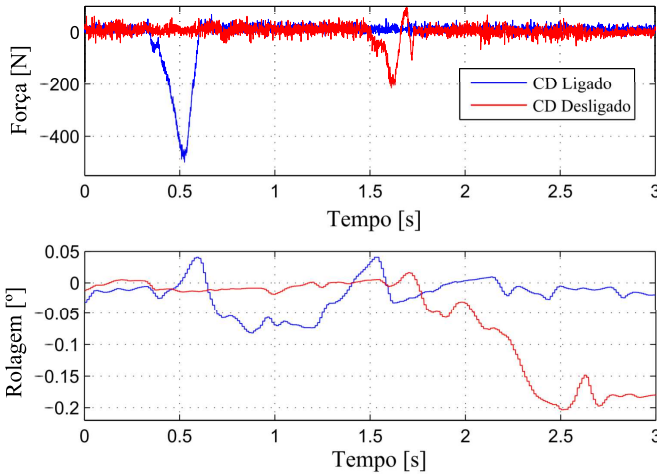


Figura 6.18: Resultados experimentais para o teste de distúrbio lateral: força de distúrbio lateral (acima) e ângulo de rolagem do dorso (abaixo) mostrados para as situações em que controlador de distúrbios está ligado (linhas em azul) e desligado (linhas em vermelho).

aumento do ângulo de rolagem, ou seja, o robô começa a cair. A partir de $t=2,5s$ as cordas do aparato de segurança suportam o robô, evitando a sua queda.

6.6 Síntese do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados resultados de simulação e experimentais da aplicação do sistema de controle reativo proposto para a realização da locomoção da plataforma robótica *HyQ*.

Em um primeiro cenário, abrangendo a locomoção em terrenos planos, a capacidade de modulação independente e direta dos parâmetros do caminhar, do ponto de vista da manutenção da postura e da movimentação do robô, foi verificada. Além disso, foram apresentados resultados experimentais para uma tarefa de rastreamento de alvo em que a capacidade de modulação independente e direta é utilizada para o controle de velocidade e controle de guinada do robô *HyQ*. Os resultados relacionados a tarefa de rastreamento de alvo confirmaram a versatilidade e o potencial de implementação do sistema de controle reativo proposto.

Com base nos resultados da locomoção em terreno inclinado, verificou-se a funcionalidade e importância do bloco do controlador de distúrbio na

melhora da robustez da locomoção. As ações realizadas pelo robô, provenientes do controlador de distúrbio, apresentam-se na forma de reações naturais (como o deslocamento do dorso para frente durante uma subida) e aumentam a capacidade do robô em atravessar superfícies inclinadas, sobretudo, sem o conhecimento prévio da inclinação. Quando o ajuste de postura e a adaptação das trajetórias são realizados para a locomoção em terrenos inclinados, terrenos com níveis elevados de inclinação podem ser atravessados.

Verificou-se que a estratégia de geração de trajetórias adaptativa baseada em CPG aumenta a capacidade do robô em atravessar terrenos irregulares. Sem a geração adaptativa, o robô *HyQ* mostrou-se incapaz de atravessar terrenos irregulares com desníveis da ordem de 25% da capacidade de extensão da suas pernas.

Na última seção do capítulo, a manutenção do equilíbrio foi analisada frente à presença de perturbações externas aplicadas sobre o dorso. De acordo com os resultados de simulação, sem a utilização do controlador de distúrbios, o robô é capaz de manter o equilíbrio apenas após distúrbios da ordem de $100N$. Quando o sistema de controle reativo proposto é plenamente utilizado, o robô *HyQ* é capaz de suportar perturbações externas seis vezes mais elevadas (da ordem de $600 N$). Os resultados experimentais da aplicação de perturbações externas sobre o dorso também verificaram o acréscimo de robustez adicionado pelo controlador de distúrbios.

Capítulo 7

Conclusões

Ao longo desta tese foi apresentada a proposta de um sistema de controle reativo para locomoção de robôs quadrúpedes em terrenos planos, planos inclinados e irregulares. O estudo aborda a locomoção quadrúpede com uma perspectiva baseada em três fundamentos: a geração de movimento, o controle de movimento e a integração não-conflitante.

No decorrer dos capítulos, cada bloco componente do sistema de controle reativo foi detalhado, sendo que a funcionalidade de cada bloco foi discutida e analisada a partir de resultados de simulação e experimentais.

No que tange a geração de padrões de marcha para robôs quadrúpedes, apresentou-se uma proposta de geração de referências baseada em Geradores Centrais de Padrões (CPGs), migrando o paradigma de geração do espaço de juntas para o espaço da tarefa. A mudança de espaço permitiu unir os benefícios da geração inspirada em CPGs com as facilidades do planejamento de trajetórias no espaço da tarefa. Com a proposta do oscilador elíptico como base para a geração das referências, grande parte dos inconvenientes da geração inspirada em CPGs tradicional foram contornadas. A modulação dos padrões de marcha é realizada de um modo simples, direto e independente, em que os parâmetros de ajuste envolvidos estão explicitamente associados aos parâmetros do caminhar que se deseja modular (como a altura do passo, o comprimento do passo, a frequência do passo, o fator cíclico e o padrão de marcha).

O bloco de ajuste cinemático, criado a partir do conceito do sistema de coordenadas horizontal, é o elemento do sistema de controle reativo que permite a integração não-conflitante entre os algoritmos envolvidos na geração de movimento e os algoritmos envolvidos no controle do movimento. O ajuste cinemático permite:

- Desacoplar o controle de atitude do dorso e o controle de posicionamento das patas;

- Reduzir o escorregamento ou perda de contato da pata com o solo;
- Reduzir as forças de contato excessivas com o solo;
- Aumentar a capacidade do robô na manutenção do equilíbrio frente a perturbações externas.

No capítulo do controle de movimento, propôs-se uma estratégia de controle para o dorso baseada na projeção de espaço nulo. Um estudo comparativo entre a abordagem de controle baseada em espaço nulo e a abordagem baseada na restrição de movimento foi realizado. Mostrou-se como cada solução para os torques nas juntas afeta o movimento de locomoção e a robustez de cada estratégia frente a violação de premissas. Em suma, o método de resolução escolhido para a inversa generalizada do Jacobiano possui influência direta sobre a norma do vetor solução de torques nas juntas, sobre a orientação dos vetores de força de reação do solo e sobre a indução de oscilação do dorso durante o caminhar. Ao fim, a estratégia de controle baseada no espaço nulo foi escolhida para compor o bloco do controlador do dorso por apresentar melhores respostas frente a situações em que existe a perda de contato da pata com o solo.

Juntamente com a estratégia de geração de padrões e de ajuste cinemático, o bloco do controlador de distúrbios é uma das contribuições mais significantes da tese. O bloco do controlador de distúrbios, rejeitando perturbações laterais, frontais e rotacionais de guinada, aparece como uma estratégia ímpar para a rejeição de distúrbios e o controle de movimento presente na literatura de robôs quadrúpedes. Um dos principais objetivos desta tese foi de evidenciar a importância e a funcionalidade de algoritmos como o controlador de distúrbios na manutenção do equilíbrio e controle da locomoção. Como apresentado e verificado por meio dos resultados de simulação, o controlador de distúrbio permite:

- Reduzir o erro de movimentação sobre a velocidade de avanço desejada;
- Aumentar a robustez da locomoção permitindo atravessar terrenos com maiores níveis de inclinação *sem o conhecimento da inclinação do terreno*, ou seja, sem o ajuste de trajetórias e da postura;
- Conduzir o dorso a posturas que evitam o capotamento/tombamento durante frenagens e acelerações;
- Rejeitar distúrbios externos elevados da ordem de 600 N.

Muitos trabalhos da literatura concentram-se na estabilização do movimento de locomoção por meio de abordagens que estabilizam o dorso durante a fase de suporte. Visto os resultados obtidos nesta tese, concluiu-se que o bloco de controle de distúrbios, o qual exerce influência no posicionamento das patas, é tão importante quanto o bloco de controle do dorso. Assim, sugere-se uma maior atenção ao estudo de algoritmos responsáveis por fornecer pontos de apoio para as patas que conduzem à estabilização ou controle do movimento.

A efetividade do sistema de controle reativo foi verificada experimentalmente e as vantagens da abordagem proposta foram exploradas em diferentes trabalhos. Em [7] a facilidade da modulação direta e independente dos parâmetros do caminhar, aliado a um sistema de visão computacional, agregou ao robô *HyQ* relativa autonomia sendo capaz de rastrear um objeto de interesse e ajustar a altura do passos e o fator cíclico de acordo com o grau de irregularidade do terreno. Em [31] funções de reflexo são geradas para as pernas de modo a superar problemas de impacto frontal das patas com os obstáculos. Esta proposta de inserção de reflexo explora os benefícios da geração de referências do sistema de controle reativo que é realizada no espaço da tarefa.

A partir do estágio realizado em 2012, o sistema de controle reativo proposto nesta tese se tornou o algoritmo utilizado para a geração e controle da locomoção do robô *HyQ* do *Istituto Italiano di Tecnologia*. Posto que os projetos *Bigdog* e *LS3* fomentados pela Agencia Nacional de Defesa dos Estados Unidos (DARPA) têm exclusivo cunho militar com informações sigilosas, o robô *HyQ* apresenta desempenho que é considerado referência dentre os resultados encontrados no estado da arte no âmbito acadêmico-científico.

7.1 Perspectiva de trabalhos futuros

Como problemas para trabalhos futuros, listam-se os seguintes:

- Explorar o sistema de controle reativo para a realização de locomoção a partir de padrões dinamicamente estáveis, com fator cíclico inferior a 0,5, que apresentam fase de movimento balístico do dorso (como o trote, o passo e o galope);
- Estudar um modo de reduzir a influência do erro de seguimento de trajetória das patas na adaptação das trajetórias para locomoção em terrenos irregulares;
- Durante os experimentos com o robô *HyQ* verificou-se que a geração de trajetórias adaptativa é efetiva frente a superfícies irregulares imóveis, nas quais o ponto de apoio se mantém ao longo da fase de suporte. No entanto, para o caso do apoio sobre superfícies movediças (por exemplo, sobre pedras que podem rolar), o desempenho relacionado a manutenção da postura e da velocidade de avanço é substancialmente degradado. Assim, sugere-se o desenvolvimento de uma geração de trajetórias adaptativa para locomoção em superfícies irregulares estáticas e movediças;
- Para o controlador de distúrbio, propôs-se um tempo de estabilização associado ao tempo da fase de suporte da perna. Porém, uma análise mais detalhada da resposta do robô para tempos de estabilização superiores e, principalmente, inferiores ao tempo da fase de suporte é de grande interesse;

- Obter um sistema de controle reativo que apresente integração não-conflitante não apenas para movimentos de rolagem e arfagem, mas também para movimentos de translação do dorso;
- Agregar maior percepção ao sistema de controle reativo. Por exemplo, identificação da inclinação da superfície de deslocamento a partir da cinemática do robô e da orientação do dorso, para adaptação das trajetórias e ajuste da postura na travessia de superfícies inclinadas.

Referências

Bibliográficas

- [1] J. A. Acebrón, L. L. Bonilla, C. J. Pérez Vicente, F. Ritort, and R. Spigler. The kuramoto model: A simple paradigm for synchronization phenomena. *Reviews of Modern Physics*, 77(1):137–185, 2005.
- [2] M. Ajallooeian, S. Pouya, A. Sproewitz, and A. Ijspeert. Central pattern generators augmented with virtual model control for quadruped rough terrain locomotion. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation - ICRA*, Karlsruhe/German, 2013.
- [3] D. E. Angelaki and K. E. Cullen. Vestibular system: The many facets of a multimodal sense. *Annual Review of Neuroscience*, 31:125–150, 2008.
- [4] J. C. Arevalo and E. Garcia. Impedance control for legged robots: An insight into the concepts involved. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 42(6):1400–1411, 2012.
- [5] S. Bai, K. H. Low, and W. Guo. Kinematographic experiments on leg movements and body trajectories of cockroach walking on different terrain. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation - ICRA*, volume 3, pages 2605–2610, San Francisco/USA, 2000.
- [6] V. Barasuol, J. Buchli, C. Semini, M. Frigerio, E. R. De Pieri, and D. G. Caldwell. A reactive controller framework for quadrupedal locomotion on challenging terrain. Karlsruhe/German, 2013.
- [7] S. Bazeille, V. Barasuol, M. Focchi, I. Havoutis, M. Frigerio, B. Jonas, C. Semini, and D. G. Caldwell. Vision enhanced reactive locomotion control for trotting on rough terrain. Woburn/USA, 2013.

- [8] I. I. Blekhman, P. S. Landa, and M. G. Rosenblum. Synchronization and chaotization in interacting dynamical systems. *Applied Mechanics Reviews*, 48(11):733–752, 1995.
- [9] M. Bloesch, M. Hutter, MH Hoepflinger, C. D. Remy, C. Gehring, and R. Siegwart. State estimation for legged robots-consistent fusion of leg kinematics and imu. In *Proceedings of Robotics: Science and Systems*, 2012.
- [10] T. Boaventura, C. Semini, J. Buchli, M. Frigerio, M. Focchi, and D.G. Caldwell. Dynamic torque control of a hydraulic quadruped robot. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation - ICRA*, pages 1889–1894, Saint Paul/USA, 2012.
- [11] S. A. Bowling. Animal locomotion
<http://bowlingsite.mcf.com/Movement/locoindex.html>, 17/06/2013.
- [12] R. Brown and L. Kocarev. A unifying definition of synchronization for dynamical systems. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 10(2):344–349, 2000.
- [13] T. G. Brown. The intrinsic factors in the act of progression in the mammal. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character*, 84(572):308–319, 1911.
- [14] T. G. Brown. The factors in rhythmic activity of the nervous system. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character*, 85(579):278–289, 1912.
- [15] J. T. Buchanan and S. Grillner. Newly identified 'glutamate interneurons' and their role in locomotion in the lamprey spinal cord. *Science*, 236(4799):312–314, 1987.
- [16] J. Buchli, M. Kalakrishnan, M. Mistry, P. Pastor, and S. Schaal. Compliant quadruped locomotion over rough terrain. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems - IROS*, pages 814–820, St. Louis/USA, 2009.
- [17] J. Buchli, J. Pratt, and N. Roy. Editorial - special issue on legged locomotion. *International Journal of Robotics Research*, 30(2), 2011.
- [18] J. Buchli, L. Righetti, and A. Ijspeert. Engineering entrainment and adaptation in limit cycle systems. *Biological Cybernetics*, 95:645–664, 2006. 10.1007/s00422-006-0128-y.
- [19] J. Buchli, F. Stulp, E. Theodorou, and S. Schaal. Learning variable impedance control. *The International Journal of Robotics Research*, 30(7):820–833, 2011.

- [20] J. Buchli, E. Theodorou, F. Stulp, and S. Schaal. Variable impedance control - a reinforcement learning approach. In *Robotics: Science and Systems Conference (RSS)*. Citeseer, 2010.
- [21] J. M Cabelguen, C. Bourcier-Lucas, and R. Dubuc. Bimodal locomotion elicited by electrical stimulation of the midbrain in the salamander *notophthalmus viridescens*. *The Journal of Neuroscience*, 23(6):2434–2439, 2003.
- [22] N. Chen. Dfield/pplane user’s manual, 2004.
- [23] J. W. Chung, I. H. Lee, B. K. Cho, and J. H. Oh. Posture stabilization strategy for a trotting point-foot quadruped robot. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, pages 1–17, 2013.
- [24] J. Collins and I. Stewart. Coupled nonlinear oscillators and the symmetries of animal gaits. *Journal of Nonlinear Science*, 3:349–392, 1993. 10.1007/BF02429870.
- [25] Boston Dynamics Corp. Bigdog - the most advanced rough-terrain robot on earth. <http://www.bostondynamics.com>, 17/06/2013.
- [26] Boston Dynamics Corp. Ls3 - legged squad support systems, 17/06/2013.
- [27] D. C. De Campos, C. A. D. Bezerra, D. E. Zampieri, and A. Mendeleck. Modelagem e simulação de um robô bípede. In *Proc. COBEM 2001 - XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, pages 92–99, 2001.
- [28] M. F. dos Santos Silva. *Sistemas Robóticos de Locomoção Multipernas*. PhD thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005.
- [29] T. Drew. Neuronal mechanisms for the adaptive control of locomotion in the cat. In *Proceedings of Adaptive Motion of Animals and Machines*, pages 1–12, Montreal/Canada, 2000.
- [30] F. El Hafi and P. Gorce. Walking dynamic control under unknown perturbation. In *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, volume 4, pages 3538–3543, 1998.
- [31] M. Focchi, V. Barasuol, I. Havoutis, B. Jonas, C. Semini, and D. G. Caldwell. Local reflex generation for obstacle negotiation in quadrupedal locomotion. Sydney/Australia, 2013.
- [32] M. Focchi, T. Boaventura, C. Semini, M. Frigerio, J. Buchli, and D. G Caldwell. Torque-control based compliant actuation of a quadruped robot. In *12th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control - AMC*, pages 1–6. IEEE, 2012.

- [33] E. Garcia, J. Estremera, and P. G. de Santos. A comparative study of stability margins for walking machines. *Robotica*, 20:595–606, 2002.
- [34] J. F. Gardner. Force distribution in walking machines over rough terrain. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 113(4):754–758, 1991.
- [35] J. F. Gardner, K. Srinivasan, and K. J. Waldron. A solution for the force distribution problem in redundantly actuated closed kinematic chains. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 112(3):523–526, 1990.
- [36] Y. Geva and A. Shapiro. A combined potential function and graph search approach for free gait generation of quadruped robots. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation - ICRA*, pages 5371–5376, Saint Paul/USA, 2012.
- [37] P. Gonzales de Santos, E. Garcia, and J. Estremera. *Quadrupedal Locomotion*. Springer, 2006.
- [38] P. Gonzales de Santos and M. A. Jiménez. Generation of discontinuous gaits for quadruped walking vehicles. *Journal of Robotics Systems*, (9):599–611, 1995.
- [39] S. Grillner. Neurobiological bases of rhythmic motor acts in vertebrates. *Science*, 228(4696):143–149, 1985.
- [40] S. Grillner. Biological pattern generation: The cellular and computational logic of networks in motion. *Neuron*, 52:751–766, 2006.
- [41] D. Gu and H. Hu. Reinforcement learning of fuzzy logic controllers for quadruped walking robots. In *15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain*, 2002.
- [42] S. Harmeling and D. Eckstein. Global climate risk index 2013. 2012.
- [43] N. C. Heglund and C. R. Taylor. Speed, stride frequency and energy cost per stride: How do they change with body size and gait? *Journal of Experimental Biology*, 138(1):301–318, 1988.
- [44] S. Hirose, H. Tsukagoshi, and K. Yoneda. Normalized energy stability margin: generalized stability criterion for walking vehicles. pages 71–76, 1998.
- [45] A. L. Hodgkin and A. F. Huxley. Currents carried by sodium and potassium ions through the membrane of the giant axon of loligo. *The Journal of physiology*, 116(4):449, 1952.

- [46] A. Ijspeert. Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review. *Neural Networks*, 21(4):642–653, May 2008.
- [47] A. Irawan and K. Nonami. Optimal impedance control based on body inertia for a hydraulically driven hexapod robot walking on uneven and extremely soft terrain. *Journal of Field Robotics*, 28(5):690–713, 2011.
- [48] S. Kajita, T. Yamaura, and A. Kobayashi. Dynamic walking control of a biped robot along a potential energy conserving orbit. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 8(4):431–438, 1992.
- [49] M. Kalakrishnan, J. Buchli, P. Pastor, M. Mistry, and S. Schaal. Learning, planning, and control for quadruped locomotion over challenging terrain. *The International Journal of Robotics Research*, 30(2):236–258, 2011.
- [50] O. Khatib. A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation. *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, 3(1):43–53, February 1987.
- [51] T. Koolen, T. De Boer, J. Rebula, A. Goswami, and J. Pratt. Capturability-based analysis and control of legged locomotion, part 1: Theory and application to three simple gait models. *The International Journal of Robotics Research*, 31(9):1094–1113, 2012.
- [52] N. Koyachi, H. Adachi, T. Nakamura, and E. Nakano. Stair-climbing control of self-contained hexapod with semi-fixed gait. In *Fifth International Conference on Advanced Robotics - ICAR*, volume 1, pages 747–752, Pisa/Italy, 1991.
- [53] N. Koyachi, T. Arai, H. Adachi, A. Murakami, and K. Kawai. Mechanical design of hexapods with integrated limb mechanism: Melmantis-1 and melmantis-2. In *8th International Conference on Advanced Robotics - ICAR*, pages 273–278, Monterey/USA, 1997.
- [54] E. I. Kugushev. Problems of selecting a gait for an integrated locomotion robot. pages 789–793, 1975.
- [55] S. Laksanacharoen, A.J. Pollack, G.M. Nelson, R.D. Quinn, and R.E. Ritzmann. Biomechanics and simulation of cricket for microrobot design. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation - ICRA*, volume 2, pages 1088–1094, San Francisco/USA, 2000.
- [56] C. Liu, Q. Chen, and J. Zhang. Coupled van der pol oscillators utilised as central pattern generators for quadruped locomotion. In *Control and Decision Conference - CCDC*, pages 3677–3682, Guilin/China, 2009.

- [57] C. Liu, Y. Chen, J. Zhang, and Q. Chen. Cpg driven locomotion control of quadruped robot. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics - SMC*, pages 2368–2373, Anchorage/Alaska, 2009.
- [58] C. J. Liu, Q. J. Chen, and D. W. Wang. Cpg-inspired workspace trajectory generation and adaptive locomotion control for quadruped robots. volume PP, pages 1–14, Anchorage/Alaska, 2011.
- [59] M. Matsugu, J. Duffin, and C. S. Poon. Entrainment, instability, quasi-periodicity, and chaos in a compound neural oscillator. *Journal of Computational Neuroscience*, 5:35–51, 1998. 10.1023/A:1008826326829.
- [60] Kiyotoshi Matsuoka. Mechanisms of frequency and pattern control in the neural rhythm generators. *Biological Cybernetics*, 56:345–353, 1987. 10.1007/BF00319514.
- [61] C. Maufroy, H. Kimura, and K. Takase. Towards a general neural controller for quadrupedal locomotion. *Neural Networks*, 21(4):667–681, 2008.
- [62] R. B. McGehee and A. A. Frank. On the stability properties of quadruped creeping gaits. *Mathematical Biosciences*, 3:331 – 351, 1968.
- [63] R. B. Mcghee and G. I. Iswandhi. Adaptive locomotion of a multilegged robot over rough terrain. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 9(4):176–182, 1979.
- [64] D. A. Messuri. *Optimization of the locomotion of a legged vehicle with respect to maneuverability*. PhD thesis, Ohio State Univ., Columbus, 1985.
- [65] M. Mistry, J. Buchli, and S. Schaal. Inverse dynamics control of floating base systems using orthogonal decomposition. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation - ICRA*, pages 3406–3412, Anchorage/Alaska, 2010. IEEE.
- [66] M. Mistry, J. Nakanishi, G. Cheng, and S. Schaal. Inverse kinematics with floating base and constraints for full body humanoid robot control. In *8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pages 22–27, South Korea, 2008. IEEE.
- [67] E. Muybridge. *Animals in Motion*. Dover Publications, Incorporated, 1957.
- [68] J. Nagumo, S. Arimoto, and S. Yoshizawa. An active pulse transmission line simulating nerve axon. In *Proceedings of the IRE*, pages 2061–2070, 1962.

- [69] G. M. Nelson and R. D. Quinn. Posture control of a cockroach-like robot. *Control Systems, IEEE*, 19(2):9–14, 1999.
- [70] G. M. Nelson, R. D. Quinn, R. J. Bachmann, W. C. Flannigan, R. E. Ritzmann, and J. T. Watson. Design and simulation of a cockroach-like hexapod robot. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation - ICRA*, volume 2, pages 1106–1111, Albuquerque/New Mexico, 1997.
- [71] UOL Notícias. Catástrofes naturais registradas em 2012, 2012.
- [72] M. Oliveira, C. Santos, M. Ferreira, L. A. Costa, and A. M. A. C. Rocha. Locomotion gait optimization for a quadruped robot. 2010.
- [73] J. Park and O. Khatib. Contact consistent control framework for humanoid robots. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation - ICRA*, pages 1963–1969, Orlando/USA, 2006.
- [74] J. Park and J. H. Park. Impedance control of quadruped robot and its impedance characteristic modulation for trotting on irregular terrain. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems - IROS*, pages 175–180, Vilamoura/Portugal, 2012.
- [75] J. Pratt, C.-M. Chew, A. Torres, P. Dilworth, and G. Pratt. Virtual model control: An intuitive approach for bipedal locomotion. *The International Journal of Robotics Research*, 20(2):129–143, 2001.
- [76] J. Pratt, A. Torres, P. Dilworth, and G. Pratt. Virtual actuator control. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems - IROS*, volume 3, pages 1219–1226 vol.3, Osaka/Japan, 1996.
- [77] J. E. Pratt. *Virtual Model Control of a Biped Walking Robot*. PhD thesis, 1996.
- [78] C. Queiroz, N. Gonçalves, and P. Menezes. A study on static gaits for a for leg robot. In *International Conference on Control - UKACC*, 2000.
- [79] M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, R. Playter, and the Big-Dog Team. Bigdog, the rough-terrain quadruped robot. South Korea, 2008.
- [80] M. Raibert, M. Chepponis, and Jr. Brown, H. Running on four legs as though they were one. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 2(2):70–82, 1986.
- [81] M. H. Raibert. *Legged Robots That Balance*. The MIT Press, 1986.

- [82] M. H. Raibert. Trotting, pacing and bounding by a quadruped robot. *Journal of Biomechanics*, 23(Supplement 1):79–81, 1990.
- [83] L. Rayleigh. *The Theory of Sound*. Macmillan, London, 3rd edition, 1896.
- [84] C. Ridderstrom and J. Ingvast. Quadruped posture control based on simple force distribution - a notion and a trial. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems - IROS*, volume 4, pages 2326–2331, Maui/USA, 2001.
- [85] L. Righetti, J. Buchli, M. Mistry, M. Kalakrishnan, and S. Schaal. Using torque redundancy to optimize contact forces in legged robots. In *Redundancy in Robot Manipulators and Multi-Robot Systems*, pages 35–51. Springer, 2013.
- [86] L. Righetti and A.J. Ijspeert. Pattern generators with sensory feedback for the control of quadruped locomotion. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation - ICRA*, pages 819–824, Pasadena/California, 2008.
- [87] S. Rutishauser, A. Sprowitz, L. Righetti, and A.J. Ijspeert. Passive compliant quadruped robot using central pattern generators for locomotion control. In *IEEE RAS EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics - BioRob*, pages 710–715, Scottsdale/USA, 2008.
- [88] S. Schaal. The sl simulation and real-time control software package. *University of Southern California*, 2009.
- [89] C. Semini. *HyQ - Design and Development of a Hydraulically Actuated Quadruped Robot*. PhD thesis, Genova, Italia, 2010.
- [90] C. Semini, N. G. Tsagarakis, E. Guglielmino, M. Focchi, F. Cannella, and D. G. Caldwell. Design of hyq - a hydraulically and electrically actuated quadruped robot. *Proceedings of ImechE Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2011.
- [91] L. Sentis. *Synthesis and control of whole-body behaviors in humanoid systems*. PhD thesis, Stanford, CA, USA, 2007. AAI3281945.
- [92] L. Sentis and O. Khatib. Control of free-floating humanoid robots through task prioritization. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation - ICRA*, pages 1718 – 1723, Barcelona/Spain, april 2005.
- [93] L. Sentis and O. Khatib. Synthesis of whole-body behaviors through hierarchical control of behavioral primitives. *International Journal of Humanoid Robotics*, 2(4):505–518, 2005.

- [94] X. Shao, Y. Yang, Y. Zhang, and W. Wang. Trajectory planning and posture adjustment of a quadruped robot for obstacle striding. In *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics - ROBIO*, pages 1924–1929, Phuket Island/Thailand, 2011.
- [95] A. Shkolnik and R. Tedrake. Inverse kinematics for a point-foot quadruped robot with dynamic redundancy resolution. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation - ICRA*, pages 4331–4336, Roma/Italy, 2007. IEEE.
- [96] R. Siegwart and I. R. Nourbakhsh. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. MIT Press, 2004.
- [97] M. F. Silva. Quadruped robot optimization using a genetic algorithm. In *Proceedings of CLAWAR 2011*, Paris/França, 2011.
- [98] M. F. Silva, J. A. Tenreiro Machado, and A. M. Lopes. Modelling and simulation of artificial locomotion systems. *Robotica*, 23(05):595–606, 2005.
- [99] D. Son, D. Jeon, W. C. Nam, D. Chang, T. Seo, and J. Kim. Gait planning based on kinematics for a quadruped gecko model with redundancy. *Robotics and Autonomous Systems*, 58(5):648–656, 2010.
- [100] S.-M. Song and K. J. Waldron. *Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1988.
- [101] R. B. Stein, K. V. Leung, D. Mangeron, and M. N. Oguztörel. Improved neuronal models for studying neural networks. *Biological Cybernetics*, 15:1–9, 1974. 10.1007/BF00270755.
- [102] G. S. Stent, W. B. Kristan, W. O. Friesen, C. A. Ort, M. Poon, and R. L. Calabrese. Neuronal generation of the leech swimming movement. *Science*, 200(4348):1348–1357, 1978.
- [103] D. G. Stuart and H. Hultborn. Thomas graham brown, anders lundberg, and the neural control of stepping. *Brain Research Reviews*, 59(1):74–95, 2008.
- [104] D. J. Todd. *Walking machines: an introduction to legged robots*. Kogan Page, 1985.
- [105] A. L. Torres. Virtual model control of a hexapod walking robot. Technical report, Cambridge, MA, USA, 1996.
- [106] K.-Y. Tu, T.-T. Lee, C.-H. Wang, and C.-A. Chang. Design of fuzzy walking pattern (fwp) for a shape memory alloy (sma) biped robot. In *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, volume 4, pages 3266–3271, San Diego/USA, 1998.

- [107] B. Van der Pol and J. Van der Mark. The heartbeat considered as a relaxation oscillation, and an electrical model of the heart. *Philosoph Magazine*, 6:763–775, 1928.
- [108] J. Villanova, J.-C. Guinot, P. Neveu, and J.-P. Gasc. Quadrupedal mammal locomotion dynamics 2d model. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems - IROS*, volume 3, pages 1785–1790, Takamatsu/Japan, 2000.
- [109] C. Villard, P. Gorce, J. Fontaine, and J. Rabit. Ralphy: a dynamic study of a quadruped robot. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pages 106–111, 1993.
- [110] B. Wang, R. Hu, X. Zhang, and C. Huai. Gait planning and intelligent control for a quadruped robot. *Journal of Control Theory and Applications*, 7:207–211, 2009. 10.1007/s11768-009-7252-x.
- [111] Q.-D. Wu, C.-J. Liu, J.-Q. Zhang, and Q.-J. Chen. Survey of locomotion control of legged robots inspired by biological concept. *Science in China Series F: Information Sciences*, 52:1715–1729, 2009. 10.1007/s11432-009-0169-7.
- [112] S. Yi. Reliable gait planning and control for miniaturized quadruped robot pet. *Mechatronics*, 20(4):485–495, 2010.
- [113] S. Yi. Impedance control for body motion of quadruped robot. In T.-H. Kim, A. Stoica, W.-C. Fang, T. Vasilakos, J. G. Villalba, K. P. Arnett, M. K. Khan, and B.-H. Kang, editors, *Computer Applications for Security, Control and System Engineering*, volume 339 of *Communications in Computer and Information Science*, pages 190–197. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [114] H. Yuasa and M. Ito. Coordination of many oscillators and generation of locomotory patterns. *Biological Cybernetics*, 63:177–184, 1990. 10.1007/BF00195856.
- [115] G.-H. Yuk, W.-H. Cho, and H.-S. Yang. Practical implementation of the normalized dynamic energy stability margin for wheeled robots. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13:49–56, 2012.
- [116] C.-D. Zhang and S.-M. Song. Gaits and geometry of a walking chair for the disabled. *Journal of Terramechanics*, 26(3-4):211–233, 1989.
- [117] C.-D. Zhang and S.-M. Song. Stability analysis of wave-crab gaits of a quadruped. *Journal of Robotic Systems*, 7(2):243–276, 1990.
- [118] T. Zhang, Q. Wei, and H. Ma. Position/force control for a single leg of a quadruped robot in an operation space. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10(137), 2013.

Apêndice A - Análise do Oscilador Elíptico

O objetivo deste apêndice é a demonstração de que o raio e a frequência angular do ciclo limite elíptico, proposto no Capítulo 4, possuem um comportamento dinâmico estável e bem definido.

Assim, considere o sistema de equações diferenciais que rege o comportamento do ciclo limite elíptico:

$$\dot{x} = \left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}\right)x + \frac{wa}{b}y \quad (7.1)$$

$$\dot{y} = \left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}\right)y - \frac{wb}{a}x \quad (7.2)$$

Para obter o sistema acima em função do raio e da frequência angular é realizada uma transformação para um sistema de coordenadas polares. Para tal, utilizam-se as seguintes relações:

$$x = r\cos(\theta) \quad (7.3)$$

$$y = r\sin(\theta) \quad (7.4)$$

$$\dot{x} = \dot{r}\cos(\theta) - r\sin(\theta)\dot{\theta} \quad (7.5)$$

$$\dot{y} = \dot{r}\sin(\theta) + r\cos(\theta)\dot{\theta} \quad (7.6)$$

onde r e θ são as variáveis do sistema de coordenadas polares.

Para simplificar a escrita, é utilizada a seguinte notação:

$$\cos(\theta) = C_\theta \quad (7.7)$$

$$\sin(\theta) = S_\theta \quad (7.8)$$

O raio de uma elipse com semi-eixos a e b é descrito no sistema de coordenadas polares como:

$$r_o = \frac{ab}{\sqrt{a^2 S_\theta^2 + b^2 C_\theta^2}} \quad (7.9)$$

A variação de r_o no tempo depende de $\dot{\theta}$ e é obtido por:

$$\dot{r}_o = -r_o \frac{S_\theta C_\theta (a^2 - b^2)}{a^2 S_\theta^2 + b^2 C_\theta^2} \dot{\theta} \quad (7.10)$$

A partir de então, demonstra-se a convergência de r para r_o . Substituindo as equações 7.3-7.6 nas equações 7.1 e 7.2, vêm:

$$\dot{r}C_\theta - rS_\theta\dot{\theta} = \left(1 - \frac{r^2 C_\theta^2}{a^2} - \frac{r^2 S_\theta^2}{b^2}\right) rC_\theta + wrS_\theta \frac{a}{b} \quad (7.11)$$

$$\dot{r}S_\theta + rC_\theta\dot{\theta} = \left(1 - \frac{r^2 C_\theta^2}{a^2} - \frac{r^2 S_\theta^2}{b^2}\right) rS_\theta + wrC_\theta \frac{b}{a} \quad (7.12)$$

Utilizando a relação da equação 7.9 pode-se reescrever 7.11 e 7.12 como:

$$\dot{r}C_\theta - rS_\theta\dot{\theta} = \left(1 - \frac{r^2}{r_o^2}\right) rC_\theta + wrS_\theta \frac{a}{b} \quad (7.13)$$

$$\dot{r}S_\theta + rC_\theta\dot{\theta} = \left(1 - \frac{r^2}{r_o^2}\right) rS_\theta + wrC_\theta \frac{b}{a} \quad (7.14)$$

Multiplicando-se a Equação 7.13 por $b^2 \cos(\theta)$ e a Equação 7.14 por $a^2 \sin(\theta)$ em ambos os lados, e somando-se os dois resultados obtém-se:

$$\dot{r}(a^2 S_\theta^2 + b^2 C_\theta^2) + rS_\theta C_\theta (a^2 - b^2) \dot{\theta} = \left(1 - \frac{r^2}{r_o^2}\right) r(a^2 S_\theta^2 + b^2 C_\theta^2) \quad (7.15)$$

Por fim, o resultado da Equação 7.15 pode ser reescrito como:

$$\dot{r} = \left(1 - \frac{r^2}{r_o^2}\right) r - r \frac{S_\theta C_\theta (a^2 - b^2)}{a^2 S_\theta^2 + b^2 C_\theta^2} \dot{\theta} \quad (7.16)$$

O primeiro termo da Equação 7.16 tende a conduzir o valor de r para um valor correspondente à trajetória de referência r_o . O segundo termo, por sua vez, é análogo a Equação 7.10 e representa a derivada do raio com relação a θ de modo a guiar o valor de r dentro da órbita elíptica.

A dinâmica de θ é obtida pela multiplicação da Equação 7.13 por $-a \sin(\theta)$ e da Equação 7.14 por $ab \cos(\theta)$ em ambos os lados, e soma dos dois resultados:

$$\dot{\theta} = -w \left(S_\theta^2 \frac{a}{b} + C_\theta^2 \frac{b}{a} \right) \quad (7.17)$$

Analisando o resultado da Equação 7.17 verifica-se que a velocidade angular da elipse varia ao longo da trajetória. Devido à isso, a periodicidade da oscilação elíptica com relação a w não é clara. Porém, se ao invés de coordenadas polares for utilizado coordenadas paramétricas, onde $x = a \cos(\theta)$ e $y = b \sin(\theta)$, é possível verificar a relação de periodicidade $\dot{\theta} = -w$.

