

Rogério Eduardo Silva Santana

Projeto de um Robô Bípede para a Reprodução da Marcha Humana

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título
de Mestre em Engenharia

São Paulo

2005

Rogério Eduardo Silva Santana

Projeto de um Robô Bípede para a Reprodução da Marcha Humana

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título
de Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

São Paulo

2005

FICHA CATALOGRÁFICA

Santana, Rogério Eduardo Silva
Projeto de um robô bípede para reprodução da marcha
humana / R.E.S Santana. -- São Paulo, 2005.
p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Robôs (Projeto e construção; Protótipo) 2.Biomecânica
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia Mecânica II.t.

Aos meus pais

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury, pelo seu apoio, confiança e paciência, que foram fundamentais para a realização e finalização do presente trabalho.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Luciano Luporini Menegaldo, por oferecer a oportunidade de participar desse projeto grandioso e pelo suporte valioso.

Ao Prof. Dr. Tarcísio Antônio Hess Coelho, pelos conselhos e sugestões, de fundamental importância para a confecção do capítulo referente à modelagem cinemática do mecanismo paralelo.

Ao Prof. Dr. José Jaime da Cruz, pela compreensão e busca de recursos que tornaram possível a construção do robô.

Ao amigo Daniel Olioni Andersson pelas discussões e auxílio que contribuíram significativamente no trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT), ao Departamento de Engenharia Elétrica - Telecomunicações e Controle (PTC) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro para a construção do robô.

À minha família pelo constante apoio, especialmente nos momentos mais difíceis.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Símbolos

Resumo

Abstract

1. Introdução	1
1.1. Escopo do Trabalho	3
2. Revisão Bibliográfica.....	6
3. Projeto Conceitual.....	17
3.1. Introdução	17
3.2. Articulações.....	18
3.3. Seleção dos mecanismos responsáveis pelos movimentos articulares do robô	22
3.3.1. Mecanismo responsável pela cinemática articular do tornozelo	23
3.3.2. Mecanismo responsável pela cinemática articular do quadril	27
3.4. Ciclo da Marcha Humana	29
4. Análise cinemática dos mecanismos selecionados para o quadril e tornozelo ..	32
4.1. Equações que Definem a Cinemática de Posição.....	32
4.2. Cinemática Inversa.....	35
4.3. Matriz Jacobiana	36
4.4. Cinemática Direta	38
4.4.1. Método de Newton-Raphson	38
4.4.2. Interpolação Polinomial.....	40
4.4.3. Comparação dos Métodos.....	41
4.5. Cinemática de Velocidade e Aceleração	43
4.6. Espaço de Trabalho e Singularidades.....	44
4.6.1. Espaço de Trabalho.....	44
4.6.2. Singularidades	48
4.7. Determinação dos Parâmetros Dimensionais do Mecanismo	51

4.7.1. Índice de Transferência de Carregamento.....	53
4.7.2. Otimização dos Parâmetros Dimensionais	54
4.7.3. Resultados.....	55
4.7.4. Seleção da Melhor Solução	56
5. Modelagem Cinemática e Dinâmica do Robô Bípede.....	58
5.1. Modelo Cinemático.....	59
5.1.1. Cinemática Direta	65
5.1.1.1 Cinemática de Posição.....	66
5.1.1.2 Cinemática de Velocidade.....	71
5.1.1.3 Cinemática de Aceleração.....	74
5.1.2. Cinemática Inversa	74
5.2. Modelo Dinâmico.....	79
5.2.1. Formulação Dinâmica do Robô.....	80
5.2.1.1 Formulação Dinâmica Recursiva de Newton-Euler	83
5.2.1.2 Modelo da interação do robô com o solo.....	92
5.2.2. Dinâmica Direta	98
5.2.3. Dinâmica Inversa	100
6. Controle do Robô Bípede.....	103
6.1. Introdução	103
6.2. Atuador.....	105
6.2.1. Modelo Dinâmico do Atuador.....	105
6.2.2. Inclusão dos atuadores no modelo dinâmico do robô bípede.....	107
6.3. Projeto do Controlador	109
6.4. Planejamento de Trajetória	112
6.5. Simulações.....	118
6.5.1. Parâmetros	119
6.5.2. Resultados.....	121
7. Construção do Robô Bípede.....	127
7.1. Projeto Eletrônico	127
7.1.1. Atuador	127
7.1.2. Sensores.....	131
7.1.2.1 Sensores de inclinação	131
7.1.2.1.1 Acelerômetro ADXL202.....	132
7.1.2.1.2 Circuito de inclinação	134

7.1.2.1.3 Circuito de Multiplexação	143
7.1.2.2 Chaves Digitais	145
7.1.3. Placa de Aquisição Lynx CAD 12/36	145
7.2. Projeto Mecânico.....	147
7.3. Protótipo Construído.....	152
8. Conclusões	159
Referências Bibliográficas.....	162
APÊNDICE A	166

Lista de Figuras

Figura 2.1-Robô Bípede desenvolvido por Shih, (1996), (a) diagrama cinemático do robô e (b) protótipo construído.	8
Figura 2.2-Robô Bípede desenvolvido por Fujimoto, (1998).....	9
Figura 2.3-Robô bípede desenvolvido por Parseghian, (2000), (a) protótipo construído e (b) mecanismo paralelo selecionado para a articulação do tornozelo.....	11
Figura 2.4-Robô Bípede desenvolvido por Huang et al., (2001).	12
Figura 2.5-Robô bípede desenvolvido por Azevedo et al., (2003), (a) protótipo construído e (b) mecanismo paralelo selecionado para a articulação do tornozelo.	14
Figura 2.6-Robô Bípede desenvolvido por Wollherr et al., (2003).....	15
Figura 3.1-Comprimento médio de cada membro em relação à altura total do corpo (Winter, 1991).	18
Figura 3.2-Tornozelo Humano (Vaughan et al., 1992).....	19
Figura 3.3-Joelho Humano (Vaughan et al., 1992).	19
Figura 3.4-Quadril Humano (Vaughan et al., 1992).	20
Figura 3.5-Definição de planos de um corpo humano (Vaughan et al., 1992).....	20
Figura 3.6-Movimentos relacionados ao joelho (Vaughan et al., 1992).....	21
Figura 3.7-Esquema cinemático do robô.	22
Figura 3.8-Mecanismo paralelo proposto por Parseghian, (2000), para a articulação do tornozelo.	24
Figura 3.9-Mecanismo paralelo responsável pela cinemática articular do tornozelo.	25
Figura 3.10- Diagrama cinemático do mecanismo selecionado.	26
Figura 3.11- Mecanismo paralelo responsável pela cinemática articular do quadril.	28
Figura 3.12- Ciclo da marcha de um garoto normal de oito anos de idade (Vaughan et al., 1992).	29
Figura 3.13- Eventos durante o ciclo da marcha humana (Vaughan et al., 1992)....	31
Figura 4.1- Diagrama cinemático do mecanismo com a notação utilizada.	33

Figura 4.2- Fluxograma do método de Newton-Raphson.	39
Figura 4.3- Ângulos de flexão/extensão do pé em função dos ângulos dos atuadores.	42
Figura 4.4- Ângulos de inversão/eversão do pé em função dos ângulos dos atuadores.	42
Figura 4.5- Espaço de trabalho do mecanismo.....	45
Figura 4.6- Determinação dos ângulos das juntas esféricas.....	46
Figura 4.7- Espaço de trabalho real do mecanismo.....	47
Figura 4.8- Comparação entre os espaços de trabalho obtidos.....	47
Figura 4.9- Curvas de nível dos valores singulares mínimos da matriz J_x	49
Figura 4.10- Curvas de nível dos valores singulares mínimos da matriz J_q	50
Figura 4.11- Pontos de singularidades do mecanismo.	50
Figura 4.12- Ângulos referentes à articulação do tornozelo.....	51
Figura 4.13- Ângulos referentes à articulação do quadril.....	52
Figura 4.14- Marcha sobreposta ao espaço de trabalho.....	56
Figura 5.1- Arquitetura do robô bípede.....	58
Figura 5.2- Coordenadas generalizadas do robô bípede.	61
Figura 5.3- Dimensões relevantes do robô bípede.	63
Figura 5.4- Sistemas de coordenadas e coordenadas generalizadas utilizadas para a construção do modelo.....	64
Figura 5.5- Sistemas de coordenadas e vetores de posições associados a um ligamento i do robô.....	85
Figura 5.6-Diagrama de corpo livre do ligamento i	88
Figura 5.7-Diagrama de corpo livre do ligamento base do robô.....	91
Figura 5.8- Interação do ponto p_i do pé com o solo.	93
Figura 5.9- Interação do pé do robô com a superfície plana do solo.....	97
Figura 6.1- Controle adotado para o robô: acompanhamento de uma trajetória de referência	103

Figura 6.2- Malha de controle do sistema SISO utilizado para o projeto do controlador.	104
Figura 6.3- Motor DC acionando uma carga através de uma redução.....	105
Figura 6.4- Diagrama de blocos do motor de corrente contínua.	107
Figura 6.5- Sistema em malha fechada com a utilização de um controlador PID...	110
Figura 6.6- Pontos de passagem utilizados para o planejamento de trajetória.	115
Figura 6.7- Trajetórias para os cinco primeiros atuadores.	116
Figura 6.8- Trajetórias para os cinco atuadores restantes.	116
Figura 6.9- Trajetória do centro de massa do robô bípede.	117
Figura 6.10- Orientação da bacia durante a execução da trajetória de referência.	117
Figura 6.11- Sistema em malha fechada.	118
Figura 6.12- Comparação entre o sinal de saída do robô e o sinal de referência para os cinco primeiros atuadores.....	123
Figura 6.13- Comparação entre o sinal de saída do robô e o sinal de referência para os cinco atuadores restantes.....	123
Figura 6.14- Sinais de controle (voltagens) para os cinco primeiros atuadores.	124
Figura 6.15- Sinais de controle (voltagens) para os cinco atuadores restantes.	124
Figura 6.16- Forças de reações nos pés do robô.	125
Figura 6.17- Comparação entre a trajetória de referência do centro de massa do robô com a obtida pela simulação numérica.....	125
Figura 6.18- Comparação da orientação da bacia obtida pela simulação com a de referência.....	126
Figura 6.19-Comparação projeção do centro de massa com o centro de pressão.	126
Figura 7.1- Sinal PWM de controle.....	128
Figura 7.2- Diagrama elétrico do circuito de acionamento.....	130
Figura 7.3- Diagrama de bloco funcional do ADXL202.....	132
Figura 7.4- Saída digital modulada por duty cycle.....	133
Figura 7.5- Diagrama elétrico do circuito de inclinação.....	137
Figura 7.6- Formas de onda PWM para os eixos X e Y do acelerômetro ADXL202.....	139

Figura 7.7- Método de decodificação proposto para o ADXL202.....	140
Figura 7.8- Sinal de controle enviado pelo PC.....	142
Figura 7.9- Diagrama elétrico do circuito de multiplexação.....	144
Figura 7.10- Localização das chaves digitais na sola do pé do robô	145
Figura 7.11- Mecanismo do joelho – vista isométrica.	147
Figura 7.12- Desenho do terminal de barra (junta esférica) selecionado.	148
Figura 7.13- Desenho da junta universal DIN 808-G.	149
Figura 7.14- Mecanismo do tornozelo –vista isométrica.	150
Figura 7.15- Mecanismo do quadril –vista isométrica.	151
Figura 7.16- Robô Bípede –vista isométrica.	152
Figura 7.17- Arranjo geral do sistema desenvolvido.	154
Figura 7.18- Placa de acionamento microcontrolada.....	154
Figura 7.19- Sensor de inclinação construído.....	155
Figura 7.20- Placa de multiplexação.....	155
Figura 7.21- Sensores de contato localizados nas solas dos pés do robô.	156
Figura 7.22- Robô Bípede construído.....	156
Figura 7.23- Mecanismo do joelho.....	157
Figura 7.24- Mecanismo do tornozelo.	157
Figura 7.25- Mecanismo do quadril.	158

Lista de Tabelas

Tabela 1. Graus de liberdade considerados para cada uma das juntas do robô.....	21
Tabela 2. Resultados obtidos para o problema de otimização.....	49
Tabela 3. Parâmetros dimensionais do robô.....	119
Tabela 4. Parâmetros relacionados com as inércias do robô.....	120
Tabela 5. Parâmetros do motor.....	121
Tabela 6. Parâmetros do meio.....	121
Tabela 7. Parâmetros do servo motor CS-80 da fabricante Hobbico.....	128
Tabela 8. Dimensões da junta esférica selecionada.....	148
Tabela 9. Dimensões da junta universal DIN 808-G.....	149

Lista de Símbolos

Alfabeto Romano

a_{ci}	Aceleração linear do baricentro do ligamento i do robô ($i=1, 2, \dots, 7$)
a_i	Aceleração linear do ligamento i do robô ($i=1, 2, \dots, 7$)
A, B, C e L_2	Parâmetros dimensionais do mecanismo paralelo
A_C^D	Matriz de Transformação Homogênea do sistema $O_C-x_Cy_Cz_C$ para o sistema $O_D-x_Dy_Dz_D$.
A_r	Área do retângulo escolhido, no plano $\phi_1 - \phi_2$, para determinar o espaço de trabalho do mecanismo paralelo
$b(x, \dot{x})$	Vetor que engloba os esforços Centrífugos, de Coriolis e gravitacionais
B_m	Coefficiente de atrito viscoso do motor de corrente contínua
B_M	Matriz que inclui, no modelo dinâmico do robô, o termo correspondente ao amortecimento dos atuadores
c_1	Constante de amortecimento na direção normal do contato
c_2	Constante de amortecimento na direção tangencial do contato
$C(x, \dot{x})$	Vetor de esforços centrífugos e de Coriolis escrito em função do vetor x de coordenadas generalizadas
$\bar{C}(q, \dot{q})$	Vetor de esforços centrífugos e de Coriolis escrito em função do vetor q de coordenadas generalizadas
DC_x e DC_y	Valores de duty cycle das saídas digitais do acelerômetro ADXL202 para uma aceleração a 0 g
E	Tensão contra eletromotriz

f_{bx}, f_{by}, f_{bz}	Componentes x, y e z do vetor força aplicado no baricentro do ligamento base (pélvis) do robô
f_i	Força de reação, oriunda da interação do robô com o solo, aplicada em um ponto, denominado de p_i , do pé (modelo local)
F	Força de reação, oriunda da interação do robô com o solo, aplicada em um dos pés do robô (modelo global)
F_B	Vetor força aplicado no baricentro da pélvis do robô
F_{ext}	Matriz que engloba as forças aplicadas em cada um dos pontos pertencentes aos pés do robô
$F_{ia,i}$	Força aplicada pelo ligamento ia sobre o ligamento i
g	Vetor que representa a aceleração da gravidade
$G(x)$	Vetor de esforços gravitacionais escrito em função do vetor x de coordenadas generalizadas
$\bar{G}(q)$	Vetor de esforços gravitacionais escrito em função do vetor q de coordenadas generalizadas
$H(x)$	Matriz de inércia do robô escrito em função do vetor x de coordenadas generalizadas
$\bar{H}(q)$	Matriz de inércia do robô escrito em função do vetor q de coordenadas generalizadas
I_a	Corrente da armadura
\bar{I}_i	Tensor de inércia do ligamento i descrito no sistema de coordenadas $O_{ci}-x_{ci}y_{ci}z_{ci}$
I_i	Tensor de inércia do ligamento i descrito em um sistema de coordenadas cuja origem está localizada no centro de massa, c_i , e cuja orientação é a mesma do sistema de coordenadas $O_0-x_0y_0z_0$

J	Matriz Jacobiana
J_m	Momento de inércia do motor de corrente contínua
J_M	Matriz que inclui, no modelo dinâmico do robô, o termo correspondente às inércias dos atuadores
J_o	Matriz Jacobiana associada à variação da orientação de um ligamento do robô
J_q	Matriz Jacobiana relacionada com as singularidades associadas à cinemática direta
J_v	Matriz Jacobiana de velocidade linear
J_x	Matriz Jacobiana relacionada com as singularidades associadas à cinemática inversa
J_w	Matriz Jacobiana de velocidade angular
k_1	Constante de rigidez na direção normal de contato
k_2	Constante de rigidez na direção tangencial de contato
K	Matriz que engloba as matrizes Jacobianas de velocidade linear associadas a cada um dos pontos pertencentes aos pés do robô
K_b	Constante de voltagem
K_D, K_I e K_P	Ganhos proporcional, derivativo e integrativo do controlador PID
K_m	Constante de torque
$l_1, l_2, l_3, l_4, A_q, A_l, B_l$	Parâmetros dimensionais do robô bípede
m	Número de pontos pertencentes ao espaço de trabalho do mecanismo paralelo
m_c	Define a influência da profundidade de contato na dissipação de energia
m_i	Massa do ligamento i do robô ($i=1, 2, \dots, 7$)
M	Matriz que relaciona o vetor de forças generalizadas U com o vetor \bar{U}

M_B	Momento aplicado na pélvis do robô
$M_{ia,i}$	Momento aplicado pelo ligamento ia sobre o ligamento i
n	Número de pontos utilizados para realizar a discretização de um domínio
$n_\phi, n_\theta, n_\varphi$	Momentos aplicados na pélvis do robô nas direções das coordenadas $\phi, \theta, e \varphi$.
$p, q, r e s$	Parâmetros de Euler-Rodrigues
P	Vetor posição de um ligamento do robô
P_b	Vetor que define a posição da pélvis do robô em relação ao sistema de coordenadas fixo no solo
q	Vetor de coordenadas generalizadas utilizado para a construção do modelo do robô
Q	Vetor de forças generalizadas do robô incluindo a dinâmica de seus atuadores
r	Fator de redução
$r_{ia,i}$	Vetor, descrito no sistema de coordenadas fixo no solo, que define a posição da origem do sistema de coordenadas $O_i-x_iy_iz_i$ em relação ao sistema $O_{ia}-x_{ia}y_{ia}z_{ia}$
$r_{ia,ci}$	Vetor, descrito no sistema de coordenadas fixo no solo, que define a posição do baricentro do ligamento i do robô em relação ao sistema $O_{ia}-x_{ia}y_{ia}z_{ia}$
$r_{ia,ci}^i$	Vetor, descrito no sistema de coordenadas $O_i-x_iy_iz_i$, que define a posição do baricentro do ligamento i do robô em relação ao sistema $O_{ia}-x_{ia}y_{ia}z_{ia}$
R	Resistência da armadura

R_C^D	Especifica a orientação do sistema de coordenadas $O_D-x_Dy_Dz_D$ em relação ao sistema $O_C-x_Cy_Cz_C$
S	Produto matricial $M \cdot K$
T	Vetor que engloba os esforços Centrífgos, de Coriolis, gravitacionais e de inércia
T_1	Período no qual o sinal digital PWM possui nível lógico 1
T_2	Período do sinal PWM
T_{2cal} , Z_{Xcal} e Z_{Ycal}	Constantes de calibração do sensor de inclinação desenvolvido
T_a , T_b , T_c e T_d	Tempos cronometrados responsáveis pela decodificação do sinal proveniente do acelerômetro ADXL202
T_c	Torque aplicado no eixo da carga
T_m	Torque aplicado no eixo do motor
U	Vetor de forças generalizadas escrito em função do vetor x de coordenadas generalizadas
\bar{U}	Vetor de forças generalizadas escrito em função do vetor q de coordenadas generalizadas
U_E	Vetor de forças generalizadas, descrito em função do vetor x de coordenadas generalizadas, gerado pelas forças externas
\bar{U}_E	Vetor de forças generalizadas, descrito em função do vetor q de coordenadas generalizadas, gerado pelas forças externas
V	Voltagem da armadura
V_l	Velocidade linear de um ligamento do robô
w	Vetor de velocidade angular
x	Vetor de coordenadas generalizadas do robô bípede
y	Vetor de orientação de um ligamento do robô

Alfabeto Grego

α_i	Posição angular do atuador i do robô ($i=1, 2, \dots, 10$)
δD	Erro associado ao vetor D
ϕ, θ e φ	Ângulos de Euler utilizados para descrever a orientação da pélvis do robô em relação ao sistema fixo no solo
η	Índice global que atribui um valor numérico para a transferência de carregamento do tornozelo para os atuadores
λ	Índice local que relaciona os torques dos atuadores com os torques nas direções das coordenadas da plataforma móvel
θ_1	Ângulo de adução/abdução do quadril esquerdo
θ_2	Ângulo de flexão/extensão do quadril esquerdo
θ_3	Ângulo do joelho esquerdo
θ_4	Ângulo de inversão/eversão do pé esquerdo
θ_5	Ângulo de flexão/extensão do pé esquerdo
θ_6	Ângulo de adução/abdução do quadril direito
θ_7	Ângulo de flexão/extensão do quadril direito
θ_8	Ângulo do joelho direito
θ_9	Ângulo de inversão/eversão do pé direito
θ_{10}	Ângulo de flexão/extensão do pé direito
θ_c	Posição angular do eixo da carga
θ_m	Posição angular do eixo do motor
ϕ_1 e ϕ_2	Ângulos de orientação do pé do robô
τ_{α_i}	Torque aplicado pelo atuador i ($i=1, 2, \dots, 10$)
τ_{ϕ_1} e τ_{ϕ_2}	Torques aplicados nas direções das coordenadas da plataforma móvel

τ_{θ_i}	Torque aplicado na direção da coordenada generalizada θ_i ($i=1, 2, \dots, 10$)
Ω	Representação matricial do vetor velocidade angular

Simbologia Especial

t	(subscrito) Direção tangencial
n	(subscrito) Direção normal
min, max	(subscrito) Valores máximos e mínimos

Resumo

A análise da marcha humana é um dos principais recursos que podem ser utilizados no estudo e tratamento de patologias que envolvem o aparelho locomotor. O presente trabalho visa o projeto e a construção de um robô bípede antropomórfico para ser, juntamente com um laboratório de marcha, uma ferramenta de auxílio aos profissionais da saúde na análise da marcha humana. O robô construído é capaz de reproduzir, de uma forma assistida, padrões de marcha reais, cujos dados são previamente adquiridos por um laboratório de marcha. As características dimensionais e cinemáticas desse robô são semelhantes às de um corpo humano. Dessa forma, a escolha das dimensões dos membros do robô e das faixas de movimentação de suas articulações foi baseada em dados provenientes de corpos humanos. Além disso, para garantir uma semelhança ainda maior com o corpo humano, um mecanismo paralelo foi selecionado para ser o responsável pelos movimentos das articulações do tornozelo e do quadril. Um sistema de sensoriamento barato, baseado em sensores de inclinação e de contato, foi desenvolvido para avaliar a reprodução da marcha humana por parte do robô. Agora, para acionar o robô, servo motores controlados por sinais PWM foram utilizados. Esse trabalho também apresenta o desenvolvimento de um modelo dinâmico tridimensional do robô que considera a sua interação com o solo.

Abstract

The analysis of the human gait is one of the main resources that can be used in studies and treatment of pathologies which involve the locomotor system. The goal of this research is to design and to build an anthropomorphic biped robot to be used as a tool that could help health professionals to study the human gait. Once built, the robot can reproduce in an assisted way, real gait patterns based on datas that were previously acquired by a gait laboratory. The dimensionals and kinematics traits of this robot are alike to the human body. Therefore the choice of the limb dimensions from the robot and the bustle ranges of its articulations were based on datas originated in human bodies. Beyond this and to guarantee a great similarity to the human body a parallel mechanism was selected to be the responsible for the articulations movements of the ankle and hip. A cheap sensor system based on tilt and contact sensors was developed to evaluate the reproduction of the human gait by the robot. To operate the robot servo-motors controlled by PWM signals were used. This study also presents the development of a three-dimensional dynamic model of the robot that considers its interaction with the ground.

1. Introdução

A análise da marcha humana é um dos principais recursos que podem ser utilizados no estudo e tratamento de patologias que envolvem o aparelho locomotor. Os dados fornecidos por essa análise permitem que o profissional responsável selecione o método de tratamento mais indicado para ser colocado em prática (Alencar et al., 1999), como, por exemplo, a fisioterapia, a utilização de órteses, próteses e outros auxiliares de locomoção ou até mesmo a intervenção cirúrgica.

A marcha humana corresponde a uma seqüência de eventos rápidos e complexos, tornando difícil a sua análise a partir de sua observação clínica. Dessa forma, médicos, engenheiros e estudiosos do movimento desenvolveram recursos de registro e análise da marcha, possibilitando a criação dos chamados laboratórios de marcha (Saad et al., 1996). O laboratório de marcha é um sistema de análise de movimento para aquisição e processamento de dados, sendo tipicamente composto por duas a seis câmeras de vídeo, duas a três plataformas de força e um eletromiógrafo por telemetria ou cabo (Moraes, 2000).

O presente trabalho possui como objetivo o projeto e a construção de um robô bípede antropomórfico, cujas características dimensionais e cinemáticas se assemelham às de um corpo humano, para ser, juntamente com o laboratório de marcha, uma ferramenta de auxílio aos profissionais da saúde na análise da marcha humana. Este robô bípede será capaz de caminhar com um padrão de marcha tão próximo quanto possível da normalmente observada em pessoas normais e em portadores de disfunções motoras, podendo, assim, reproduzir padrões de marchas reais que foram previamente adquiridos por um laboratório de marcha.

O robô proposto pode ser utilizado para o estudo e ensino da marcha humana, reproduzindo, para a visualização dos profissionais da saúde, padrões patológicos de marcha, como marcha atáxica, hemiparesia espástica, marcha talonante, marcha de Trendlenburg, marcha anseriana, marcha do glúteo máximo, marcha do quadríceps, marcha escavante e marcha antálgica (Saad, 1997). Estes e outros padrões comuns em síndromes como Parkinson,

AVC, paralisia cerebral, mielomeningocele, amputações, etc poderiam ser visualizados, estudados e fornecer subsídios para o desenvolvimento de estratégias de melhora funcional da marcha.

Além disso, o robô pode ser utilizado para ajudar a quantificar intervenções cirúrgicas. Por exemplo, a osteostomia derrotacional em paralisia cerebral poderia ser testada caso fosse instalado um dispositivo que permitisse que duas porções da coxa do robô girassem entre si.

Também é possível observar, a partir do robô, uma estimativa do padrão emergente da marcha causada pela alteração anatômica numa articulação específica. Como exemplo, pode-se verificar de que forma a variação da amplitude de movimento de uma articulação como o quadril influencia na velocidade da marcha, no comprimento das passadas ou na amplitude do movimento vertical ou horizontal do centro de massa, parâmetro este diretamente relacionado com a eficiência energética da marcha (Skinner, 2000). O mesmo pode ser feito para a artrodese de uma articulação, inclusive com estudos visando a obtenção de padrões de marcha mais eficientes. Estudos semelhantes podem ser feitos simulando o enfraquecimento de algum músculo específico através da diminuição do torque gerado pelos atuadores do robô.

Dada a grande importância de um laboratório de marcha na análise da marcha humana, existem vários estudos que detalham os procedimentos de calibração desses laboratórios, indicando uma grande preocupação dos pesquisadores em relação aos resultados fornecidos pelo sistema (Moraes, 2000). O robô bípede proposto poderia auxiliar nesse processo de calibração de um laboratório de marcha, uma vez que ele é capaz de reproduzir uma marcha cujos parâmetros são determinados com certeza e repetibilidade.

Servindo como uma plataforma de testes, o robô pode, também, auxiliar no estudo e no desenvolvimento de próteses de membros inferiores. Além disso, os mecanismos projetados para executar os movimentos articulares do robô podem ser utilizados, como ponto de partida, para o desenvolvimento de próteses e órteses ativas dos membros inferiores. O desenvolvimento de próteses ativas permitirá uma maior segurança na fase de apoio e um melhor controle da fase de balanço, permitindo ao paciente uma marcha natural e um maior conforto de uso, sem a necessidade de controlar a prótese de forma

consciente (Hermini e Baltazar, 2004). Já o desenvolvimento de órteses ativas possibilitará, por exemplo, que o treinamento da locomoção de pacientes com lesões incompletas da medula espinhal, feito normalmente de uma forma manual por fisioterapeutas, seja realizado de uma forma automática (Colombo et al., 2000).

As técnicas de modelagem e simulação implementadas para o robô bípede em questão podem servir como uma contribuição para a área da biomecânica, que é a responsável pela descrição, análise e interpretação dos movimentos dos membros do corpo humano (Silva, 2000).

Apesar da marcha humana ter sido exaustivamente estudada, ainda não existem dados suficientes para explicar, de uma forma completa, como o Homem anda. Um robô bípede antropomórfico pode ajudar, de uma forma artificial, na compreensão desse fenômeno (Azevedo, 2004).

Além da área médica, o robô bípede proposto propicia também uma contribuição no campo dos robôs móveis, uma vez que possui a habilidade de se deslocar em ambientes com um grande número de restrições. Além disso, por ser antropomórfico, o robô não só é capaz de manter seu balanço em vários tipos de solo, mas também de se ajustar de uma forma rápida, eficiente e, geralmente, com elegância (Sardain et al., 1998).

1.1. Escopo do Trabalho

Este trabalho, como já comentado, visa o projeto e a construção de um robô bípede antropomórfico que seja capaz de reproduzir o padrão da marcha humana o mais próximo possível do real. Primeiramente, cogitou-se em realizar a reprodução da marcha humana de uma forma autônoma. Entretanto, esse problema mostrou-se extremamente complexo, uma vez que, para a construção do robô, além dos membros inferiores, que são os responsáveis pela sustentação do corpo e pela execução da marcha, o tronco e os membros superiores também deveriam ser considerados, já que seus movimentos são importantes na otimização da energia da marcha e na manutenção do equilíbrio. Além disso, a manutenção do balanço dinâmico do robô, que é fundamental para a reprodução autônoma da marcha, corresponde a um

problema de controle bastante avançado e que, por si só, justificaria a elaboração de um outro trabalho. Dessa forma, para reduzir a complexidade do problema, tornando-o factível ao escopo de uma dissertação de mestrado, a reprodução da marcha humana será feita de uma forma assistida, considerando apenas os membros inferiores para a construção do robô.

Para que o robô possa reproduzir a marcha humana de uma forma satisfatória, é necessário que as suas características dimensionais e cinemáticas sejam, funcionalmente, semelhantes às de um corpo humano. No Capítulo 3, um breve estudo sobre o corpo humano é feito, sendo determinados os graus de liberdade e os movimentos que cada articulação do robô deverá exercer, bem como os sensores a serem utilizados para avaliar a execução da marcha. Além disso, os mecanismos responsáveis pelos movimentos articulares do robô foram selecionados.

No capítulo seguinte, o modelo cinemático foi desenvolvido para os mecanismos selecionados para as juntas do tornozelo e do quadril. Esse modelo é importante, pois relaciona os movimentos das articulações do robô, que são impostos pela marcha a ser reproduzida, com os movimentos dos atuadores pertencentes a esses mecanismos. Além disso, questões relativas à determinação do espaço de trabalho, das configurações singulares e dos parâmetros dimensionais dos mecanismos também foram discutidas nesse capítulo.

No capítulo 5, o robô bípede, que é composto por uma série de corpos rígidos unidos entre si por articulações, foi modelado utilizando uma metodologia semelhante àquela empregada em robôs manipuladores. Esse modelo será útil para avaliar as marchas a serem reproduzidas, bem como os controladores a serem implementados.

No capítulo seguinte, projetou-se o controlador do robô bípede, que é o responsável pelo acompanhamento de uma marcha pré-estabelecida (trajetória de referência). Além disso, com o objetivo de planejar uma trajetória de referência que permita a locomoção do robô sem nenhum tipo de auxílio, realizou-se um breve estudo sobre a estabilidade de robôs bípedes. Essa trajetória planejada foi utilizada para realizar a simulação numérica do robô, possibilitando, assim, a avaliação do controlador implementado.

A descrição detalhada do protótipo desenvolvido é feita no capítulo 7. O projeto eletrônico, que envolve o acionamento dos atuadores, leitura de sensores e comunicação com o PC, bem como o projeto mecânico do robô são discutidos nesse capítulo.

As principais conclusões a respeito do projeto desenvolvido, bem como as sugestões para melhorar o protótipo construído são apresentadas no capítulo 8.

2. Revisão Bibliográfica

Diversos trabalhos envolvendo a simulação, controle e construção de robôs bípedes foram desenvolvidos nos últimos anos. Devido ao caráter prático do trabalho proposto, a presente revisão bibliográfica levará em consideração, dentre a vasta literatura disponível, apenas trabalhos que envolvem a construção de um protótipo. Pelo fato do robô bípede possuir um caráter multidisciplinar, diversos aspectos de seu projeto serão discutidos, dentre eles, a arquitetura selecionada, os mecanismos responsáveis pelos movimentos articulares do robô, a modelagem empregada, as técnicas de controle adotadas para garantir a estabilidade do robô e o hardware proposto. Dessa forma, para evitar que a revisão bibliográfica fique muito extensa, dentre os diversos trabalhos estudados, apenas os considerados mais importantes serão mencionados. Entretanto, no decorrer do texto, quando for necessária, a discussão de outros trabalhos será realizada.

Shih, (1996), desenvolveu um robô bípede de sete graus de liberdade, denominado de BR-1, que é capaz de executar uma marcha retilínea de uma forma autônoma. Conforme ilustrado pela figura 2.1, apenas os membros inferiores foram considerados para a construção do robô. Assim, o robô é composto por uma pélvis, coxas, pernas e pés. A articulação do quadril, assim como a do tornozelo, possui apenas o movimento de flexão/extensão, ou seja, o movimento que ocorre no plano de progressão do robô (plano sagital). Já a articulação do joelho possui um movimento de translação que é o responsável pela variação do comprimento das pernas do robô. Para garantir a estabilidade lateral do robô, um peso capaz de se movimentar no plano frontal foi acoplado na pélvis. O controle adotado para esse robô é relativamente simples e consiste no acompanhamento de uma trajetória de referência, podendo ser dividido em duas etapas: i) planejamento de uma trajetória de referência que garanta a estabilidade do robô e ii) controle propriamente dito, responsável pelo acompanhamento dessa trajetória de referência. Com relação à primeira etapa, a marcha do robô foi planejada de duas formas distintas. A primeira forma corresponde ao planejamento de uma marcha que garanta a estabilidade estática do robô, ou seja, que garanta que a projeção do

baricentro esteja dentro da região de suporte. Já a segunda forma corresponde ao planejamento de uma marcha que garanta a estabilidade dinâmica do robô, e que consiste em manter um ponto, denominado de ponto de momento zero, dentro da região de suporte. Esses critérios de estabilidade serão melhores explicados no decorrer do texto, mais especificamente no capítulo 6. Com relação à segunda etapa do controle adotado, Shih utilizou, para cada um dos atuadores, um controlador independente PD com compensação gravitacional. Para realizar o planejamento da trajetória de referência, bem como o cálculo da parcela gravitacional necessária para realizar o controle, o modelo cinemático e dinâmico do robô foi desenvolvido. O robô foi modelado como um mecanismo de cadeia cinemática aberta, no qual apenas um pé, denominado de pé de apoio, está em contato com o solo. Esse modelo é relativamente simples para ser obtido, porém, ele introduz uma série de restrições, dentre elas: i) o pé de apoio do robô deve estar totalmente em contato com o solo e ii) a fase de apoio duplo, na qual ambos os pés do robô estão em contato com o solo, formando uma cadeia cinemática fechada, não pode ser simulada, o que levou ao negligenciamento dessa fase no planejamento da trajetória de referência. Para a construção do protótipo, motores de corrente contínua com um alto jogo de redução por engrenagem foram utilizados como atuadores e encoders foram adotados como sensores de posicionamento angular desses atuadores. Um PC486 foi utilizado para gerar a trajetória de referência. Agora, para realizar o controle dos atuadores, utilizou-se um sistema multicanais (DSP Technologies, USA). A taxa de amostragem adotada é alta e equivale a 1KHz.

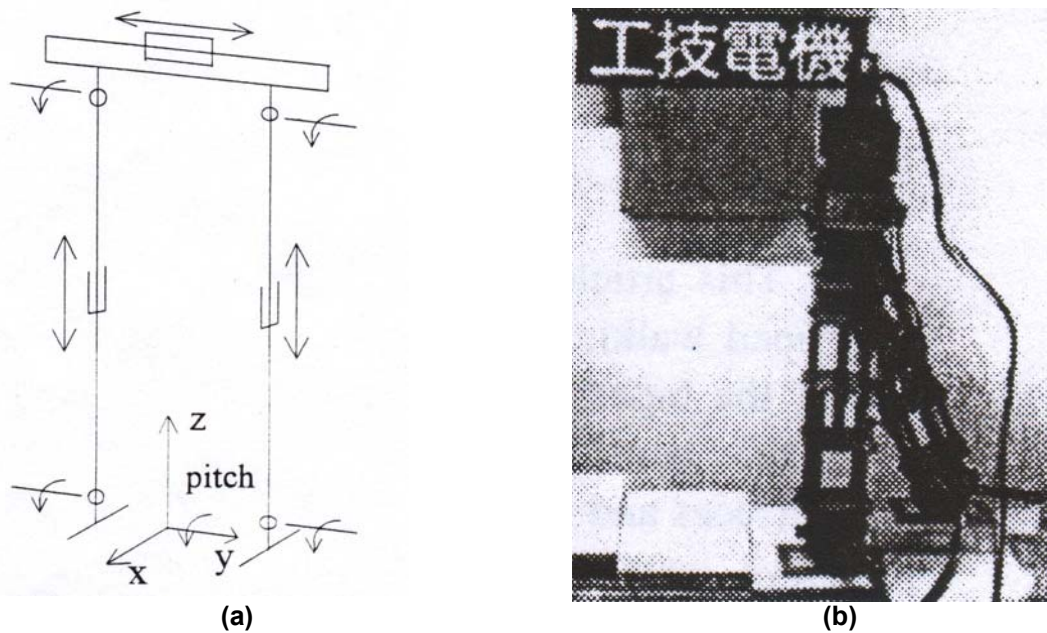


Figura 2.1-Robô Bípede desenvolvido por Shih, (1996), (a) diagrama cinemático do robô e (b) protótipo construído.

Fujimoto, (1998), desenvolveu um robô bípede sofisticado de 14 graus de liberdade, capaz de caminhar de uma forma autônoma e com robustez. Conforme ilustrado pela figura 2.2, o robô construído é composto por uma pélvis, que é longa provocando a impressão de ser o tronco, dois braços e duas pernas. A articulação do quadril possui três tipos de movimentos: o movimento de flexão/extensão, o movimento de adução/abdução (movimento que ocorre no plano frontal do robô) e o movimento de rotação interna/externa. O joelho possui apenas o movimento de flexão/extensão. Já o tornozelo possui os movimentos de flexão/extensão e de rotação lateral. Por fim, cada um dos braços, possui apenas um grau de liberdade. Com esse alto número de graus de liberdade, o robô consegue, além de executar uma marcha retilínea de uma forma autônoma, mudar de direção devido ao movimento de rotação interna/externa do quadril. Para controlar esse robô bípede, Fujimoto propôs um novo sistema de controle que unifica os processos de planejamento de trajetória e controle, permitindo, assim, que as trajetórias das juntas do robô sejam geradas em tempo real. Esse sistema proposto baseia-se no controle da orientação e do centro de massa do robô através da utilização das forças oriundas da interação entre o robô e o solo como entradas indiretas de

controle. Para isso um sistema híbrido de controle de posição e força é aplicado para cada uma das pernas. Caso a perna esteja na fase de suporte, o controle de força é ativo. Caso contrário, o controle de posição é ativo. Para avaliar esse sistema de controle proposto, um modelo dinâmico do robô foi desenvolvido. O robô foi modelado como um mecanismo livre que não possui ponto fixo e, cujo movimento depende da sua interação com o solo. Esse modelo, quando comparado com aquele desenvolvido por Shih, (1996), pode ser considerado mais complexo para ser obtido, mas em compensação ele não introduz nenhum tipo de restrição para a simulação do robô. Com relação à construção do protótipo, motores de corrente contínua com redução harmônica foram utilizados como atuadores. Encoders foram adotados como sensores de posicionamento angular desses atuadores. Para determinar a orientação do robô, um giroscópio foi acoplado na sua pélvis. Agora, para realizar o controle de força do robô, sensores de força e torque de seis graus de liberdade foram acoplados nos seus tornozelos. Todos os cálculos necessários para efetuar o controle do robô são realizados pelo DSP TMS320C32 de 50 MHz. A taxa de amostragem adotada é de 500 Hz.

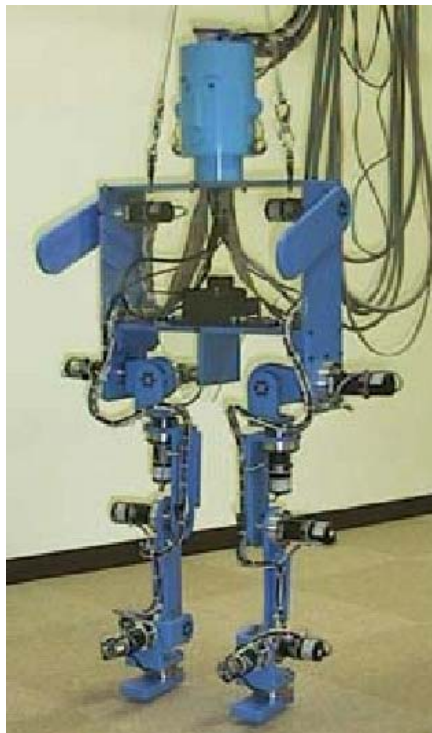


Figura 2.2-Robô Bípede desenvolvido por Fujimoto, (1998).

Parseghian, (2000), desenvolveu o controle de um robô bípede antropomórfico de 12 graus de liberdade, denominado de M2, que é capaz de caminhar de uma forma autônoma. Para a construção desse robô, apenas os membros inferiores foram considerados. A articulação do quadril possui os movimentos de flexão/extensão, adução/abdução e rotação interna/externa. Já o joelho possui apenas o movimento de flexão/extensão. Por fim, o tornozelo possui os movimentos de flexão/extensão e de rotação lateral. Esse robô, por ser antropomórfico, possui características dimensionais e cinemáticas semelhantes às de um corpo humano. Dessa forma, a escolha das dimensões dos membros do robô e das faixas de movimentação de suas articulações foi baseada em dados provenientes de corpos humanos. Além disso, para garantir uma semelhança ainda maior com o corpo humano, um mecanismo paralelo foi selecionado para ser o responsável pelos movimentos da articulação do tornozelo. Esse mecanismo paralelo, diferentemente do mecanismo serial escolhido por Fujimoto, (1998), permite que os eixos nos quais ocorrem os movimentos da articulação (flexão/extensão e rotação lateral) estejam justapostos. O robô bípede M2, bem como o mecanismo paralelo proposto para o tornozelo estão ilustrados pela figura 2.3. Para controlar o robô M2, o controle clássico de acompanhamento de uma trajetória de referência foi adotado. A trajetória de referência foi planejada de forma a garantir a estabilidade estática do robô e uma certa semelhança com a marcha humana real. Para garantir uma maior robustez do robô ao executar esse marcha de referência, Parseghian propôs pequenas modificações, em tempo real, dessa trajetória a partir do controle da projeção do centro de massa do robô. O modelo cinemático do robô, que é utilizado para planejar a trajetória de referência e calcular a posição de seu centro de massa, foi desenvolvido adotando-se a mesma metodologia utilizada por Shih, (1996), que considera o robô como um mecanismo de cadeia cinemática aberta.

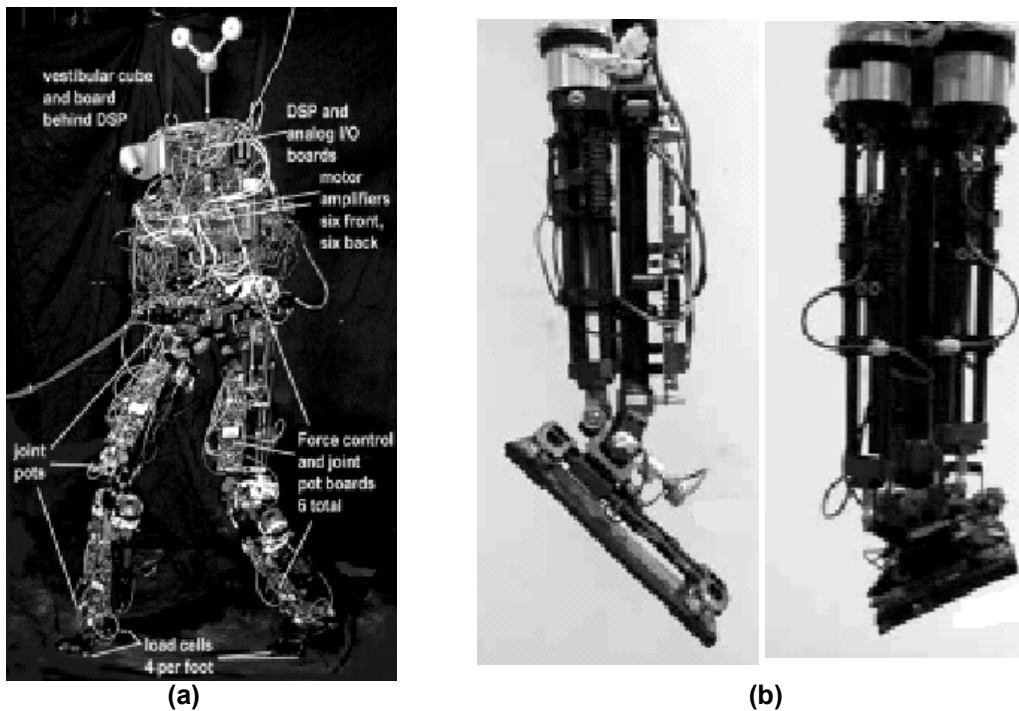


Figura 2.3-Robô bípede desenvolvido por Parseghian, (2000), (a) protótipo construído e (b) mecanismo paralelo selecionado para a articulação do tornozelo.

Huang et al., (2001), desenvolveram um robô bípede antropomórfico de 12 graus de liberdade, capaz de caminhar de uma forma autônoma. Esse robô é composto por uma pélvis, que é longa provocando a impressão de ser o tronco, e duas pernas. As articulações desse robô possuem os mesmos movimentos do robô desenvolvido por Parseghian, (2000). A figura 2.4 ilustra o protótipo construído. Para controlar o robô bípede em questão, novamente o controle clássico de acompanhamento de uma trajetória de referência foi adotado. Nesse trabalho, a trajetória de referência é planejada de forma a permitir que o robô seja capaz de se adaptar, com estabilidade, a vários tipos de solo. Para isso as trajetórias dos pés do robô são especificadas e, na seqüência, a partir de um processo numérico iterativo, a trajetória da pélvis é determinada de forma a garantir a estabilidade dinâmica do robô. Por fim, conhecidas as trajetórias de ambos os pés e da pélvis do robô, as trajetórias das articulações são calculadas a partir da cinemática inversa. Seguindo um raciocínio semelhante, Gonçalves e Zampieri, (2005), propuseram um método de geração de trajetória baseado no movimento do tronco do robô. Esse

método pode ser dividido em duas etapas. A primeira etapa consiste em gerar a trajetória das pernas do robô de forma a atender apenas as restrições impostas pelo meio. A segunda etapa consiste em determinar, a partir de uma rede neural, o movimento do tronco de forma a assegurar a estabilidade dinâmica do robô.

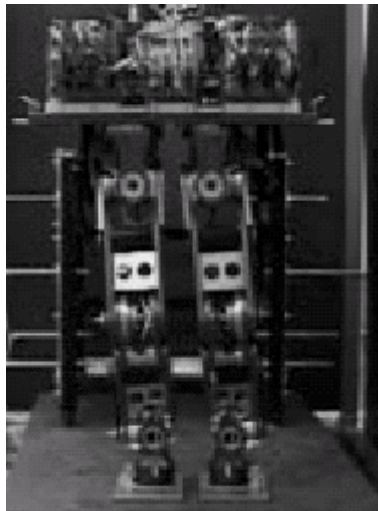


Figura 2.4-Robô Bípede desenvolvido por Huang et al., (2001).

Azevedo et al., (2003), desenvolveram um robô bípede antropomórfico de 8 graus de liberdade, capaz de executar uma marcha retilínea de forma autônoma. Conforme ilustrado pela figura 2.5, apenas os membros inferiores foram considerados para a construção do robô bípede. A articulação do quadril, assim como a articulação do joelho, possui apenas o movimento de flexão/extensão. Já a articulação do tornozelo possui os movimentos de flexão/extensão e de rotação lateral. Com esse número de graus de liberdade, o robô bípede em questão consegue executar uma marcha retilínea de forma autônoma. Isto porque, além de conseguir se movimentar no plano sagital, ele consegue, a partir do movimento de rotação lateral do tornozelo, se movimentar no plano frontal, podendo, dessa forma, controlar a sua estabilidade lateral. O mecanismo paralelo utilizado por Parseghian, (2000), foi também adotado para a articulação do tornozelo do robô em questão. O robô bípede antropomórfico construído e o mecanismo paralelo responsável pela cinemática articular do tornozelo estão ilustrados pela figura 2.5. Para controlar

esse robô bípede, novamente o controle clássico de acompanhamento de uma trajetória de referência foi adotado. A trajetória de referência é planejada de forma a garantir a estabilidade estática do robô e algumas similaridades com a marcha humana. Para facilitar esse processo, tornando-o mais intuitivo, o planejamento da trajetória é feito no espaço cartesiano. Na seqüência, utilizando-se da cinemática inversa, as trajetórias das articulações do robô são calculadas. Para cada um dos atuadores do robô, um controlador independente PD com compensação gravitacional foi utilizado. O modelo matemático do robô, necessário para calcular a parcela gravitacional do controle, foi desenvolvido considerando o robô como um mecanismo de cadeia cinemática aberta. Conforme já mencionado, a partir desse modelo não é possível simular a fase de apoio duplo. No entanto, o controlador do robô deve ser também capaz de calcular a parcela gravitacional nessa fase. Para isso, sensores de força, localizados nos pés do robô, são utilizados para determinar o peso suportado por cada um dos pés nessa fase de apoio duplo. Calculada a relação entre o peso suportado por cada um dos pés e o peso total do robô, a parcela gravitacional necessária para o controle é determinada a partir de uma combinação linear das parcelas gravitacionais obtidas aplicando o modelo de apoio simples para cada uma das pernas. Para a construção do protótipo, motores de corrente contínua foram utilizados como atuadores. Encoders foram adotados como sensores de posicionamento angular desses atuadores. Potenciômetros foram acoplados em cada uma das juntas do robô. Por fim, para cada um dos pés, três sensores de força estão localizados entre a sola do pé e a articulação do tornozelo.

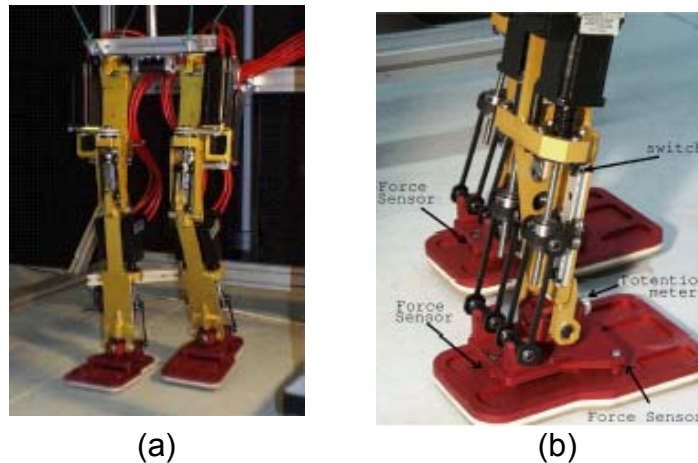


Figura 2.5-Robô bípede desenvolvido por Azevedo et al., (2003), (a) protótipo construído e (b) mecanismo paralelo selecionado para a articulação do tornozelo.

Wollherr et al., (2003), desenvolveram um robô bípede de 17 graus de liberdade, capaz de caminhar de forma autônoma. Esse robô é composto por um tronco, uma pélvis, dois braços e duas pernas. Cada um dos braços possui dois graus de liberdade. O tronco possui apenas o movimento de rotação. Já as articulações pertencentes às pernas possuem os mesmos movimentos do robô desenvolvido por Parseghian, (2000). A figura 2.6 ilustra o robô bípede construído. Para controlar o robô bípede, novamente o controle de acompanhamento de uma trajetória de referência foi adotado. A partir de um problema de controle ótimo, a trajetória de referência é planejada de forma a minimizar a energia despendida pelos atuadores e garantir a estabilidade dinâmica do robô. Com o intuito de garantir uma maior robustez do robô ao executar esse marcha de referência, um método de compensação em tempo real que utiliza a matriz Jacobiana foi adotado. Com relação ao protótipo construído, motores de corrente contínua com um alto jogo de redução por engrenagem foram utilizados. Encoders foram adotados como sensores de posicionamento angular desses atuadores. Para realizar o controle do robô, uma placa mãe ATX com processador Athlon de 1300 MHz foi utilizado. A taxa de amostragem adotada foi de 250 Hz.

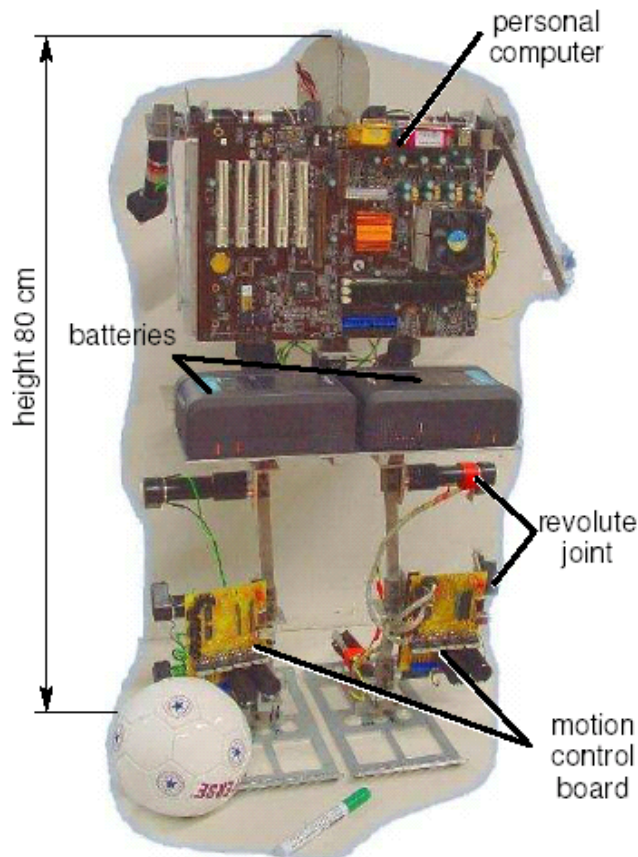


Figura 2.6-Robô Bípede desenvolvido por Wollherr et al., (2003).

Nesse presente trabalho, um robô bípede antropomórfico de dez graus de liberdade, capaz de reproduzir, de uma forma assistida, padrões de marcha reais, foi desenvolvido. Apenas os membros inferiores foram considerados para a construção do protótipo. A articulação do quadril possui os movimentos de flexão/extensão e adução/abdução. O joelho possui apenas o movimento de flexão/extensão. Já a articulação do tornozelo possui os movimentos de flexão/extensão e rotação lateral. O mecanismo paralelo proposto por Parseghian, (2000), foi adotado, com algumas modificações em sua arquitetura, para as articulações do quadril e do tornozelo. Para controlar o robô bípede desenvolvido, o controle clássico de acompanhamento de uma trajetória de referência foi adotado. Devido ao limite orçamentário do projeto em questão, procurou-se adotar as soluções mais baratas para desenvolver o hardware do robô. Para determinar a orientação do robô, ao invés de utilizar

um giroscópio acoplado à pélvis, adotou-se uma solução alternativa e que consiste em utilizar um sensor capaz de medir inclinações em dois eixos. Agora, para determinar de que forma os pés estão interagindo com o solo, utilizou-se sensores de contato e novamente sensores de inclinação. Por fim, para acionar as pernas do robô, utilizou-se um servo motor de aerodelismo que já realiza, internamente, o controle de posicionamento angular.

3. Projeto Conceitual

3.1. Introdução

Apenas os membros inferiores, que são os responsáveis pela sustentação do corpo e pela execução da marcha, serão considerados para a construção do robô. Assim, o robô será composto por uma pélvis (também denominada de bacia), coxas, pernas e pés.

Como o robô deverá ser capaz de reproduzir uma marcha humana real, as dimensões relativas entre os seus membros deverão ser proporcionais àquelas normalmente encontradas no corpo humano. Um estudo sobre o corpo humano apresentado por Winter, (1991), será utilizado para determinar o comprimento desses membros. Uma vez que esses comprimentos dependem do sexo, da idade e da origem racial da pessoa, este estudo apresenta uma correlação entre a média das dimensões dos membros e a altura total do corpo, como ilustrado pela Figura 3.1.

O aparelho locomotor humano possui um elevado número de graus de liberdade. Tentar reproduzir todos eles no robô a ser construído torna-se uma tarefa praticamente inviável. Assim sendo, apenas as mais importantes serão consideradas para o projeto do robô. No subitem 3.2, um breve estudo sobre as articulações humanas será realizado com o objetivo de determinar os graus de liberdade relacionados com cada uma delas e descobrir quais deles são realmente fundamentais para a execução de uma marcha retilínea.

Uma vez definido o número de graus de liberdade e os movimentos que cada articulação do robô deverá exercer, o próximo passo consiste na seleção dos mecanismos responsáveis pelos movimentos articulares do robô bípede. Esta seleção será feita no subitem 3.3.

Por fim, com a finalidade de selecionar os sensores que permitirão avaliar a reprodução da marcha humana por parte do robô, um breve estudo sobre o ciclo da marcha será realizado no subitem 3.4.

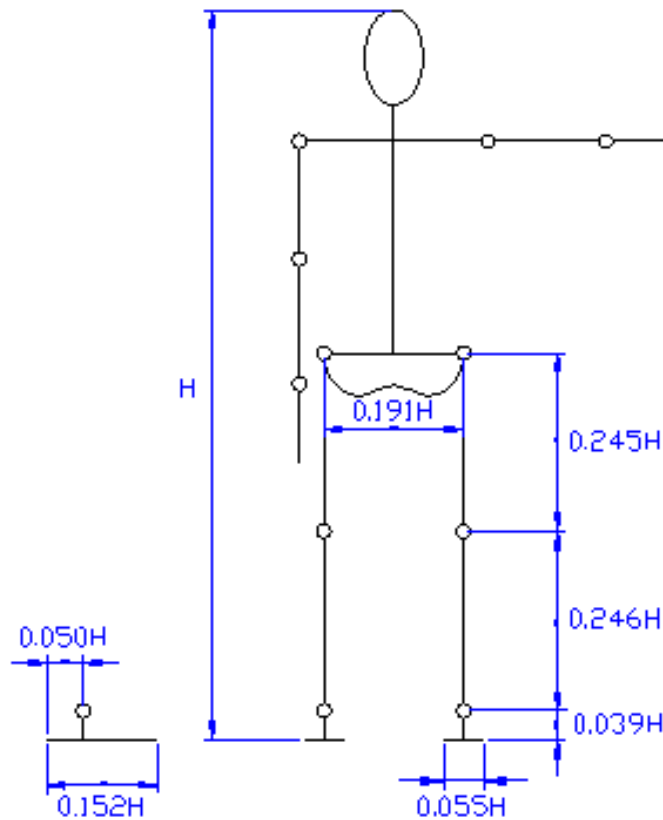


Figura 3.1-Comprimento médio de cada membro em relação à altura total do corpo (Winter, 1991).

3.2. Articulações

As articulações são responsáveis pela transmissão de movimento angular entre cada membro. A articulação entre o pé e a perna é denominada de tornozelo, já a articulação entre a perna e a coxa de joelho. Por fim, a articulação entre a coxa e a pélvis é denominada de quadril. As figuras 3.2, 3.3 e 3.4 ilustram, respectivamente, as articulações do tornozelo, joelho e quadril.

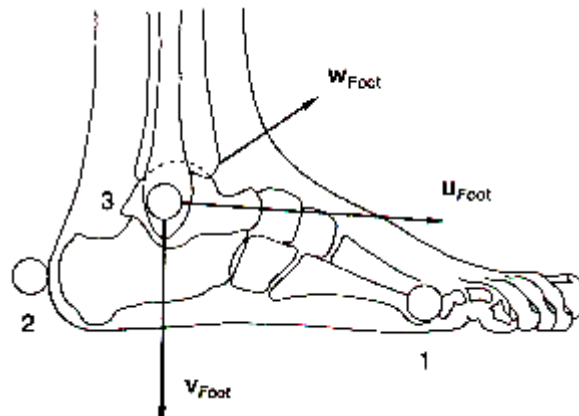


Figura 3.2-Tornozelo Humano (Vaughan et al., 1992).

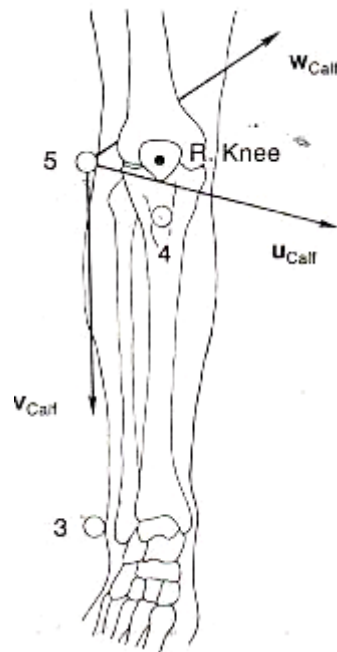


Figura 3.3-Joelho Humano (Vaughan et al., 1992).

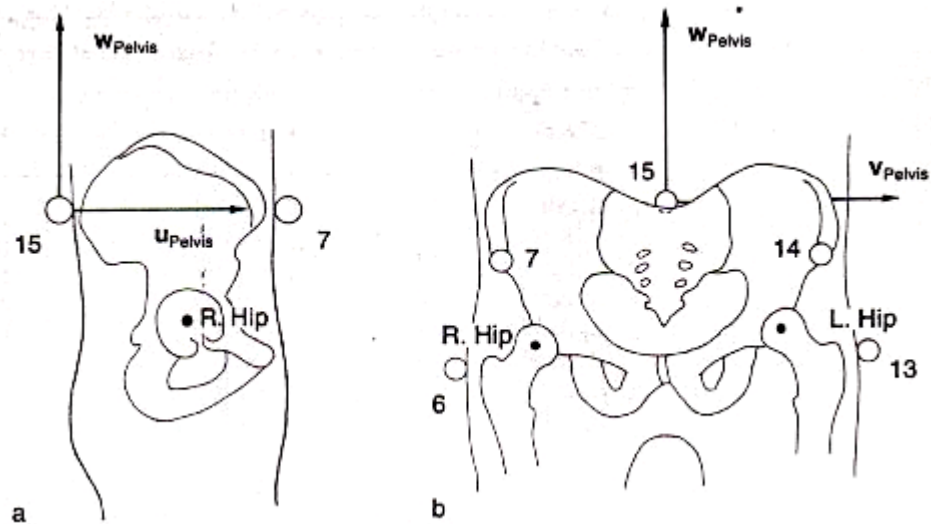


Figura 3.4-Quadril Humano (Vaughan et al., 1992).

Cada uma destas articulações permite a realização de três movimentos fundamentais de rotação: flexão/extensão, adução/abdução e rotação interna/externa. A flexão/extensão corresponde ao movimento do membro realizado no plano sagital (ver figura 3.5). Já a adução/abdução corresponde ao movimento do membro realizado no plano frontal. Por fim, a rotação corresponde ao movimento do membro realizado na direção do seu próprio eixo. Para um melhor entendimento, a figura 3.6 ilustra estes três movimentos realizados pelo joelho.

Para o tornozelo, os movimentos de adução/abdução e rotação interna/externa são denominados, respectivamente, de valgus/varus e inversão/eversão (Vaughan et al., 1992).

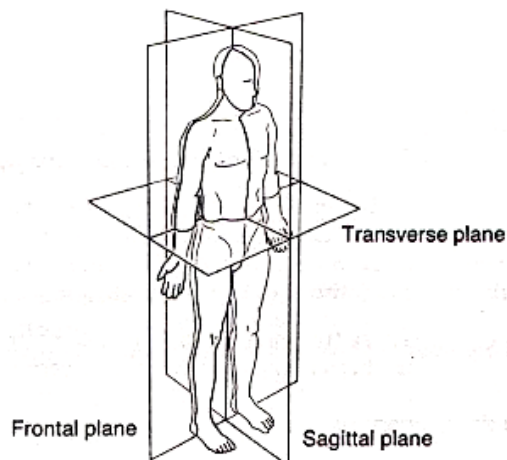


Figura 3.5-Definição de planos de um corpo humano (Vaughan et al., 1992).

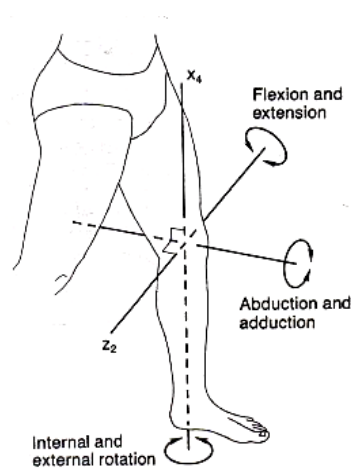


Figura 3.6-Movimentos relacionados ao joelho (Vaughan et al., 1992).

O robô a ser projetado terá que reproduzir o padrão de marcha humana o mais próximo possível do real. Dessa forma, as juntas do robô devem ser capazes de reproduzir movimentos semelhantes aos das articulações humanas. A fim de evitar que o robô fique muito complexo, essas juntas representarão as articulações humanas de uma forma simplificada, porém, guardando, as suas principais características cinemáticas. Realizando uma análise das amplitudes angulares de cada um desses movimentos ao longo do ciclo da marcha humana, percebe-se que alguns deles podem ser considerados menos importantes em relação aos demais. Dessa forma, os graus de liberdade das juntas do robô foram limitados da seguinte maneira:

Juntas	Movimentos	Número de graus de liberdade
Quadril	adução/abdução, flexão/extensão	2
Joelho	flexão/extensão	1
tornozelo	inversão/eversão, flexão/extensão plantar	2

Tabela 1. Graus de liberdade considerados para cada uma das juntas do robô.

O robô apresenta cinco graus de liberdade por perna, tendo, portanto, dez graus de liberdade como um todo, o que já pode ser considerado um sistema bastante complexo. A figura 3.7 representa o esquema cinemático do robô, onde os graus de liberdade, relacionados na tabela 1, são representados

por juntas de revolução simples, apenas com a finalidade de facilitar o entendimento dos seus movimentos.

Com esse alto número de graus de liberdade, além do robô conseguir, de uma forma assistida, reproduzir padrões de marchas reais, ele é capaz de executar uma marcha retilínea de uma forma autônoma. Isto é possível pois, além de se movimentar no plano sagital, o robô consegue se movimentar no plano frontal, podendo, assim, controlar o seu equilíbrio lateral.

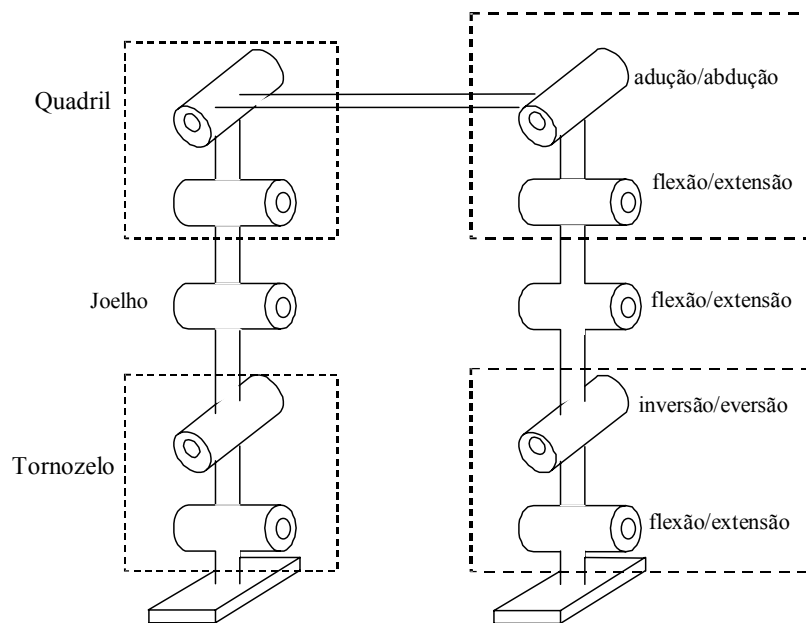


Figura 3.7-Esquema cinemático do robô.

3.3. Seleção dos mecanismos responsáveis pelos movimentos articulares do robô

A articulação do joelho possui apenas um grau de mobilidade (flexão/extensão). Assim, o mecanismo selecionado para essa articulação será uma junta simples de revolução.

A seleção dos mecanismos responsáveis pelos movimentos articulares do quadril e do tornozelo do robô será feita nos próximos subitens.

3.3.1. Mecanismo responsável pela cinemática articular do tornozelo

Este mecanismo deve ser capaz de fornecer os dois movimentos desejados para a articulação do tornozelo, ou seja, os movimentos de flexão/extensão e inversão/eversão do pé. Além disso, para garantir semelhança com o tornozelo humano, os eixos nos quais ocorrem esses movimentos devem estar justapostos.

Parseghian, (2000), propôs a utilização de um mecanismo paralelo com a adição de uma cadeia cinemática passiva, cuja arquitetura está ilustrada pela figura 3.8, para a articulação do tornozelo de seu robô bípede. Esse mecanismo paralelo é composto por duas cadeias ativas que conectam a perna ao pé do robô, fornecendo ao mesmo os graus de mobilidade desejados, e por uma cadeia cinemática passiva cuja função é permitir apenas os movimentos desejados para o pé do robô. As cadeias cinemáticas ativas são compostas por uma junta universal, uma prismática (onde é conectado o atuador) e uma junta esférica. Já a cadeia cinemática passiva é composta apenas por uma junta universal. Além de fornecer os movimentos de flexão/extensão e inversão/eversão para a articulação do tornozelo, esse mecanismo paralelo apresenta uma alta rigidez e uma alta relação de transmissão de torque entre os atuadores e o efetuator (pé). No entanto, esse mecanismo possui algumas desvantagens, dentre elas, um espaço de trabalho reduzido e existência de singularidades internas ao espaço de trabalho.

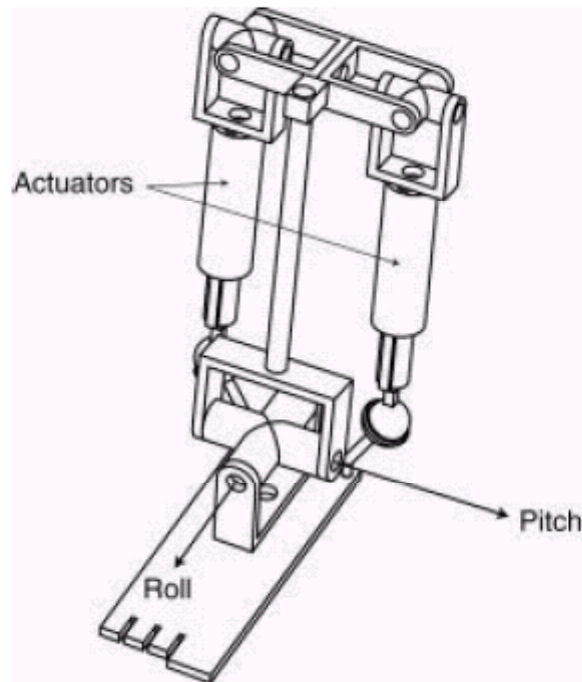


Figura 3.8. Mecanismo paralelo proposto por Parseghian, (2000), para a articulação do tornozelo.

Para o trabalho em questão, o mecanismo paralelo com a adição de uma cadeia cinemática passiva também será adotado para a articulação do tornozelo. Entretanto, conforme sugerido por Piñero-Valle e Pagnota, (2002), na cadeia cinemática ativa, a junta prismática será substituída por uma junta de rotação. A figura 3.9 ilustra a arquitetura do mecanismo paralelo adotada para o tornozelo do robô.

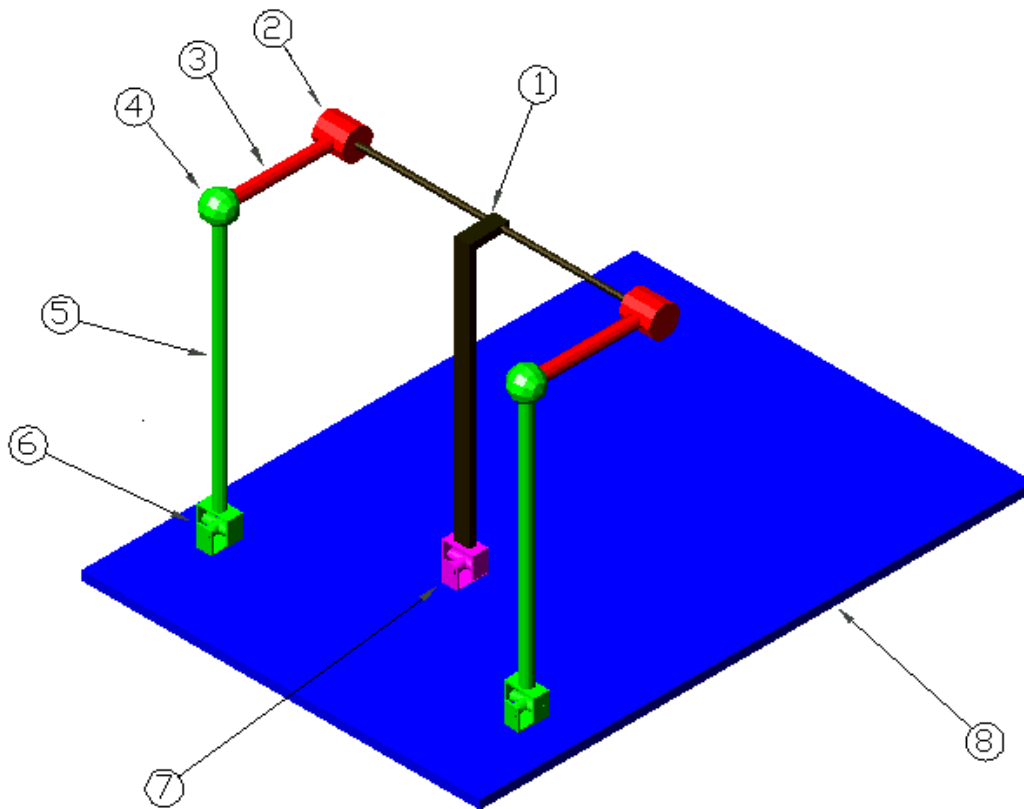


Figura 3.9-Mecanismo paralelo responsável pela cinemática articular do tornozelo.

Na figura 3.9, os índices representam:

1. Base do mecanismo que corresponde à perna do robô.
2. Junta de rotação.
3. Barra conectada à junta de rotação.
4. Junta esférica pertencente à cadeia ativa.
5. Barra conectada à plataforma móvel.
6. Junta universal pertencente à cadeia ativa.
7. Cadeia passiva composta por uma junta universal.
8. Plataforma móvel, ou seja, o pé do robô.

As cadeias cinemáticas ativas são formadas por uma junta de rotação, uma esférica e uma junta universal, totalizando seis graus de mobilidade por cadeia. Já a cadeia passiva é formada por uma junta universal a fim de permitir somente os movimentos desejados para o pé (plataforma móvel). Por fim, os atuadores serão conectados às juntas de rotação.

O funcionamento do mecanismo pode ser explicado da seguinte forma: quando ambas as barras conectadas aos atuadores girarem para cima, o mecanismo realiza um movimento de flexão, porém, se ambas girarem para baixo, ocorre um movimento de extensão. Agora, se uma barra girar para cima e a outra para baixo, o pé realiza o movimento de inversão ou de eversão.

Apenas a título de verificação, será calculado o número de graus de mobilidade do mecanismo proposto utilizando-se o critério de Grübler:

$$GM = 6 \cdot (n - 1) - 5 \cdot np_1 - 4 \cdot np_2 - 3 \cdot np_3 - 2 \cdot np_4 - np_5$$

onde:

n: número de peças que constituem o mecanismo,

np_i , $i=1, \dots, 5$: número de pares cinemáticos com "i" graus de mobilidade.

A figura 3.10 ilustra o diagrama cinemático do mecanismo que ajudará na determinação de seus pares cinemáticos.

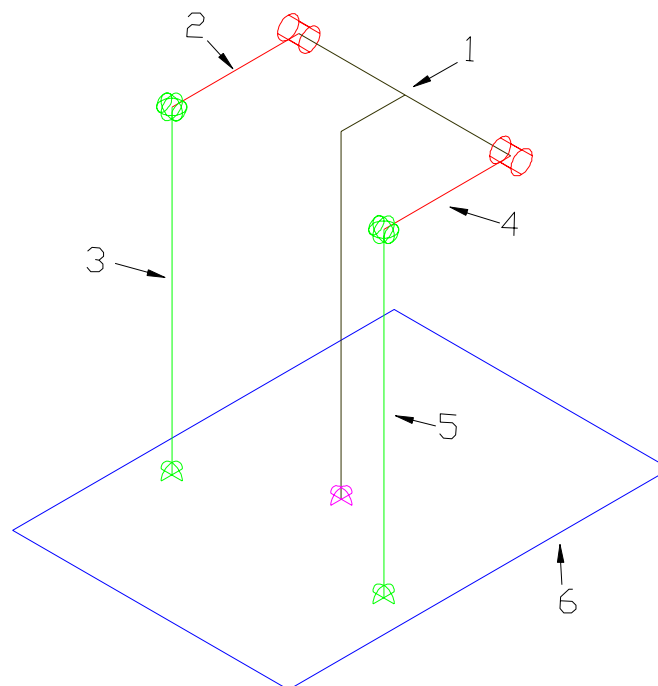


Figura 3.10- Diagrama cinemático do mecanismo selecionado.

Determinação dos pares cinemáticos:

- Pares cinemáticos com um grau de mobilidade: 1-2 e 1-4

- Pares cinemáticos com dois graus de mobilidade: 3-6, 5-6 e 1-6
- Pares cinemáticos com três graus de mobilidade: 2-3 e 4-5.

Assim:

$$\begin{aligned}n &= 6 \\np_1 &= 2 \quad np_2 = 3 \quad np_3 = 2 \\ \Rightarrow GM &= 6 \cdot (6 - 1) - 5 \cdot 2 - 4 \cdot 3 - 3 \cdot 2 = 2\end{aligned}$$

Confirmando, portanto, que o mecanismo selecionado é capaz de fornecer os dois graus de mobilidade requisitados.

Com o intuito de facilitar a construção do mecanismo, as juntas universais das cadeias ativas foram substituídas por juntas esféricas. Utilizando-se novamente o critério de Grübler, obtém-se que o mecanismo, após esta alteração, possuirá quatro graus de mobilidade. Assim, além dos dois graus de mobilidade desejados, o mecanismo possuirá mais dois que são as rotações, em torno do próprio eixo, das barras conectadas à plataforma móvel. Porém, estes graus extras não interferirão no funcionamento do mecanismo, viabilizando, assim, a modificação proposta.

3.3.2. Mecanismo responsável pela cinemática articular do quadril

Esse mecanismo deve ser capaz de fornecer os dois movimentos desejados para a articulação do quadril, ou seja, os movimentos de flexão/extensão e adução/abdução da coxa.

Para essa articulação escolheu-se novamente o mecanismo paralelo com adição de cadeia passiva, pelos mesmos motivos já apresentados no subitem anterior. O mecanismo escolhido está ilustrado na figura 3.11.

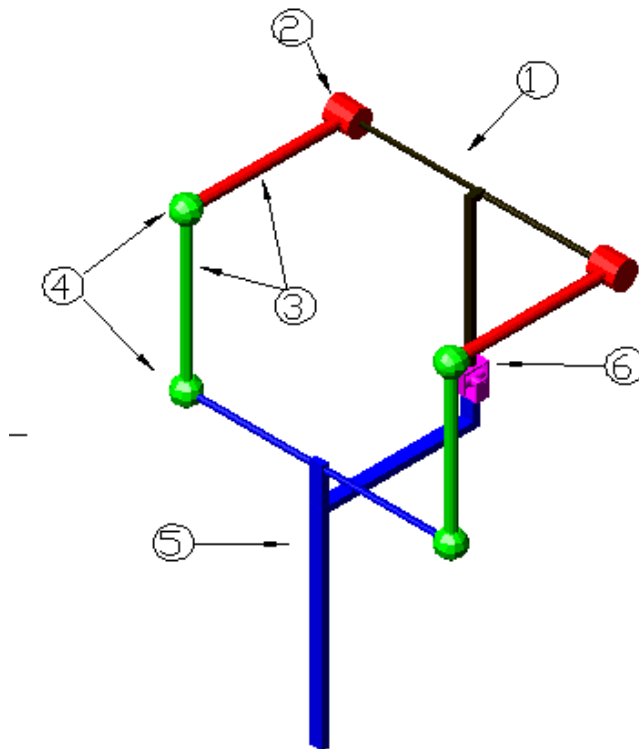


Figura 3.11- Mecanismo paralelo responsável pela cinemática articular do quadril.

Na figura 3.11, os índices representam:

1. Bacia do robô que corresponde à base do mecanismo.
2. Junta de rotação.
3. Barras que constituem a cadeia ativa do mecanismo.
4. Juntas esféricas.
5. Coxa do robô que corresponde à plataforma móvel do mecanismo.
6. Cadeia passiva composta por uma junta universal.

Esse mecanismo é idêntico ao utilizado para a articulação do tornozelo, portanto, a descrição de seu funcionamento e a determinação de seus graus de mobilidade são as mesmas que foram apresentadas no subitem anterior.

3.4. Ciclo da Marcha Humana

O ciclo da marcha humana é dividido, para cada pé, em duas fases, a fase de apoio (stance phase), que corresponde à etapa na qual o pé está em contato com o solo, e a fase de balanço (swing phase) que corresponde à etapa na qual o pé não está mais em contato com o solo e a perna correspondente está se deslocando para a frente (Vaughan et al., 1992). A figura 3.12 ilustra esse ciclo para um garoto normal de oito anos. Por convenção, o ciclo começa no instante no qual um dos pés (no caso o pé direito) entra em contato com o solo.

A fase de apoio pode ser subdividida em três outras fases:

1. “First double support” (primeiro apoio duplo): quando os dois pés estão apoiados no solo;
2. “Single limb stance” (apoio simples): quando apenas um dos pés está em contato com o solo enquanto a outra perna está em balanço;
3. “Second double support” (segundo apoio duplo): quando os dois pés estão novamente apoiados no solo.

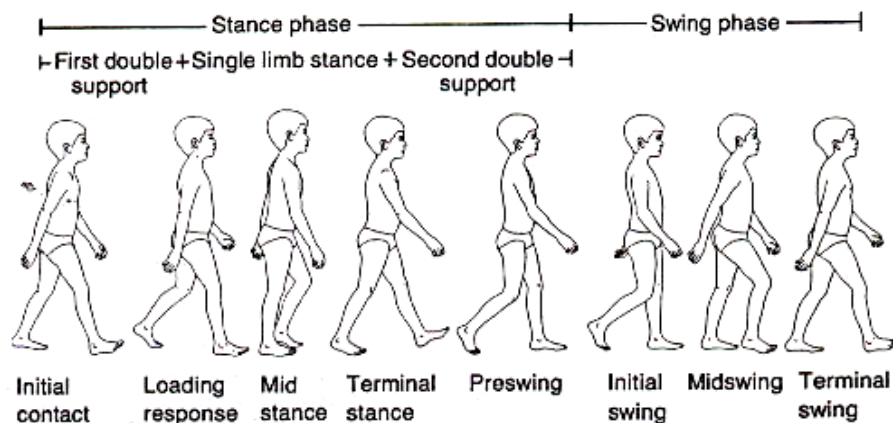


Figura 3.12- Ciclo da marcha de um garoto normal de oito anos de idade (Vaughan et al., 1992).

Apesar da nomenclatura da figura 3.12 se referir ao lado direito do corpo, a mesma terminologia pode ser aplicada ao lado esquerdo, que, para uma pessoa normal, está meio ciclo atrasada (ou adiantada) em relação ao lado direito. Assim, a fase de primeiro apoio duplo do lado direito corresponde à fase de segundo apoio duplo do lado esquerdo e vice-versa. Note que, para

uma marcha normal, existe uma simetria entre os lados direito e esquerdo do corpo. Entretanto, em marchas patológicas, é muito comum a não existência dessa simetria (Vaughan et al., 1992).

Normalmente o ciclo da marcha humana é dividido em oito eventos ou períodos, dos quais cinco ocorrem durante a fase de postura e três durante a fase de balanço:

1. “Heel strike”: corresponde ao início do ciclo da marcha e representa o ponto no qual o centro de gravidade do corpo está em sua posição mais baixa;
2. “Foot-flat”: instante no qual toda a superfície do pé está em contato com o solo;
3. “Midstance”: instante no qual a perna em balanço passa pela perna apoiada e o centro de gravidade do corpo está em sua posição mais alta;
4. “Heel-off”: instante no qual o calcanhar perde contato com o solo;
5. “Toe-off”: instante no qual os dedos do pé perdem contato com o solo, terminando, assim, a fase de postura;
6. “Acceleration”: instante, logo após do evento “toe-off”, no qual a perna é acelerada para frente;
7. “Midswing”: instante no qual a perna em balanço passa pela perna apoiada, coincidindo com o período de “midstance” do outro pé;
8. “Desacceleration”: desaceleração do pé preparando o próximo “heel strike”.

A figura 3.13 ilustra esses eventos durante o ciclo da marcha.

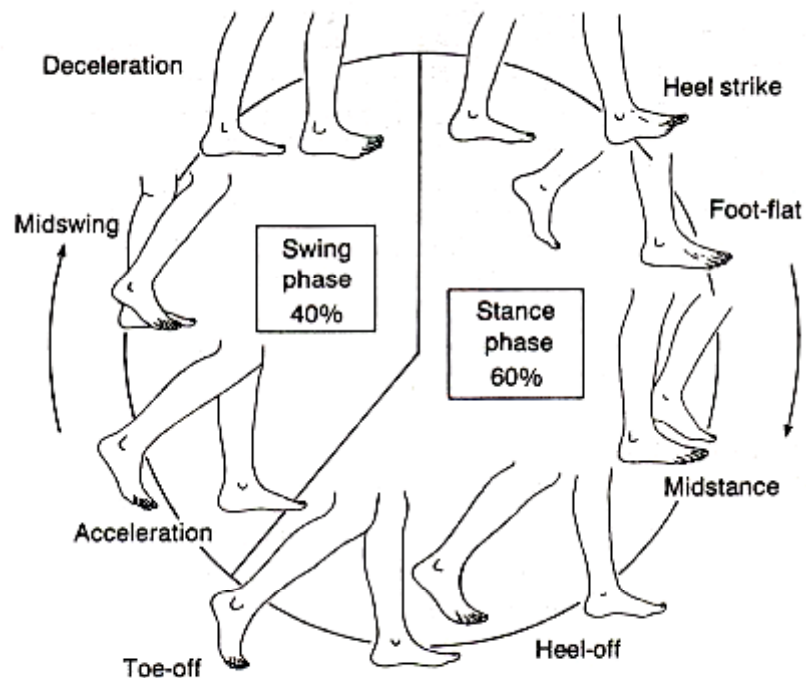


Figura 3.13- Eventos durante o ciclo da marcha humana (Vaughan et al., 1992).

Analisado o ciclo da marcha humana, o próximo passo corresponde à seleção dos sensores responsáveis pela avaliação da reprodução da marcha humana por parte do robô. Para determinar de que forma os pés do robô estão interagindo com o solo, dois tipos de sensores serão utilizados. O primeiro corresponde a sensores de contato, localizados na sola dos pés do robô, que são responsáveis pela identificação do período da marcha (ver figura 3.13) no qual o robô se encontra. O segundo corresponde a sensores de orientação que são responsáveis pela determinação da angulação dos pés do robô em relação ao solo. Agora, para verificar se as juntas do robô estão reproduzindo os movimentos reais das articulações humanas, serão utilizados sensores de posicionamento angular localizados nos atuadores pertencentes aos mecanismos responsáveis pelos movimentos articulares do robô bípede. Por fim, um sensor de orientação, localizado na pélvis do robô, será o responsável pela determinação da orientação do robô bípede em relação a um referencial inercial.