

RODRIGO MATOS CARNIER

Estudo do Consumo Energético de um
Sistema de Controle ZMP para Robôs Bípedes

São Paulo
2013

RODRIGO MATOS CARNIER

Estudo do Consumo Energético de um Sistema de Controle ZMP para Robôs Bípedes

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica

São Paulo
2013

RODRIGO MATOS CARNIER

Estudo do Consumo Energético de um Sistema de Controle ZMP para Robôs Bípedes

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Arturo
Forner-Cordero

São Paulo
2013

FICHA CATALOGRÁFICA

Carnier, Rodrigo Matos

Estudo do consumo energético de um sistema de controle ZMP para robôs bípedes / R.M. Carnier. - São Paulo, 2013. 63 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Robôs 2.Robótica 3.Consumo energético 4.Controle de estabilidade da marcha I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II. t.

Dedico este trabalho aos meus pais, por todas as oportunidades que eles me proporcionaram ao investir em minha educação e por me oferecerem inúmeras formas de suporte para que eu chegasse até este momento de conclusão do curso de engenharia.

Agradecimentos

Ofereço estes agradecimentos ao meu professor-orientador por sua atenção e paciência ao longo dos anos em todas as oportunidades de trabalhos científicos onde fui orientado, aos colegas de laboratório pelo aprendizado e enriquecimento, que eu certamente não obteria sozinho, e à Escola Politécnica pelo padrão de excelência estabelecido em engenharia.

Resumo

O campo de pesquisa da estabilidade da marcha bípede robótica apresenta duas linhas principais de desenvolvimento: robôs de controle estático da caminhada e robôs de controle dinâmico semipassivo. A primeira linha baseia-se no conceito de Zero-Moment Point (ZMP), uma estratégia de controle do equilíbrio do centro de massa do robô através da localização do ponto onde atua a resultante das forças e dos momentos do terreno sobre o pé do robô. Tal abordagem de controle permite movimentos extremamente versáteis ao robô, porém gera um alto consumo energético, pois as juntas são atuadas continuamente. Já a segunda linha baseia-se no conceito de Ciclos Limites e busca reproduzir a dinâmica da marcha humana, reaproveitando a dinâmica natural de seus elementos estruturais para realizar alguns dos deslocamentos necessários nas juntas, obtendo uma economia de energia significativa em comparação aos controles em ZMP. Entretanto, tal estratégia possui limitações para realizar grandes mudanças de movimento, por não possuir um equilíbrio estático, mas dinâmico e dependente de um movimento contínuo, além de ter dificuldades para reagir a perturbações. Este projeto se propõe a implementar um sistema de controle de marcha baseado em ZMP para um modelo virtual de robô bípede, e estudar o consumo energético das juntas do robô em diversas fases da marcha, a fim de identificar situações em que a dinâmica do movimento natural do robô pode ser reaproveitada e outras oportunidades de economia energética no acionamento dos atuadores, baseadas no comportamento cinemático e dinâmico do modelo durante a marcha. Espera-se com isto identificar oportunidades para futuros projetos que busquem aumentar a eficiência energética de um sistema ZMP, pois problema do consumo é comum em abordagens ZMP devido à rigidez dos atuadores, os quais normalmente controlam continuamente a posição, velocidade e aceleração do pé do robô em cada ponto de sua trajetória.

Palavras-chave: *robô bípede, marcha robótica, Zero-Moment Point, controle de estabilidade da marcha, consumo energético*

Abstract

The field of research of robotic bipedal gait stability has two main lines of research for gait control: static walking and semipassive dynamic walking. The first line utilizes the concept of Zero-Moment Point (ZMP), a control strategy to balance the center of mass of robots by locating the point where the resultant of forces and momentum from the ground is applied on the robot's foot. This approach allows extremely versatile movements to the robot, but demands a high energy consumption, since the joints are actuated continuously. The second line of control is based on the concept of limit cycles and seeks to reproduce the dynamics of human gait, reusing the natural dynamics of its structural elements to perform some of the necessary displacements of joints, obtaining a significant power saving compared to controls systems based on ZMP. However, this strategy has limitations to make big changes in mid-movement, since it has not a static balance but a dynamic one, and dependent on a continuous motion, and difficulties to react to perturbations. This project proposes to implement a gait control system based on ZMP to be used with a virtual model of biped robot, and study the energy consumption of the joints of the robot in various phases of gait, in order to identify situations in which the dynamics of natural movement of the robot can be used to save energy, together with identifying other energy-saving opportunities when setting the actuators, based on kinematic and dynamic behavior of the model during gait. It is hoped to identify opportunities for future projects that seek to increase the energy efficiency of a ZMP strategy, because consumption problem is common in ZMP control systems, due to the rigidity of the actuators – which typically monitor continuously the position, velocity and acceleration of the feet of the robot in every point of its trajectory.

Keywords: *biped robot, robotic walking, Zero-Moment Point, walking stability control, energy consumption*

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Justificativa do Projeto	1
1.2	Objetivos do Projeto	3
1.3	O Estado da Arte	3
1.4	Embasamento Teórico	9
1.4.1	Conceito de ZMP	9
1.4.2	Cálculo da posição do ZMP	10
1.4.3	Síntese da marcha bípede através do posicionamento do ZMP	12
1.4.4	Determinação da trajetória do CM	14
1.4.5	Equacionamento da geração da trajetória do CM	15
2	Desenvolvimento	19
2.1	Especificações	19
2.2	Metodologia	20
2.2.1	Síntese da Marcha Bípede	20
3	Resultados	23
3.1	Síntese do Padrão de Marcha	23
3.1.1	Trajetoória dos pés	23
3.1.2	Trajetoória desejada para o ZMP	26
3.1.3	Trajetoória do CM	27
3.1.4	Estimativa da margem de erro de posicionamento do ZMP	29
3.1.5	Limitações do algoritmo para a geração de padrões de marcha	30
3.1.6	Modificação do padrão de marcha gerado	35
3.1.7	Geração das posições articulares das juntas do robô	39
3.2	Controle de Estabilidade	41
3.2.1	Desenvolvimento de um modelo de impacto para o SimMechanics	41
3.2.2	Modelo 2D desenvolvido em SimMechanics para a marcha em malha aberta	42
3.2.3	Resultados das simulações da marcha em malha aberta	43
3.2.4	Modelo 2D desenvolvido em SimMechanics para controle da marcha em malha fechada	51
3.3	Estudo do Consumo Energético	52
3.3.1	Consumo Energético do Padrão de Marcha com Paradas do CM	52

3.3.2	Consumo Energético do Padrão de Marcha com Movimento Contínuo do CM	54
3.3.3	Comparação com o Consumo Energético de um Padrão de Marcha Realizado por um Ser Humano de Mesmas Dimensões	55
4	Conclusão	57
	Referências Bibliográficas	58
	Glossário	63

Lista de Figuras

1.1	Robô ASIMO, desenvolvido pela HONDA. [2]	4
1.2	Robô WABIAN-2R, desenvolvido pela Universidade de Waseda, Japão. [31]	4
1.3	Robô passivo caminhando em uma rampa inclinada sem atuação. [22]	5
1.4	Representação de um Ciclo Limite no espaço de estados. [34]	5
1.5	Robô DENISE, desenvolvido pela Universidade de Delft, Holanda. [10]	6
1.6	Robô DRIBBEL, desenvolvido pela Universidade de Twente, Holanda. [27]	6
1.7	Regiões de capturabilidade em N-passos. [20]	7
1.8	Robô PETMAN. [7]	8
1.9	Robô BIGDOG. [5]	8
1.10	Robô HRP-3P. [1]	8
1.11	Robô H7. [26]	8
1.12	a) Situação de equilíbrio em que o ZMP coincide com o CoP. b) Situação de desequilíbrio onde o ZMP não coincide com o CoP e está fora da sola do pé do robô (FZMP). [30]	10
1.13	Modelo do carrinho de mesa, usado para o cálculo da posição do ZMP na sola do pé de um robô a partir da posição e aceleração do centro de massa do robô. [18]	11
1.14	Diagrama de blocos do processo original de síntese da marcha segundo o ZMP.	12
1.15	Robô WL-12, com o sistema de compensação do ZMP por uma massa no torso.	13
1.16	Diagrama de blocos dos processos modernos de síntese da marcha segundo o ZMP.	14
2.1	Blocos do algoritmo de síntese da marcha segundo o ZMP.	22
3.1	Deslocamentos horizontais e verticais dos pés direito e esquerdo, durante as passadas do ciclo da marcha, para a velocidade de 0.1m/s.	25
3.2	Deslocamento da posição do ZMP de referência, usado na síntese da marcha, para a velocidade de 0.1m/s.	26
3.3	Deslocamento da posição do CM do modelo, junto com o deslocamento dese- jado do ZMP e com o deslocamento real final do ZMP, para a velocidade de 0.1m/s.	27
3.4	Deslocamento da posição do CM do modelo apresentado em escala maior. Tre- cho representando o início da primeira transposição do CM/ZMP.	28

3.5	Deslocamento da posição do CM do modelo apresentado em escala maior. Trecho representando o final da segunda transposição do CM/ZMP.	29
3.6	Erro de posição do ZMP real para a velocidade de 0.1m/s, estimado após o fim do algoritmo.	30
3.7	Deslocamento da posição do CM do modelo, junto com o deslocamento desejado do ZMP e com o deslocamento real final do ZMP, para a velocidade de 0.265m/s.	31
3.8	Erro de posição do ZMP real para a velocidade de 0.265m/s, estimado após o fim do algoritmo.	32
3.9	Deslocamento da posição do CM do modelo, junto com o deslocamento desejado do ZMP e com o deslocamento real final do ZMP, para a velocidade de 0.3m/s.	33
3.10	Erro de posição do ZMP real para a velocidade de 0.3m/s, estimado após o fim do algoritmo.	33
3.11	Deslocamento da posição do CM do modelo, junto com o deslocamento desejado do ZMP e com o deslocamento real final do ZMP, para a velocidade de 0.3m/s, usando um coeficiente de performance Q menor.	34
3.12	Deslocamento da posição do ZMP de referência para a velocidade de 0.3m/s, utilizando o algoritmo de deslocamento contínuo do ZMP.	36
3.13	Deslocamento da posição do CM/ZMP do modelo para a velocidade de 0.3m/s, utilizando o algoritmo de deslocamento contínuo do ZMP.	36
3.14	Erro de posição do ZMP real para a velocidade de 0.3m/s, utilizando o algoritmo de deslocamento contínuo do ZMP.	37
3.15	Deslocamento da posição do CM/ZMP do modelo para a velocidade de 0.4m/s, utilizando o algoritmo de deslocamento contínuo do ZMP.	37
3.16	Erro de posição do ZMP real para a velocidade de 0.4m/s, utilizando o algoritmo de deslocamento contínuo do ZMP.	38
3.17	Deslocamentos angulares das juntas da perna esquerda para o primeiro padrão de marcha, na velocidade de 0.1m/s.	39
3.18	Deslocamentos angulares das juntas da perna direita para o primeiro padrão de marcha, na velocidade de 0.1m/s.	40
3.19	Diagrama de blocos para simulação de colisões com o chão em um modelo do Simmechanics. Baseado em [3]	41
3.20	Visualização do modelo de robô gerado no Simulink com movimentação restrita ao plano XY a) em perspectiva, e b) em perfil.	42

3.21	Blocos de modelagem do Simulink para a simulação da marcha gerada (em malha aberta) pelo processo de síntese. Os itens em verde são os links do modelo, itens em ciano são as juntas e itens em azul são os blocos para a entrada e saída de dados de/para o Workspace do MATLAB.	43
3.22	Posições horizontal e vertical do torso durante a marcha controlada em malha aberta.	44
3.23	Posições horizontal e vertical do pé esquerdo durante a marcha controlada em malha aberta.	45
3.24	Posições horizontal e vertical do pé direito durante a marcha controlada em malha aberta.	46
3.25	Posições horizontal e vertical do CM durante a marcha controlada em malha aberta.	47
3.26	Oscilação da posição vertical do CM durante a marcha controlada em malha aberta.	48
3.27	Deslocamento do CM planejado e simulado na marcha controlada em malha aberta.	49
3.28	Erro de posição do CM simulado na marcha controlada em malha aberta. . . .	50
3.29	Blocos de modelagem do Simulink para a simulação do sistema de controle de estabilidade da marcha. Adicionalmente aos itens descritos na figura anterior, neste modelo há o acréscimo do bloco em laranja, que contém o bloco com a lógica de controle em malha fechada.	51
3.30	Soma das potências realizadas pelas juntas do modelo no primeiro padrão de marcha.	53
3.31	Soma do valor absoluto das potências realizadas pelas juntas do modelo no primeiro padrão de marcha.	53
3.32	Soma das potências realizadas pelas juntas do modelo no segundo padrão de marcha.	54
3.33	Soma do valor absoluto das potências realizadas pelas juntas do modelo no segundo padrão de marcha.	55
3.34	Soma do valor das potências realizadas pelas juntas de um ser humano durante a marcha. Dados retirados de [33].	56
3.35	Soma do valor absoluto das potências realizadas pelas juntas de um ser humano durante a marcha. Dados retirados de [33].	56

Capítulo 1

Introdução

1.1 Justificativa do Projeto

Sistemas robóticos são desenvolvidos pelo ser humano desde o século XVII. Inicialmente pensados como brinquedos mecânicos automáticos, tais sistemas começaram a ser utilizados em aplicações industriais partir de meados do século XX. Usados para automatizar tarefas mecânicas, estes robôs se configuram como estruturas articuladas presas a uma base, atuando as juntas de uma estrutura seriada ou paralela de articulações para controlar as variáveis cinemáticas ou dinâmicas de sua extremidade, ou atuador. Na década de 70, porém, a comunidade científica desenvolveu estudos pioneiros [29] sobre o controle de movimento de um novo ramo da robótica: a locomoção bípede. Este campo de pesquisa é inspirado no movimento de caminhada (a marcha) do ser humano, e trata de robôs desvinculados do terreno que se locomovem através do balanço de sua estrutura mecânica, apoiada ao chão por meio de um ponto não atuado - a sola do pé do robô.

Uma das principais motivações das pesquisas em robótica bípede é a melhor compreensão dos mecanismos e estratégias de controle, robustez e economia energética da marcha humana, a fim de desenvolver-se tecnologia que apóie sistemas de recuperação e/ou auxílio da marcha de pessoas lesionadas ou incapacitadas. As próteses e as órteses para membros inferiores são soluções tecnológicas similares aos robôs bípedes com os quais elas compartilham muitos elementos conceituais e estratégias de controle, influenciando-se mutuamente no desenvolvimento do estado da arte. O robô japonês WABIAN-2R, por exemplo, teve como um dos objetivos de seu desenvolvimento a capacidade de utilização de equipamentos de reabilitação (órteses) para avaliar a eficácia dos mesmos, obtendo dados através dos seus sensores [23].

Uma motivação paralela e igualmente importante são os problemas e acidentes de locomoção que idosos experimentam. Tal questão está se tornando cada vez mais relevante no Brasil, pois segundo o IBGE, já se verifica no país o fenômeno do envelhecimento da população [16]. Assim como as próteses e as órteses, os instrumentos de fisioterapia e exercício de caminhada se beneficiam dos estudos da marcha humana realizados para robôs, e o estudo das estratégias de recuperação da marcha após o efeito de perturbações pode colaborar para a compreensão do fenômeno da queda durante a marcha – uma ocorrência de graves consequências físicas para idosos [12].

Para o futuro, a comunidade científica visiona o desenvolvimento de robôs que auxiliem o ser humano diretamente em suas atividades diárias, seja na realização de tarefas domésticas, seja no apoio direto a idosos na tarefa de locomoção. Idosos em particular se beneficiariam muito de substitutos em tarefas domésticas, pois também se diminuiria o risco de acidentes domésticos. Robôs bípedes humanóides seriam mais desejáveis em relação a outros tipos de robô pela possibilidade de um melhor desempenho em ambientes internos construídos para uso humano, como edifícios. Da mesma forma, a utilização de um robô mais familiar ao ser humano minimizaria o impacto da introdução permanente de um instrumento tecnológico no seu cotidiano.

Outra aplicação importante que se espera obter é a substituição do ser humano em situações de risco onde robôs industriais não podem atuar. Enquadra-se em tal situação a maioria dos ambientes abertos, não-controlados e/ou desconhecidos onde a instalação da estrutura de um robô industrial é inviável ou simplesmente impossível. A acessibilidade de robôs com pernas é consideravelmente superior à de robôs com rodas, o que privilegiaria os primeiros em vários ambientes de terreno irregular. Eventos emergenciais com a permanência da situação de risco para o ser humano, como alguns acidentes naturais e a queda de construções, oferecem outra situação de aplicação privilegiada; a necessidade de intervenção rápida inviabiliza a utilização de robôs industriais e outros instrumentos tecnológicos não-autônomos, enquanto um ambiente nuclear, química ou fisicamente hostil ao ser humano oferece grandes riscos aos próprios profissionais de socorro. Robôs que pudessem substituir o homem nestas situações seriam de valor inestimável.

Toma-se como exemplo o acidente da usina nuclear de Fukushima, ocorrido em 2011 no Japão, que deixou evidente a necessidade de soluções robóticas para a administração de emergências de alto risco. Nenhum protótipo robótico atual era capaz de atuar na situação de risco da usina, em substituição aos profissionais enviados para contornar o vazamento nuclear. Como resposta a esta necessidade, a edição de 2013 da DARPA Robotics Challenge teve como tema da competição o desenvolvimento de um sistema robótico que pudesse caminhar em terreno irregular e realizar tarefas de contenção de riscos em um ambiente de acidente simulado. Tal escolha é bastante relevante, considerando-se que as competições organizadas pela DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) são propostas para as universidades de ponta do mundo a fim de estimular o progresso do estado da arte da robótica. O tema da competição em 2013 demonstra de maneira clara a alta expectativa de aplicação da robótica bípede e a necessidade de desenvolvimento das soluções atuais.

1.2 Objetivos do Projeto

Este trabalho se propõe a desenvolver um sistema de geração de marcha e de controle da sua estabilidade para um robô bípede usando a estratégia de controle Zero-Moment Point. O sistema será implementado em um modelo virtual de robô baseado em um protótipo já existente. Tal sistema de controle deve ser capaz percorrer ambientes não-estruturados e negociar obstáculos no caminho. Propõe-se também estudar o consumo energético gerado pelos atuadores das juntas do robô e identificar oportunidades de reaproveitamento energético do movimento natural do robô.

Propõe-se neste projeto implementar um sistema de controle da marcha bípede que negocie obstáculos, mudanças de direção e velocidade. Para tanto, o sistema deverá basear-se na abordagem do Zero-Moment Point. Após o desenvolvimento do sistema de controle, será feito um estudo do consumo energético das juntas do robô em diversas fases da marcha, a fim de identificar situações em que a dinâmica do movimento natural do robô pode ser reaproveitada. Espera-se com isto identificar oportunidades para futuros projetos que busquem aumentar a eficiência energética de um sistema ZMP, pois problema do consumo é comum em abordagens ZMP devido à rigidez dos atuadores, os quais normalmente controlam continuamente a posição, velocidade e aceleração do pé do robô em cada ponto de sua trajetória.

1.3 O Estado da Arte

O campo de pesquisa da robótica bípede apresenta duas linhas principais de desenvolvimento: robôs de controle estático da caminhada e robôs de controle dinâmico passivo. A primeira abordagem de controle engloba robôs versáteis em relação à execução da marcha, que mantêm o equilíbrio de seu centro de massa por meio das forças reativas atuantes no ponto de suporte, o pé. A segunda abordagem busca reproduzir a dinâmica da marcha humana reaproveitando a energia cinética de seus elementos estruturais, obtendo economia de energia e um movimento mais natural, através da abordagem dos Limit Cycles [13].

A primeira linha baseia-se no conceito de Zero-Moment Point (ZMP) [30], uma estratégia de controle bem estabelecida e utilizada pela comunidade científica onde o balanço dinâmico do robô é mantido através do controle da localização do ponto onde a resultante das forças e a dos momentos do terreno atuam no pé do robô (o ZMP). Para isso, atuam-se todas ou quase todas as juntas do robô, controlando ativamente cada posição das mesmas durante a sua trajetória. A vantagem do ZMP é a sua versatilidade e capacidade de negociar obstáculos, velocidades diferentes de marcha e mudanças de direção. A desvantagem, porém, é não ser econômica energeticamente e possuir problemas de robustez em ambientes não-estruturados e perturba-



Figura 1.1: Robô ASIMO, desenvolvido pela HONDA. [2]



Figura 1.2: Robô WABIAN-2R, desenvolvido pela Universidade de Waseda, Japão. [31]

ções não-previstas [4]. Esta linha de controle é utilizada na maioria dos protótipos de robôs bípedes existentes, destacando-se os robôs ASIMO de 26 GdL, 6 GdL por perna (Figura 1.1), desenvolvido pela empresa japonesa Honda [25], e o WABIAN-2R de 41 GdL, 7 GdL por perna (Figura 1.2), desenvolvido pela Universidade de Waseda, no Japão [23].

A segunda linha de desenvolvimento baseia-se nos Ciclos Limites. Os ciclos limites apresentam algumas propriedades particulares e podem ser analisados matematicamente, propiciando uma ferramenta de análise e controle da marcha dos robôs. Tal estratégia foi impulsionada por estudos da década de 90 [22] que desenvolveram robôs totalmente passivos capazes de descer uma rampa sem qualquer atuação, devido à sua estrutura mecânica (Figura 1.3).

Para um sistema de controle de estabilidade baseado em Ciclos Limites, a estabilidade consiste não em um ponto no espaço de estados, mas em um conjunto de pontos que se repetem no tempo, um ciclo de configurações mecânicas que configuram a própria marcha cíclica humana (Figura 1.4). A estratégia da abordagem do Ciclo Limite consiste em encontrar um ciclo limite de operação para o robô e atuar suas juntas minimamente, inserindo energia no sistema semi-passivo apenas no começo do ciclo e em outros pontos-chave do movimento para restituir as perdas mecânicas. A sua principal vantagem é a grande economia de energia e a geração de um movimento muito próximo ao humano, o que interessa às aplicações onde se tenta reproduzi-lo (como próteses e órteses). A desvantagem é a dificuldade em lidar com velocidades variáveis, desníveis relevantes de terreno e mudanças de direção. Num esforço para contornar estes problemas, alguns trabalhos foram feitos estendendo a abordagem. Foi proposto um modelo bípede

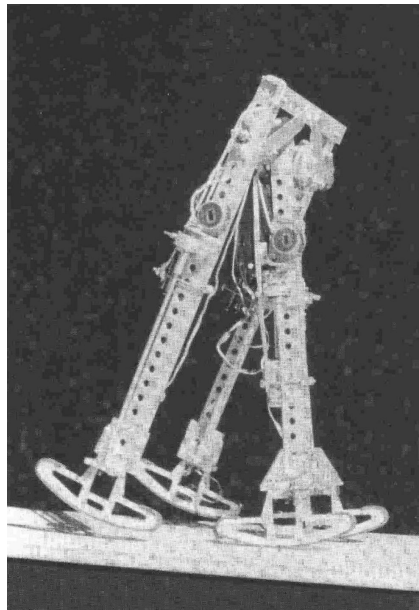


Figura 1.3: Robô passivo caminhando em uma rampa inclinada sem atuação. [22]

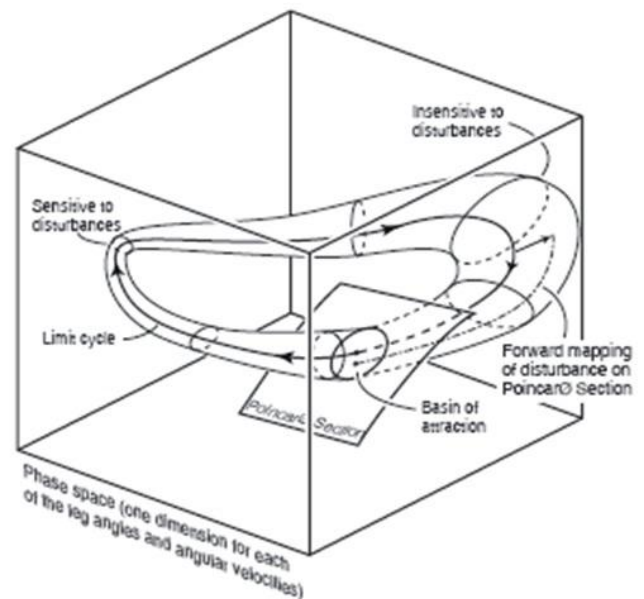


Figura 1.4: Representação de um Ciclo Limite no espaço de estados. [34]

semipassivo que utiliza um controle do torso desacoplado do controle da marcha para aumentar a capacidade de negociar desníveis imprevistos de terreno [9]. Da mesma forma, propôs-se a utilização de outra abordagem matemática, utilizando linearização transversal, para a análise e controle de uma marcha com características não-periódicas, realizada em terreno irregular [21]. Embora diversos robôs tenham sido realizados utilizando esta abordagem de controle, mostrou-se inerente à mesma a dificuldade em encontrar matematicamente um ciclo limite para modelos complexos de robôs, como os protótipos reais geralmente são. Isto impede a aplicação da abordagem em robôs multiarticulados e atuados em muitas juntas. Foi proposto a utilização de algoritmos genéticos para a identificação de ciclos limites em modelos bípedes [8], porém este método não é determinístico e não garante o sucesso da busca. Desta forma, geralmente os estudos de ciclo limite utilizam robôs bípedes muito simplificados cuja estrutura mecânica é otimizada para operar em um ciclo limite, realizando protótipos que são pouco atuados e pouco articulados [14]. Além de tais robôs não serem robustos, não existe um procedimento claro para projetá-los e é difícil colocá-los em um ciclo limite estável ao iniciar-se a marcha. Robôs controlados por Ciclos Limites incluem DENISE de 5 GdL por perna (Figura 1.5), na Universidade de Delft [34] e DRIBBEL de 3 GdL por perna (Figura 1.6), na Universidade de Twente [11].

Embora diversos protótipos que aplicassem estas metodologias tenham sido realizados com sucesso, a robustez da marcha a grandes perturbações imprevistas ainda é um problema comum. Estratégias de recuperação da marcha a tropeços têm sido estudadas [12], e há protótipos de robôs que reagem a perturbações assumindo estratégias similares [4]. Porém a implemen-

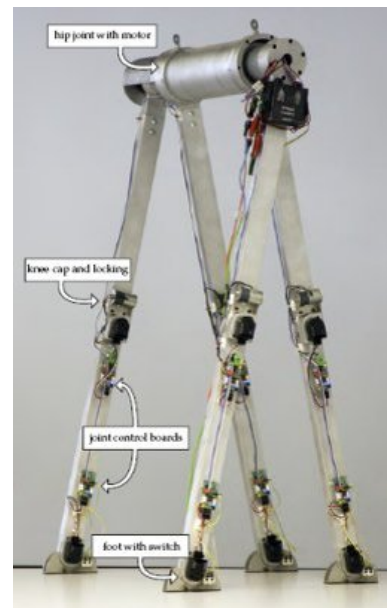


Figura 1.5: Robô DENISE, desenvolvido pela Universidade de Delft, Holanda. [10]

Figura 1.6: Robô DRIBBEL, desenvolvido pela Universidade de Twente, Holanda. [27]

tação das mesmas sobre as abordagens de controle descritas ocorre como uma adaptação do comportamento do robô, e não como um comportamento previsto pelas abordagens.

Buscando suprir esta deficiência, uma nova abordagem foi apresentada à comunidade científica em 2011. Chamada de Capturabilidade em N Passos (N-step Capturability) [20], esta estratégia de controle se propõe a garantir a robustez de um modelo bípede tanto para terrenos irregulares quanto para perturbações imprevistas. O conceito consiste em levar um sistema em movimento a uma situação de repouso sem cair, realizando N ou menos passos. A trajetória do robô ao longo destes passos é gerada definindo, a cada passo, uma área dentro da qual seu pé pode ser posicionado (Figura 1.7). Realizando um passo dentro desta área, o sistema se torna capturável em N-1 passos (isto é, vem a parar seu movimento sem cair em N-1 passos). Tal conceito é muito similar ao de recuperação da marcha após uma perturbação com tropeço [12].

Desta maneira, a tolerância a perturbações expande-se da sola do pé do robô (o critério de estabilidade para o ZMP e abordagens derivadas) para uma área de possíveis pontos onde o pé pode ser posicionado (uma área para cada passo) até que o robô chegue aonde planeja ou recupere o balanço. O robô Tulip de 14 GdL, com 6 GdL por perna, da Universidade de Delft [15], utiliza esta abordagem. Desenvolvido por meio de vários protótipos a partir de um modelo para Ciclos Limites, Tulip foi idealizado para requerer baixos níveis de controle para a estabilização da marcha.

O protótipo de robô bípede considerado mais robusto a perturbações é o PETMAN (Boston Dynamics, 2013), com 6GdL por perna (Figura 1.8), feito para o Exército dos EUA. Ele foi

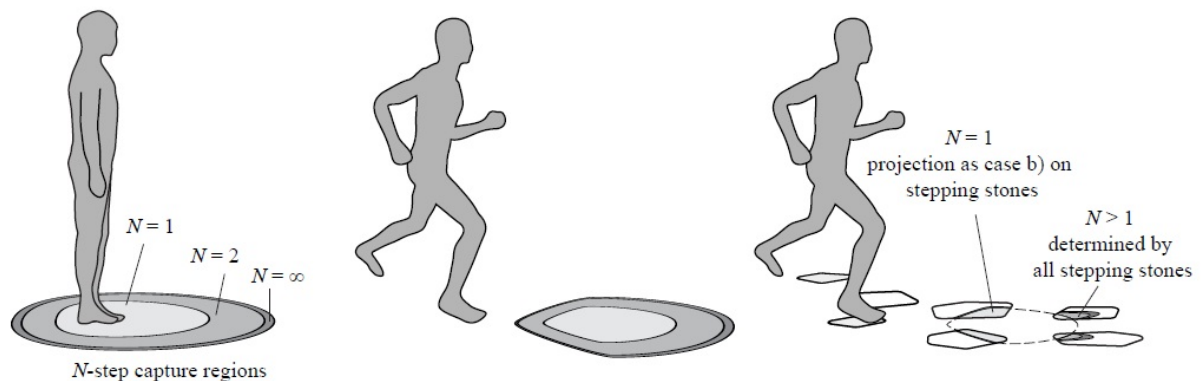


Figura 1.7: Regiões de capturabilidade em N-passos. [20]

desenvolvido a partir de um protótipo quadrúpede, o BIGDOG [24], um protótipo de quatro pernas com 4 GdL por perna (Figura 1.9), que é capaz de percorrer terrenos altamente irregulares e de recuperar sua marcha mesmo após perturbações violentas. A estratégia de controle utilizada pelos protótipos não foi revelada, por serem posse do Exército dos EUA.

O desempenho do PETMAN foi exibido através do seu movimento muito similar ao do ser humano e à sua capacidade de recuperação da estabilidade da marcha após perturbações intensas. Contudo, o protótipo não foi desenvolvido com eficiência energética em mente. A potência requerida pelos atuadores do mesmo levou ao uso de uma fonte externa de energia no PETMAN e ao uso de motores de combustão no BIGDOG, notáveis por sua alta potência e baixo rendimento energético, relativamente a outros tipos de motores.

Na última década, tem-se desenvolvido no Japão protótipos de robôs bípedes com uma proposta de melhor desempenho ao interagir com seres humanos e realizar uma variedade maior de tarefas [25]. Entre tais robôs, podemos citar os modelos P2, P3 e ASIMO da Honda [25], o WABIAN-2R da Universidade de Waseda [23], o modelo H7 da Universidade de Tóquio (Figura 1.11) e o modelo HRP-3P (Figura 1.10) das Indústrias Kawada.

Tais modelos são notáveis pelo aumento da complexidade do robô, tanto pelo aumento dos graus de liberdade quanto pela inclusão de algumas posturas físicas similares ao ser humano que não são usuais em robôs, como a extensão completa do joelho do robô durante o balanço (a maioria dos robôs bípedes mantém o joelho dobrado para melhorar o equilíbrio, gerando também um maior gasto energético) e a inclusão de um grau de liberdade no pé para reproduzir o efeito do esforço dos dedos [23]. Contudo, o grande número de graus de liberdade e o correspondente aumento de juntas atuadas dificultam a utilização da estratégia de Ciclos Limites, incorrendo na utilização do ZMP como estratégia de controle pela grande maioria destes modelos.

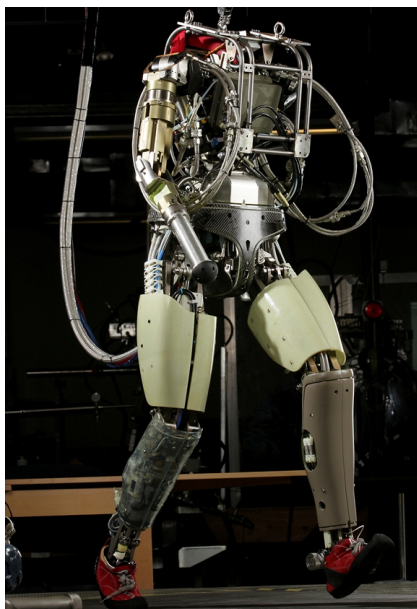


Figura 1.8: Robô PETMAN. [7]



Figura 1.9: Robô BIGDOG. [5]



Figura 1.10: Robô HRP-3P. [1]



Figura 1.11: Robô H7. [26]

1.4 Embasamento Teórico

1.4.1 Conceito de ZMP

O conceito de Zero-Moment Point foi idealizado por Vukobratovic no começo da década de 70, e é o conceito-chave das estratégias de controle da marcha bípede mais populares. Sua definição genérica é a do ponto do pé onde atua a resultante das forças de contato do chão sobre o robô, na situação onde o robô está em equilíbrio. Por equilíbrio dá-se a entender a situação onde o robô está com a sola do seu pé firmemente apoiada no chão, sem que a resultante dos momentos aplicados sobre o robô faça o mesmo rotacionar sobre a borda do seu pé e perder o apoio do contato entre a sola e o chão. Em tal situação de equilíbrio, os momentos se anulam neste ponto onde atua a resultante das forças, à exceção do momento vertical (que surge em resposta ao atrito do chão). Por esta causa, tal ponto recebeu o nome de ZMP.

As particularidades do ZMP se revelam ao compará-lo com o conceito de CoP (Center of Pressure). O Centro de Pressão é o ponto onde atua a resultante de forças do chão sobre o pé do robô em qualquer situação de contato entre o mesmo e o chão, independentemente de o momento não-vertical neste ponto ser nulo ou não. Desta forma, há situações onde o CoP e o ZMP coincidem e há situações que não. Tomando como exemplo, suponha uma situação onde um robô está totalmente ereto e a projeção do Centro de Massa sobre o plano do chão coincide com o CoP (Figura 1.12a). Em tal situação, este ponto também coincide com o ZMP, pois não há momentos horizontais atuando neste ponto. Suponha agora que um momento é aplicado sobre o robô. Para compensar as novas forças em ação, o ponto de atuação da resultante de forças de contato com o chão irá mudar de localização, dentro da sola do pé. Enquanto este ponto permanecer dentro da sola do pé, o CoP também coincidirá com o ZMP. Porém, quando o ponto onde os momentos horizontais forem nulos sair da sola do pé (em tal situação, Vukobratovik renomeia este ponto como Fictitious Zero-Moment Point [30]) o CoP não mais coincidirá com ele e se manterá na borda do pé, já que a definição do CoP é o ponto de atuação da resultante das forças sobre o robô em seu pé. Porém, como existe um momento atuando neste ponto, o robô começará a rotacionar sobre borda do pé (Figura 1.12b). Este movimento retirará o apoio que a sola do pé dava ao robô, e isto causará a sua queda.

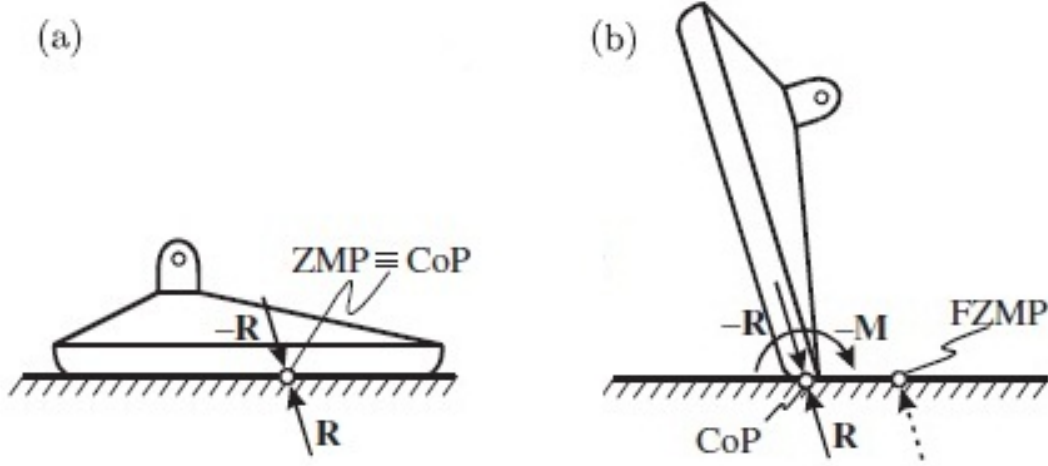


Figura 1.12: a) Situação de equilíbrio em que o ZMP coincide com o CoP. b) Situação de desequilíbrio onde o ZMP não coincide com o CoP e está fora da sola do pé do robô (FZMP). [30]

1.4.2 Cálculo da posição do ZMP

Há duas formas básicas de se calcular a posição do ZMP:

1. Utilizando sensores de força no pé, com localização bem definida, para calcular o ponto de atuação da resultante das forças.
2. Utilizando um modelo simplificado da dinâmica do robô e o movimento que o mesmo está executando em um determinado momento, encontrando o ZMP através das suas relações com o CM do modelo.

Um modelo bastante usado para fazer um cálculo analítico simples da posição do ZMP é o modelo do carrinho de mesa (Figura 1.13). Neste modelo 2D, a estrutura de suporte do robô é representada por uma mesa sem massa, de altura z_{cm} , com um pé horizontal apoiado sobre o chão, enquanto que a massa e a dinâmica do robô são representadas por um carrinho de massa m , o qual se desloca sobre a mesa na direção do eixo x , com uma aceleração $\ddot{x}_{cm}$. A posição do carrinho representa a posição do Centro de Massa do robô.

Numa primeira situação em que a aceleração é nula, a posição do ZMP é simplesmente a projeção x_{cm} da posição do carrinho sobre a linha do chão. Quando há aceleração, x_{zmp} pode ser extraído da avaliação do torque τ , pela equação abaixo:

$$\tau = -mg(x_{cm} - x_{zmp}) + m\ddot{x}_{cm}z_{cm}$$

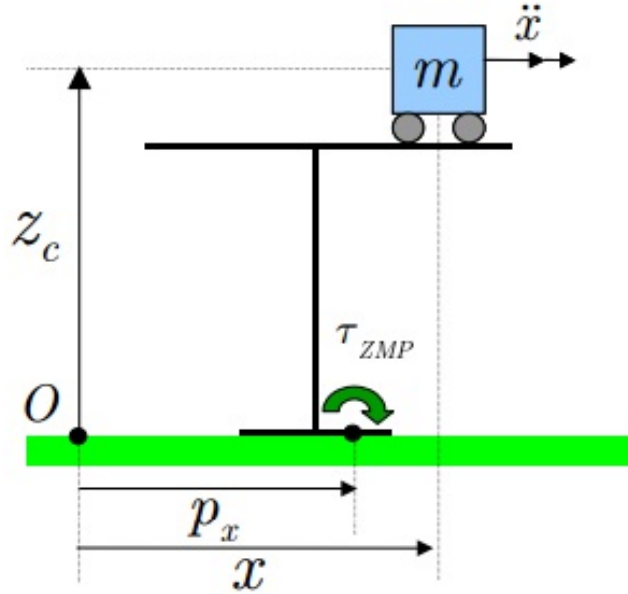


Figura 1.13: Modelo do carrinho de mesa, usado para o cálculo da posição do ZMP na sola do pé de um robô a partir da posição e aceleração do centro de massa do robô. [18]

onde:

m - massa do carrinho

g - aceleração da gravidade

x_{cm} – posição do carrinho no eixo x

z_{cm} – posição do carrinho no eixo z

x_{zmp} – posição do ZMP no eixo x

Como a posição do ZMP é definida como o ponto onde os momentos não-verticais são nulos, tem-se que:

$$x_{zmp} = x_{cm} - \frac{z_{cm}}{g} \ddot{x}_{cm} \quad (1.1)$$

Sendo assim, a partir destas considerações sobre a manutenção do balanço do robô pela localização do ZMP, e sobre a relação do ZMP com as variáveis cinemáticas do centro de massa, surgiram estratégias de controle da marcha bípede, que serão descritas adiante.

1.4.3 Síntese da marcha bípede através do posicionamento do ZMP

Os primeiros modelos de geração da marcha bípede propunham que a trajetória e o movimento das pernas do robô fossem pré-determinados antes de realizar considerações sobre o ZMP [19]. A partir do padrão de marcha gerado, realizava-se o cálculo da posição do ZMP e então se corrigia o risco de reposicionamento do mesmo fora da sola do pé do robô através do reposicionamento do centro de massa do robô. Este reposicionamento era realizado através do controle de posição de uma massa localizada na região do tórax do robô. Esta massa servia como uma massa de compensação. A Figura 1.14 demonstra o diagrama de blocos deste processo de síntese da marcha. Uma observação importante é que a síntese da marcha propriamente dita não era baseada no critério de estabilidade do ZMP, que se restringia ao sistema de controle de estabilidade através da massa de compensação. Tal modelo foi usado por Takanishi e Kato no design do robô WL-12, de 8 GdL, em 1985 (Figura 1.15).

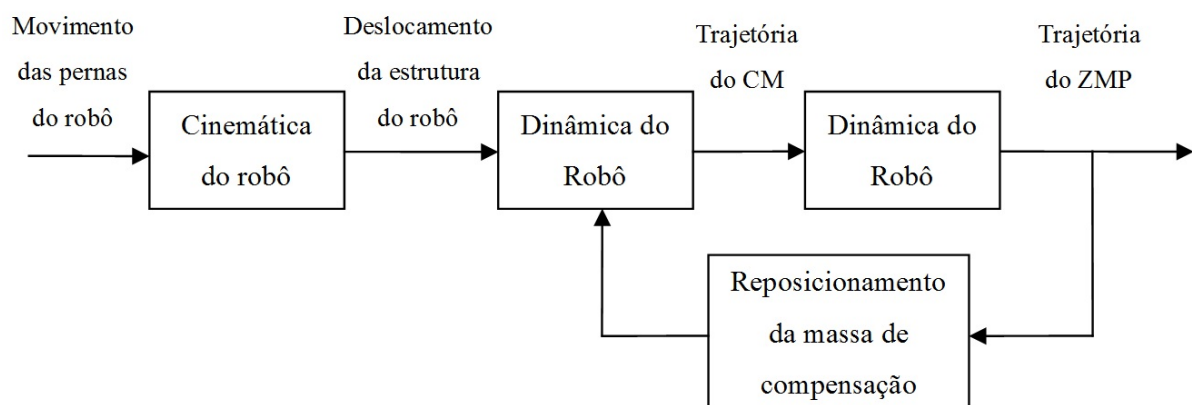


Figura 1.14: Diagrama de blocos do processo original de síntese da marcha segundo o ZMP.

Nos modelos atuais de síntese da marcha bípede através do ZMP, a localização do ZMP é definida antes da trajetória do robô, e então é tomada como parâmetro da síntese desta trajetória, gerando uma aproximação maior de marcha estável antes mesmo que um sistema de estabilidade a corrija.

Como em qualquer sistema de controle da marcha bípede por ZMP, a localização do ZMP deve estar dentro do polígono da sola do pé do robô. Isto torna a localização do ZMP dependente das posições sequenciais dos pés. Um método de síntese da marcha através do ZMP propõe a alteração, durante a marcha, das posições planejadas para os pés a fim de garantir a estabilidade da marcha [17]. Em contrapartida, o método “Preview Control of Zero-Moment Point” [18] propõe a fixação das posições dos pés para garantir a realização da marcha através

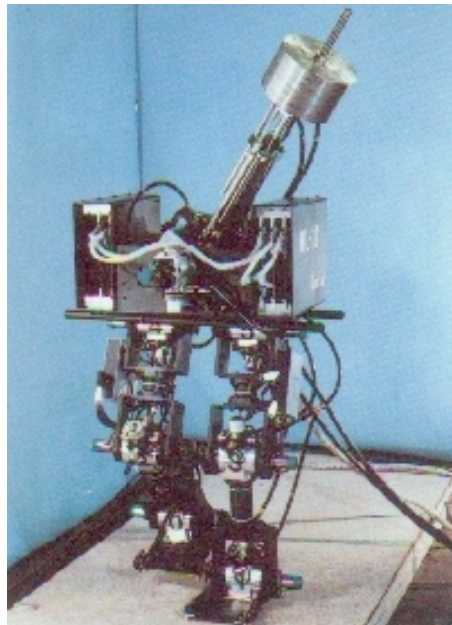


Figura 1.15: Robô WL-12, com o sistema de compensação do ZMP por uma massa no torso.

de um caminho irregular, como escadas e trajetórias com pontos de apoio de área limitada. O presente trabalho adota o Preview Control como método de síntese da marcha.

Neste método, é necessário definir primeiro a posição sequencial dos pés no chão, ao longo da marcha, para então escolher a trajetória do ZMP. Considerando a relação entre as posições sequenciais dos pés no chão e a trajetória do pé entre duas posições, no momento da definição das posições sequenciais a trajetória dos pés também é definida. Contudo, a trajetória dos pés não influencia a escolha da trajetória desejada para o ZMP, que nesta abordagem depende apenas da posição sequencial dos pés.

Portanto, as posições sequenciais dos pés é a variável de entrada do processo de síntese. A partir dela, define-se uma trajetória desejada para o ZMP. Esta trajetória, que tem a mesma direção líquida da caminhada do robô, deve caminhar dentro de uma área no chão que se altera regularmente e é gerada pelo desenvolvimento da posição dos pés. Na fase de apoio simples do robô, esta área é definida pela sola do pé de suporte, enquanto que na fase de apoio duplo esta área é a soma das áreas abaixo das solas dos dois pés mais a área localizada entre os pés. A seguir, resolve-se a Equação 1.1 para a posição do Centro de Massa do robô, a partir da posição desejada para o ZMP, num processo inverso de síntese da trajetória do robô. A Subseção 1.4.4 descreve o algoritmo de obtenção da trajetória do CM a partir da trajetória desejada para o ZMP.

Após a definição da posição do CM ao longo da marcha, realiza-se o último passo do processo de síntese, que é definir os deslocamentos angulares a serem realizados nas juntas do robô para manter o controle de posição do CM. Para tanto, utiliza-se a cinemática inversa do modelo

do robô. A figura Figura 1.16 demonstra o diagrama de blocos deste processo de síntese da marcha. Note que é um processo em malha aberta, independente do sistema de controle de estabilidade da marcha.

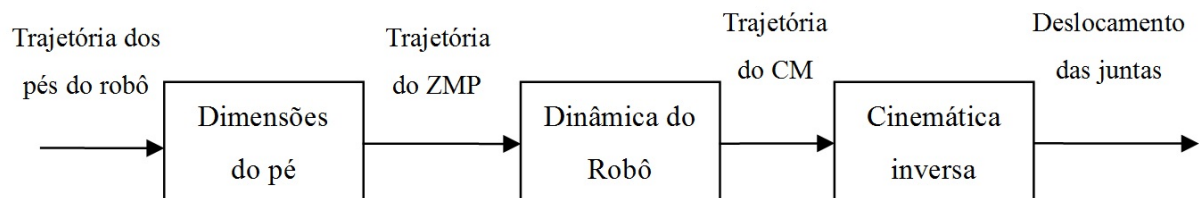


Figura 1.16: Diagrama de blocos dos processos modernos de síntese da marcha segundo o ZMP.

1.4.4 Determinação da trajetória do CM

O “Preview Control of Zero-Moment Point” é um algoritmo de geração da trajetória do CM de um robô através da trajetória do ZMP, desenvolvido por Kajita [18] e posteriormente desenvolvido por Wieber [32]. O método possui tal nome porque utiliza um set-point da trajetória desejada do ZMP no tempo futuro para controlar uma variável interna atual (a posição do CM). Por esta causa, ele é realizado off-line para gerar, de um instante $k=1$ a um instante $k=N$, uma sequência de posições do CM que minimizem o erro da sua variável dependente ao longo de uma janela de tempo (os instantes $k=1, \dots, N$), que é percorrida pelo algoritmo enquanto resolve o problema da posição do CM.

O Preview Control aborda o problema como um sistema dinâmico em malha fechada cujo estado interno deve rastrear o set-point da sua variável dependente. Neste sistema dinâmico, o estado interno é a posição, velocidade e aceleração do CM do robô; a variável de entrada é o arranque a ser aplicado sobre o CM para a alteração do estado interno do sistema; a variável dependente é a posição do ZMP; o set-point é a sequência de posições do ZMP ao longo do tempo (lembrando que por esta causa há uma dependência de estados futuros na determinação do estado presente); e a lógica de controle é a minimização do erro da variável dependente. Adicionalmente à lógica de controle de rastreamento do ZMP de referência, há uma restrição de valores que essa variável dependente pode assumir. Eles são os valores máximos e mínimos permitidos à posição do ZMP na sola do pé no eixo de deslocamento do robô (no caso 2D, e no caso de um pé de sola quadrada, os limites são as bordas do pé no eixo do deslocamento do robô).

Considerando que o set-point da variável dependente não é estático (a posição do ZMP se altera continuamente com o tempo, sendo equivalente à trajetória do ZMP), o sistema de

controle altera continuamente o estado interno do sistema (a posição do CM). Portanto, ao registrar os valores assumidos por esse estado interno ao longo do tempo, obtém-se a trajetória do CM que se procurava determinar em primeiro lugar. O problema é discretizado no tempo, portanto a cada iteração da malha de controle gera-se uma nova posição do CM.

Nota-se que as outras variáveis do sistema (o arranque e a trajetória estimada para o ZMP) são utilizadas somente internamente pelo algoritmo. Elas não representam set-points a serem perseguidos pelos atuadores do robô, e por isso não são registradas. O resultado do algoritmo, que no trabalho atual realiza uma síntese off-line da trajetória do CM do robô, será utilizado posteriormente para o cálculo da posição das juntas do robô que geram a trajetória do CM. Por esta causa, o sistema dinâmico real do robô, a ser controlado on-line, consiste em um controle de posição das juntas do robô, a fim de perseguir um set-point de posição do CM.

Considerando a estrutura lógica do problema apresentada acima, a seção abaixo realizará uma descrição matemática do mesmo.

1.4.5 Equacionamento da geração da trajetória do CM

Considerando o sistema dinâmico controlado pelo método “Preview Control”, descrito na Subseção 1.4.4, as variáveis do sistema são definidas conforme apresentado abaixo:

O arranque do CM $\ddot{x}_{cm}$ é tomado como entrada do sistema dinâmico. O estado interno do sistema é a posição x_{cm} , a velocidade $\dot{x}_{cm}$ e a aceleração $\ddot{x}_{cm}$ do CM, que é representada por um vetor X_{cm} . Na seguinte demonstração, define-se o eixo z como o eixo vertical, o eixo x como o eixo da direção da marcha e o eixo y como o eixo horizontal perpendicular à marcha, não utilizado neste caso 2D.

Nesta análise do movimento, o tempo é dividido em passos de duração T . Sendo assim, o estado do sistema é considerado em $t = kT$, $k=1,2,\dots$ e as variáveis do sistema assumem valores discretos no tempo.

Ao discretizar o sistema, a integral de $\ddot{x}_{cm}$ pode ser dada pela equação abaixo:

$$T\ddot{x}_{cm(k)} = \dot{x}_{cm(k+1)} - \dot{x}_{cm(k)}$$

Tomando-se a integral de $\dot{x}_{cm(k+1)}$, a segunda integral do arranque pode ser rearranjada conforme abaixo:

$$(T^2/2)\ddot{x}_{cm(k)} = T\dot{x}_{cm(k)} - (\dot{x}_{cm(k+1)} - \dot{x}_{cm(k)})$$

Tomando-se agora a integral de $\dot{x}_{cm(k+1)}$, a terceira integral do arranque assume a seguinte forma:

$$(T^3/6)\ddot{x}_{cm(k)} = (T^2/2)\dot{x}_{cm(k+1)} + T\dot{x}_{cm(k)} - (x_{cm(k+1)} - x_{cm(k)})$$

Ao agrupar as três equações acima em notação matricial, isolando o vetor $X_{cm(k+1)}$ do lado esquerdo e o vetor $X_{cm(k)}$ mais o arranque $\ddot{x}_{cm(k)}$ do lado direito, obtém-se a equação (1.2), que descreve o sistema dinâmico controlado pelo algoritmo.

$$X_{cm(k+1)} = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} X_{cm(k)} + \begin{bmatrix} T^3/6 \\ T^2/2 \\ T \end{bmatrix} \ddot{x}_{cm(k)} \quad (1.2)$$

onde:

$X_{cm(k+1)}$ - vetor com a posição, velocidade e aceleração do CM no eixo x para o instante $k+1$

$X_{cm(k)}$ - vetor com a posição, velocidade e aceleração do CM no eixo x para o instante k

$\ddot{x}_{cm(k)}$ - arranque do CM no eixo x para o instante k

T - intervalo de tempo

A equação (1.1) também pode ser rearranjada em notação matricial, assumindo a seguinte forma:

$$x_{zmp(k)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -z_{cm(k)}/g \end{bmatrix} X_{cm(k)} \quad (1.3)$$

onde:

$z_{cm(k)}$ - posição do CM no eixo z para o instante k

$x_{zmp(k)}$ - posição do ZMP no eixo x para o instante k

g - aceleração da gravidade

As matrizes e vetores apresentados nas equações acima são então definidas conforme abaixo:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} T^3/6 \\ T^2/2 \\ T \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -z_{cm(k)}/g \end{bmatrix}$$

Conforme descrito na Subseção 1.4.4, o algoritmo é executado em janelas de tempo com n passos da discretização do tempo. Sendo assim, n iterações da equação (1.2) podem ser rearranjadas em uma única equação, a qual representa o sistema linear a ser resolvido pelo algoritmo:

$$x_{cm(k)} = Mx_{cm(0)} + N\ddot{x}_{cm} \quad (1.4)$$

Onde as matrizes M e N são dadas abaixo:

$$M = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^n \end{bmatrix}$$

$$N = \begin{bmatrix} C & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N-1}B & CA^{N-2}B & \cdots & B \end{bmatrix}$$

A estratégia de solução da equação (1.4) é fazer com que o sistema siga o valor de referência do ZMP $x_{zmp(ref)}$ minimizando o esforço exercido através do arranque $\ddot{x}_{cm}$. Definindo-se então o coeficiente Q como a performance ao seguir a referência e o coeficiente R como o custo representado pelo esforço realizado, o objetivo do método é minimizar o Programa Quadrático apresentado pela equação (1.5):

$$\min \sum_{i=k}^k \frac{1}{2} Q (x_{cm(i+1)} - x_{zmpref(i+1)})^2 + \frac{1}{2} R \ddot{x}_{cm(i)}^2 \quad (1.5)$$

Este Programa Quadrático pode ser resolvida definindo-se as matrizes

$$w = QN^T N + RI_{n \times n}$$

e

$$v = QN^T Mx_0 - QN^T x_{zmpref}$$

com as quais se realiza o cálculo abaixo:

$$\ddot{x}_{\text{cm}} = -w^{-1}v \quad (1.6)$$

Assim, obtêm-se o arranque $\ddot{x}_{\text{cm}}$ que, aplicado nas iterações de tempo T , geram a trajetória do CM que acompanha a trajetória $x_{\text{zmpref}(i+1)}$ definida para o ZMP.

Capítulo 2

Desenvolvimento

2.1 Especificações

O padrão da marcha assumido para o modelo do projeto possui algumas especificações gerais que guiaram o desenvolvimento tanto do padrão de marcha quanto do sistema de controle:

- A altura do Centro de Massa durante a sua trajetória foi determinada constante, a fim de eliminar um grau de liberdade da trajetória do CM.
- Considerando que a altura do CM é constante, torna-se necessário estabelecer um valor suficientemente menor que a altura máxima do CM, atingida quando o modelo está totalmente ereto, para que o modelo possa estender as pernas o suficiente para realizar a passada em seu comprimento estabelecido.
- Devido à altura estabelecida para o CM, as pernas do modelo não se estendem completamente durante a marcha. Isto oferece uma margem de extensão para as pernas, ao alterar-se o padrão da marcha para que a passada seja mais longa e percorra uma distância maior. Desta forma, o movimento não possui a característica humana de estender completamente o joelho durante a passada.
- Considerando as duas fases de suporte da marcha bípede – apoio simples e apoio duplo – o deslocamento do corpo do modelo no sentido da marcha realiza-se apenas durante a fase de apoio duplo. Durante a fase de apoio simples, o deslocamento planejado no sentido da marcha se limitará à perna de balanço. Na prática, o corpo do modelo também se movimentará em um grau menor durante o apoio simples, porém o fará para compensar o movimento da perna de balanço e manter o CM na posição desejada, aproximadamente fixa.

O sistema de controle foi desenvolvido no subcaso 2D do problema 3D. Tal estratégia é possível devido à relação entre o ZMP e o CM, que é desacoplada nos dois planos de análise [32]. A implementação do sistema enquadrou o plano sagital do modelo, que inclui o eixo de deslocamento desejado da marcha (eixo x).

A ferramenta de simulação escolhida foi o software MATLAB, junto com a toolbox Sim-Mechanics do Simulink. O Simulink é um ambiente de modelagem e simulação através de diagramas de blocos que permite a simulação de vários fenômenos físicos. Ao interfacear seu

ambiente de trabalho com o ambiente do MATLAB, é possível testar e verificar a validade de algoritmos físicos feitos no MATLAB através da engine de simulação do Simulink (que normalmente é muito mais complexa do que a física dos fenômenos descrita nos algoritmos e modelos desenvolvidos matematicamente no ambiente de trabalho do MATLAB).

No caso do presente trabalho, que envolve fenômenos como o de corpos rígidos, impacto e interação entre corpos através de restrições cinemáticas, tornou-se atrativo utilizar uma toolbox do MATLAB: o SimMechanics. Esta toolbox fornece um ambiente de simulação multicorpo em 3D, com elementos que representam diretamente as relações cinemáticas entre os corpos, formulando e resolvendo as equações de movimento para o sistema mecânico completo durante as simulações.

A decisão foi motivada pelas seguintes características do software:

- Linguagem de programação de fácil uso, ideal para a rápida prototipagem do código dos algoritmos utilizados.
- Disponibilidade de um ambiente de simulação multicorpos que propicia uma primeira avaliação da eficiência do algoritmo de síntese.

Portanto, as ferramentas escolhidas para desenvolver o projeto possuem as seguintes especificações:

- Sistema Operacional Windows 7
- Simulador MATLAB
- Toolbox de simulação multicorpo Simmechanics

2.2 Metodologia

2.2.1 Síntese da Marcha Bípede

A primeira etapa do desenvolvimento de um sistema de controle ZMP da marcha consiste na síntese do padrão de marcha. Nesta etapa, o controle de estabilidade do balanço do robô ainda não é contemplado. Seguindo a síntese da marcha segundo a linha moderna de sistemas de controle ZMP, o padrão de marcha é gerado em malha aberta cumprindo os critérios de estabilidade do conceito de ZMP, conforme abordado na Subseção 1.4.3. Desta forma, mesmo antes de fechar a malha do controle, o padrão de marcha já se apresenta factível, embora não considere eventuais perturbações. Este processo de síntese é realizado off-line.

O processo de síntese inicia-se com a determinação das posições sequenciais dos pés do robô no chão. Neste momento, não há nenhuma consideração dinâmica a se fazer a respeito do robô e o único requerimento das posições dos pés é que elas sejam cinematicamente viáveis. As especificações descritas acima foram determinadas com este fato em mente. Então, junto com a posição dos pés após cada passada, determina-se qual a distância que a passada do modelo percorrerá.

A trajetória dos pés do robô de um ponto no chão até o próximo foi gerada através de uma interpolação por parábola. Os três pontos tomados são as posições iniciais e finais do centro do pé, e a posição intermediária no eixo de deslocamento, a uma altura fixa.

Após isto, determina-se a trajetória desejada para o ZMP, que pertencerá à área gerada pelo polígono dos pés do robô. Durante a fase de apoio simples, enquanto a perna de balanço está se deslocando no sentido da marcha, a área disponível para o ZMP se limita à sola do pé de suporte. Considerando que o equilíbrio do robô se perde quando o ZMP atinge e ultrapassa a borda da sola do seu pé de apoio, a região de maior estabilidade está localizada exatamente no centro da sola. Portanto, para a fase de apoio simples, a posição desejada para o ZMP se manterá fixa no centro do pé de suporte. Durante a fase de apoio duplo, o ZMP será deslocado do centro da sola do pé de suporte para o centro da sola do pé de balanço numa trajetória linear. Uma das formas de relacionar o deslocamento do ZMP com o tempo é através de um polinômio de 5ª ordem, cujos coeficientes são determinados a partir das variáveis cinemáticas do CM e do tempo transcorrido durante o deslocamento [28]. Desta forma, o esforço de relocar o ZMP de maneira suave não imporá uma aceleração brusca ao CM. O polinômio utilizado e a forma de se calcular seus coeficientes é dada abaixo:

$$x(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \quad (2.1)$$

Onde:

$$a_0 = x_0$$

$$a_1 = \dot{x}_0$$

$$a_2 = \ddot{x}_0/2$$

$$a_3 = \frac{20x_{final} - 20x_0 - (8\dot{x}_{final} + 12\dot{x}_0)t_{final} - (3\ddot{x}_0 - \ddot{x}_{final})t_{final}^2}{2t_{final}^3}$$

$$a_4 = \frac{30x_0 - 30x_{final} + (14\dot{x}_{final} + 16\dot{x}_0)t_{final} + (3\ddot{x}_0 - 2\ddot{x}_{final})t_{final}^2}{2t_{final}^4}$$

$$a_4 = \frac{12x_{final} - 12x_0 - (6\dot{x}_{final} + 6\dot{x}_0)t_{final} - (\ddot{x}_0 - \ddot{x}_{final})t_{final}^2}{2t_{final}^5}$$

Uma última observação é que o movimento do corpo (CM) do robô na direção da marcha aproximadamente acompanha o movimento do CM do pé de suporte para o pé de balanço depositado no chão. Após o deslocamento do CM, inicia-se novamente a fase de apoio simples e de balanço de um dos pés, com o ZMP fixo no centro do pé de suporte.

Uma vez determinada a trajetória desejada para o ZMP, cria-se a trajetória do CM do robô baseada na localização do ZMP, através do método Quadratic Programming, descrito na Subseção 1.4.4. É gerado também uma estimativa da posição real do ZMP ao longo do ciclo da marcha. Através desta primeira estimativa pode-se avaliar antes mesmo das simulações se o processo de síntese gerou um padrão de marcha adequado, verificando se o ZMP se manteve dentro da região limite.

Uma vez determinada a trajetória do CM durante o ciclo da marcha, utiliza-se a cinemática inversa do modelo para definir o deslocamento angular necessário nas juntas do robô para gerar o seu movimento de fato. Neste projeto será utilizada a biblioteca em criação pelo co-orientador do projeto. Ela determinará o deslocamento das juntas tanto na situação de se tomar um ponto de referência no chão e querer determinar o deslocamento do CM, quanto na situação de manter o CM em uma posição enquanto se desloca a extremidade da cadeia cinemática.

Abaixo é apresentado os blocos do algoritmo de síntese da marcha utilizado:

Especificações

cinemáticas da

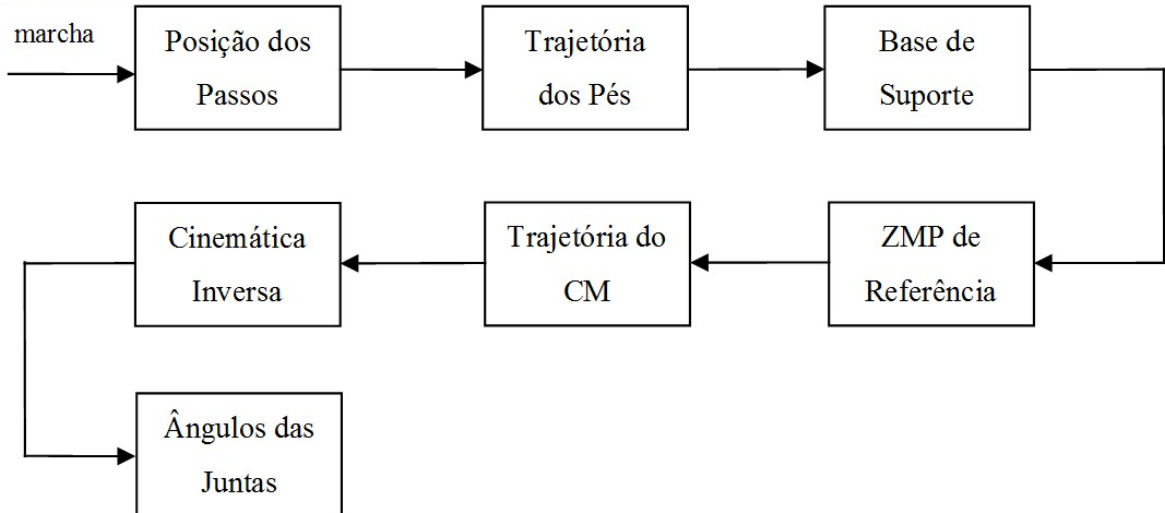


Figura 2.1: Blocos do algoritmo de síntese da marcha segundo o ZMP.

Capítulo 3

Resultados

O modelo de robô utilizado para o teste do padrão de marcha gerado foi um modelo de robô genérico com 3 GdL por perna (a fim de controlar os 3 GdL do problema 2D) e 1 GdL para o torso, num total de 7 GdL. O modelo possui 8 links: dois pés, duas canelas, duas pernas, a pélvis e o torso. Para este modelo, foram ignorados os movimentos dos braços, cuja contribuição em massa está inclusa no torso (o mesmo se aplica à massa da cabeça). Os valores para o comprimento e a massa dos links foram baseados nos valores dos membros equivalentes em um ser humano de 56.7 kg, cuja marcha foi medida e analisada num outro trabalho sobre o movimento humano [33]. Uma análise energética da marcha do presente trabalho será feita adiante e comparada com os resultados da marcha deste indivíduo, colhidos no trabalho citado acima.

Abaixo são apresentadas as dimensões e propriedades do modelo:

LINK	COMPRIMENTO	MASSA
Torso	0.61m	38.442kg
Pélvis	0.2m	0kg
Pernas	0.314m	5.67kg
Canelas	0.425m	2.637kg
Pés	0.25m	0.822kg
Total	1.549m (altura quando ereto)	56.7kg

Tabela 3.1: Dimensões e massa do modelo

3.1 Síntese do Padrão de Marcha

3.1.1 Trajetória dos pés

Os parâmetros a serem definidos na trajetória do pé estão listados a seguir:

1. Deslocamento máximo do pé a cada passada.
2. Altura máxima dos pés.
3. Velocidade máxima dos pés.

Adicionalmente, alguns parâmetros mais gerais em relação à marcha foram definidos nesta etapa:

1. Duração de cada iteração de tempo.
2. Altura do CM (fixa).

Levando em conta as dimensões das pernas do modelo, o deslocamento de cada passada foi limitado em aproximadamente 0.4m, o deslocamento máximo realizado em ciclo desenvolvido de marcha. Isto se deve ao fato de a conexão entre a canela e o pé estar na extremidade anterior do pé (calcanhar), e por o modelo não possui os dedos do pé nem as articulações dos dedos que elevam o calcanhar durante a retirada do pé do chão. Isto faz com que a extensão útil da perna de suporte seja encurtada em relação a um modelo mais próximo do ser humano, já que o calcanhar não se eleva do chão antes da extremidade do pé (onde estariam os dedos). Como a extensão útil da perna é menor, o modelo não consegue realizar uma marcha maior do que 0.4m antes de estender completamente a perna de suporte.

A altura máxima dos pés foi escolhida arbitrariamente, apenas tomando-se o cuidado de garantir que o pé não raspasse no chão durante seu movimento. O valor de 0.1m, equivalente a 25% do deslocamento máximo do pé, foi escolhido.

Nos primeiros testes do modelo, a velocidade máxima permitida para os pés foi escolhida com uma postura conservadora. O objetivo dos primeiros testes era encontrar um padrão de marcha com um balanço estável e com um posicionamento do ZMP satisfatoriamente preciso, isto é, posicionando-o sempre próximo ao centro da sola do pé de suporte durante a fase de suporte simples, com um erro máximo de 10%. Tal precisão de posicionamento do modelo oferece uma margem de estabilidade para que a marcha do modelo absorva pequenas perturbações.

A iteração de tempo para a síntese da marcha foi escolhida admitindo-se um valor usual mas também conservador em sistemas mecatrônicos com microprocessamento embarcado: 100ms.

Já a altura do CM foi definida indiretamente, ao definir-se uma postura inicial estável para o modelo. Ambas as pernas foram posicionadas com uma inclinação de 60° em relação à horizontal, o que para os comprimentos do modelo gerou uma altura de 0.7149m para o CM. Esta altura é estabelecida como fixa para eliminar um grau de liberdade no processo de geração da trajetória do CM.

Desta forma, os valores foram definidos para a marcha do modelo e estão apresentados na Tabela 3.2:

O processo de síntese dos passos foi realizado para seis passos, três de cada pé. A partir do segundo passo quando o modelo começa um novo ciclo da marcha já em movimento, pode-se avaliar a capacidade do algoritmo em criar uma marcha estável em malha aberta que se mantém indefinidamente.

GRANDEZA	VALOR
Deslocamento a cada passada	0.2m
Altura máxima dos pés	0.1m
Velocidade máxima dos pés (eixo da marcha)	0.1m/s
Duração de cada iteração de tempo	0.1s
Altura do CM (fixa)	0.7149m

Tabela 3.2: Especificações do movimento

Então, gerando uma trajetória parabólica entre um passo e o próximo, obteve-se a trajetória indicada pela Figura 3.1:

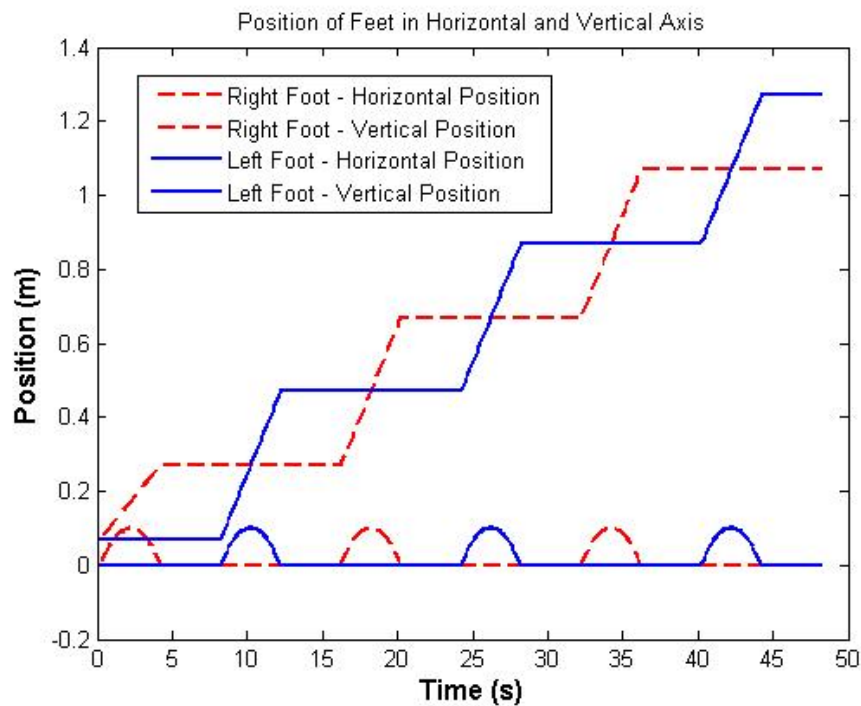


Figura 3.1: Deslocamentos horizontais e verticais dos pés direito e esquerdo, durante as passadas do ciclo da marcha, para a velocidade de 0.1m/s.

No gráfico, as linhas tracejadas são as posições horizontal e vertical do pé direito, enquanto as linhas cheias são as mesmas posições para o pé esquerdo. As posições verticais seguem uma parábola, conforme especificado, enquanto que as posições horizontais se alteram em rampas no tempo. Ao final do deslocamento de cada pé, o modelo mantém os dois pés imóveis por um período. Este corresponde à fase de apoio duplo em que o robô está movimentando seu ZMP e seu CM.

3.1.2 Trajetória desejada para o ZMP

Seguindo o procedimento descrito na Subseção 2.2.1, gerou-se a curva do ZMP de referência, que se mantém na mesma posição que o pé de suporte durante a fase de apoio simples e descreve a curva de um polinômio de 5ª ordem no tempo durante a fase de apoio duplo. A Figura 3.2 apresenta a curva gerada, com as curvas da posição horizontal dos pés sobrepostas, para comparação das posições.

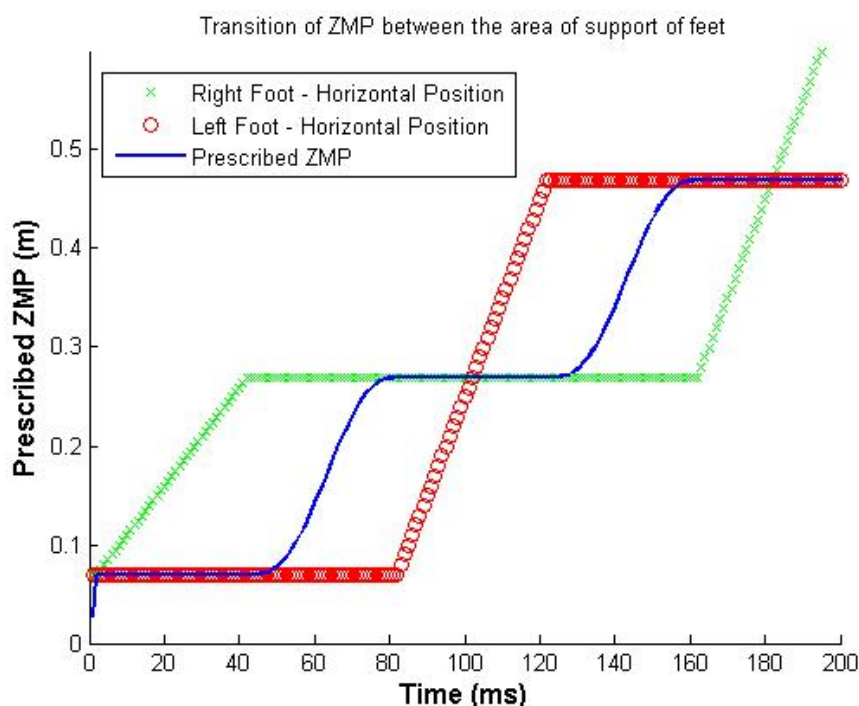


Figura 3.2: Deslocamento da posição do ZMP de referência, usado na síntese da marcha, para a velocidade de 0.1m/s.

O gráfico apresenta a região de estabilidade da marcha durante a fase de apoio duplo: ela corresponde ao espaço entre os dois pés, englobado pela região entre as curvas do pé esquerdo e do pé direito apresentadas acima. Sendo assim, enquanto na fase de apoio simples o ZMP deve ser mantido dentro da sola do pé de suporte, durante a fase de apoio duplo o ZMP pode se localizar em qualquer ponto dentro do polígono composto da sola de ambos os pés e da região entre os mesmos.

Durante a fase de apoio simples, o ZMP de referência se mantém parado no centro do pé de apoio. Assim que o pé de balanço termina seu movimento e volta ao chão, o ZMP de referência inicia seu deslocamento dentro do polígono composto mencionado acima, realizando uma curva

polinomial de 5ª ordem no tempo, até alcançar o centro da sola do pé de balanço, que então se torna o pé de suporte do novo ciclo.

3.1.3 Trajetória do CM

Utilizando o método Quadratic Programming, obteve-se a curva do deslocamento do CM ao longo do tempo, na direção da marcha (eixo horizontal), apresentada na Figura 3.3:

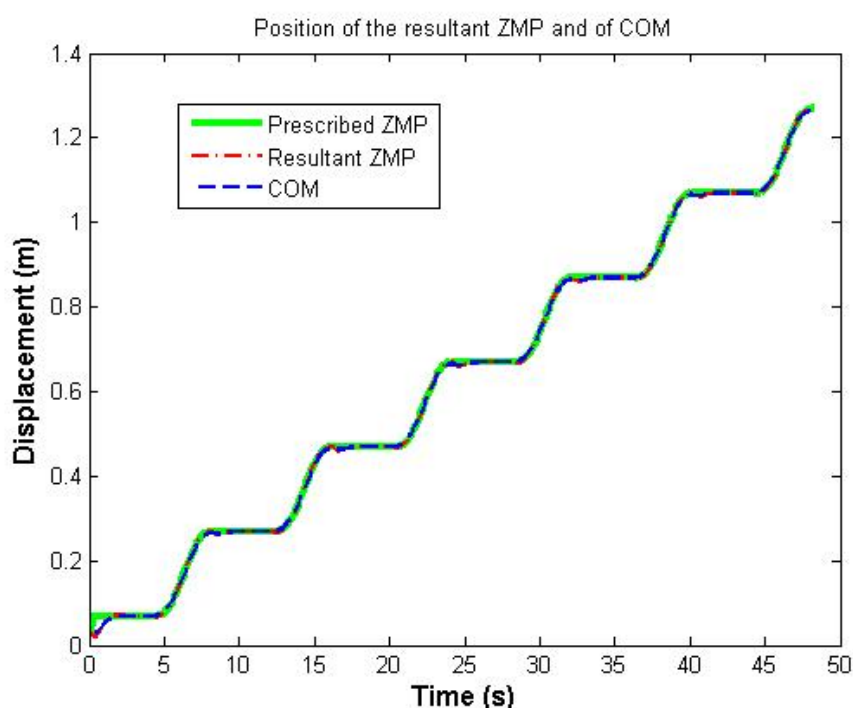


Figura 3.3: Deslocamento da posição do CM do modelo, junto com o deslocamento desejado do ZMP e com o deslocamento real final do ZMP, para a velocidade de 0.1m/s.

A trajetória do ZMP resultante, em linha tracejada-e-ponto, acompanha o deslocamento do ZMP de referência de maneira quase idêntica, mostrando a estabilidade da marcha planejada. O CM também acompanha o deslocamento do ZMP. Este segundo resultado também é importante, pois embora o algoritmo do Quadratic Preview não faça considerações sobre o comprimento dos links da cadeia cinemática do robô, é necessário que a posição horizontal do CM não se afaste muito da posição horizontal dos ZMPs. Caso contrário, a cadeia cinemática das pernas do robô poderá não se estender o suficiente para realizar o posicionamento planejado dos pés do robô (note que a trajetória dos pés é a própria entrada de todo o processo de síntese da marcha).

A Figura 3.4 e a Figura 3.5, feitas em escala maior, apresentam mais detalhes da Figura 3.3:

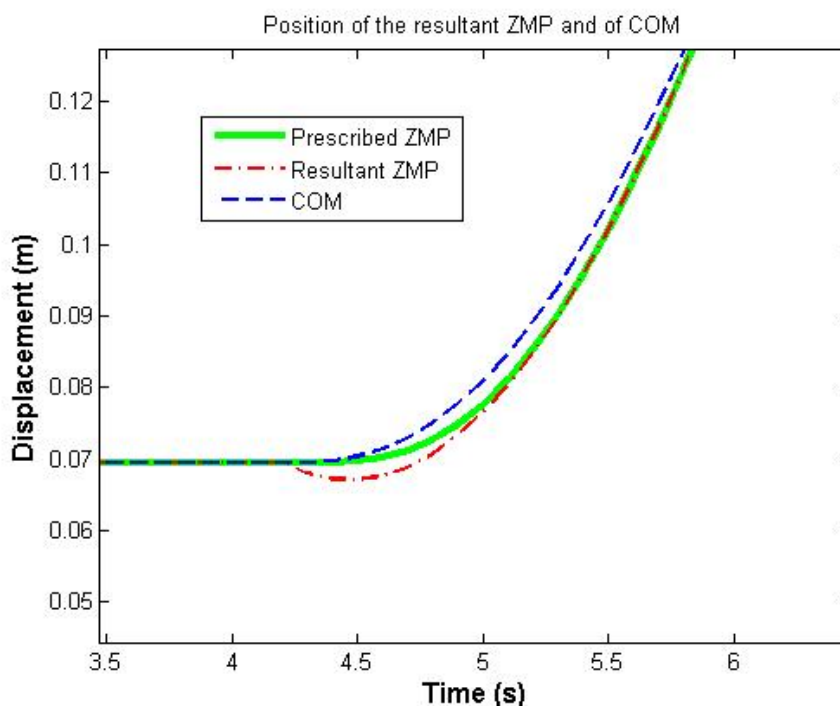


Figura 3.4: Deslocamento da posição do CM do modelo apresentado em escala maior. Trecho representando o início da primeira transposição do CM/ZMP.

Este trecho engloba o início do deslocamento do ZMP (real e de referência) e do CM na primeira passada do gráfico 3.3. Note como no início do movimento do CM do robô, o ZMP real (estimado para a movimentação planejada para o CM) possui um undershoot, em linha traço-e-ponto. Tal undershoot se deve à aceleração do CM, que segundo a equação (1.1) contribui para o deslocamento do ZMP. Contudo, o algoritmo utilizado rapidamente atenua o desvio do ZMP real em relação ao desejado, mantendo o erro de posicionamento do ZMP real abaixo de 10%, em relação à área de estabilidade disponível para a posição do ZMP.

Este trecho corresponde ao final do deslocamento do CM e dos ZMPs após a passada do pé direito. Novamente ocorre um undershoot do ZMP real, que até o fim do deslocamento do CM estava acompanhando o ZMP de referência com precisão. Tal efeito também é devido à mudança de velocidade do CM, que agora está desacelerando. Este desvio é corrigido na fase seguinte (passada do pé esquerdo), executando novamente o algoritmo de deslocamento do CM/ZMP para corrigir este erro de posição do ZMP e fazê-lo coincidir com a posição do ZMP de referência.

Uma primeira conclusão é retirada da análise destes gráficos: o modelo da marcha sintetizada, que consiste em dividir o movimento em duas fases bem separadas (a saber, primeiro o deslocamento de somente uma perna na direção da marcha durante a fase de apoio simples, e

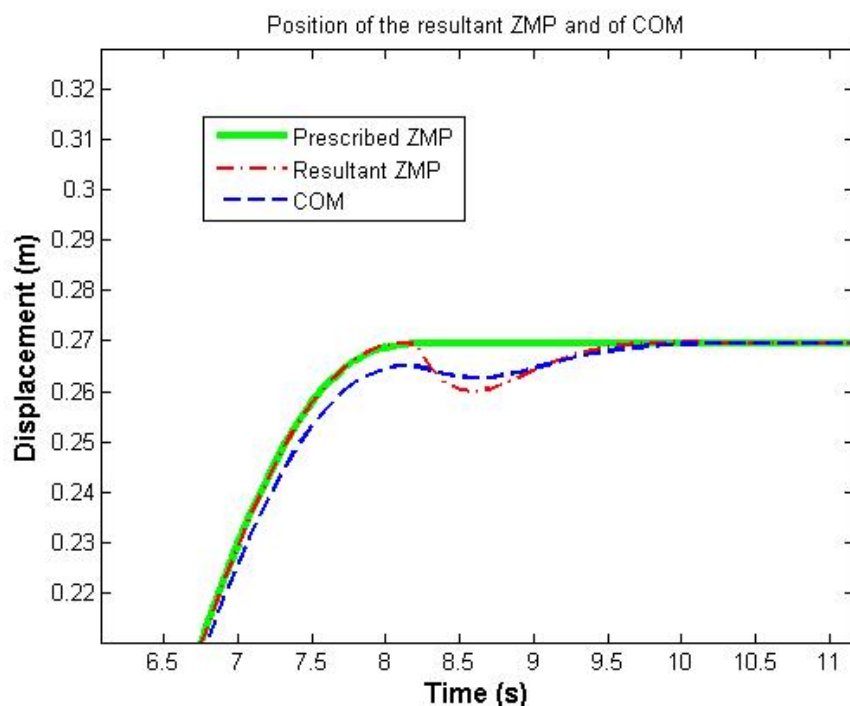


Figura 3.5: Deslocamento da posição do CM do modelo apresentado em escala maior. Trecho representando o final da segunda transposição do CM/ZMP.

então o deslocamento do CM e do ZMP na direção da marcha durante a fase de apoio duplo), possui um trade-off de estabilidade. Se por um lado, manter o ZMP fixo durante a fase de apoio simples torna o modelo mais robusto a perturbações, por haver a maior margem de estabilidade possível, por outro lado as acelerações e desacelerações do CM no início e fim da fase de apoio duplo levam a um undershoot do posicionamento do ZMP. Sendo assim, caso as acelerações/-desacelerações sejam grandes o suficiente, o ZMP pode sair da sola do pé do robô e levá-lo à queda. Conforme será visto adiante, ao aumentar a velocidade do modelo esse efeito colateral eventualmente ocorre, pois as acelerações e desacelerações necessariamente se intensificam com este modelo de marcha onde o movimento do CM é feito em etapas.

3.1.4 Estimativa da margem de erro de posicionamento do ZMP

Avaliando o erro de posição entre ZMP real que foi estimado no algoritmo e o ZMP de referência, para um ciclo de seis passos, obteve-se os valores apresentados na Figura 3.6.

Para uma marcha com um deslocamento de 0.2m do modelo a cada passada, o erro máximo durante o processo foi de 0.0095m, no ponto de parada do deslocamento do CM após a primeira passada. Considerando o comprimento da sola dos pés (0.25m), e a extensão de 0.125m desde

o seu centro até a borda, o erro máximo de posicionamento do ZMP foi de 7.6%, relativo a esta extensão onde o posicionamento do ZMP não causa o tombo do robô, enquadrando-se dentro da margem de erro especificada.

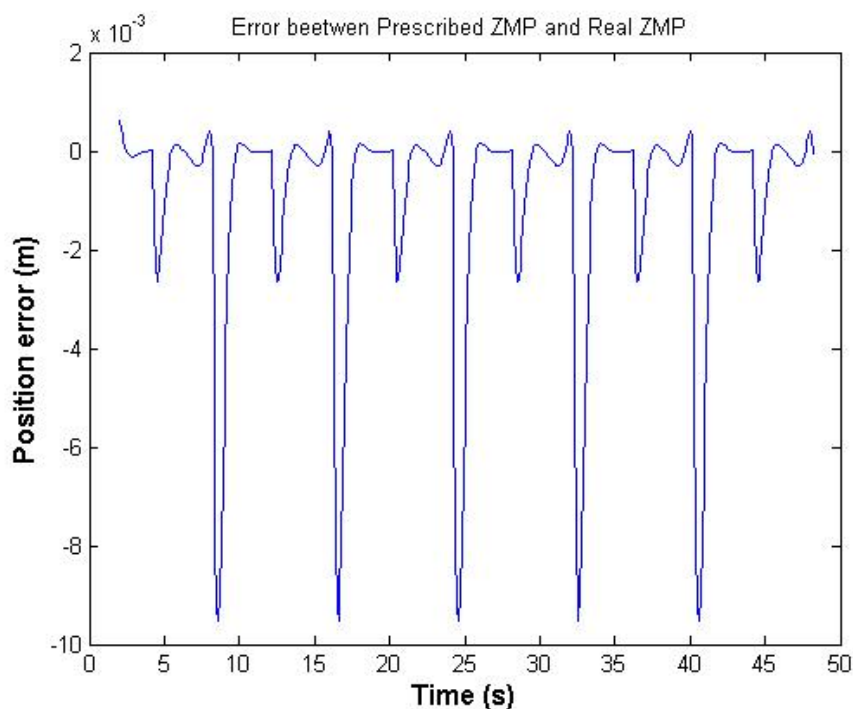


Figura 3.6: Erro de posição do ZMP real para a velocidade de 0.1m/s, estimado após o fim do algoritmo.

3.1.5 Limitações do algoritmo para a geração de padrões de marcha

Alterando-se os parâmetros da marcha especificada, as limitações do critério de estabilidade da marcha através do ZMP se tornam evidentes. Ao aumentar a velocidade de deslocamento do modelo de 0.1m/s para 0.265m/s, obteve-se a curva de deslocamento do ZMP da Figura 3.7 e a curva de erro de posicionamento do mesmo da Figura 3.8.

No gráfico do deslocamento dos ZMPs e do CM, observa-se um aumento considerável do erro de posicionamento do ZMP resultante, além de uma oscilação do CM e do ZMP durante a fase de apoio simples. Analisando o gráfico do erro de posicionamento, confirma-se que o ZMP ultrapassou a borda do pé de suporte, incorrendo na queda do modelo.

Contudo, o movimento de um ser humano possibilita um aumento considerável da velocidade sem ocorrência de queda: por exemplo, durante uma corrida. Observa-se, porém, que durante uma corrida a dinâmica do movimento não apenas não se baseia em um equilíbrio

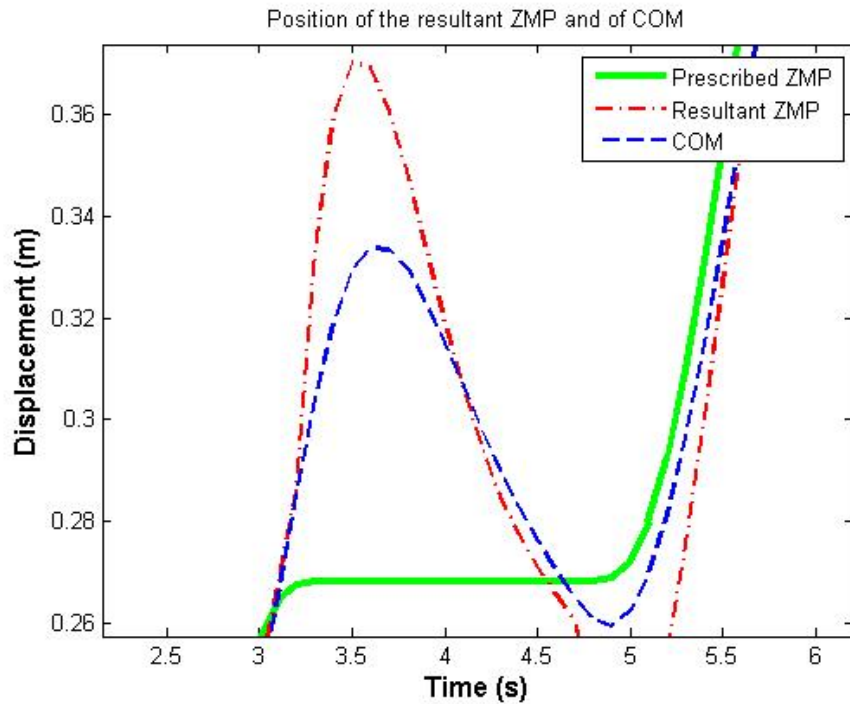


Figura 3.7: Deslocamento da posição do CM do modelo, junto com o deslocamento desejado do ZMP e com o deslocamento real final do ZMP, para a velocidade de 0.265m/s.

estático, como também leva o corpo a perder completamente o apoio do chão durante alguns momentos do movimento. A estratégia de geração de marcha através do conceito de ZMP, por depender de um equilíbrio estático do corpo inteiro em cada momento da marcha, não é capaz de reproduzir algumas formas de movimento do ser humano, nem de reproduzir as suas capacidades de marcha (velocidade, por exemplo) durante uma marcha de caminhada. Tais fatos demonstram as limitações cinemáticas da estratégia do ZMP, que embora possibilite alterações do movimento durante a marcha, não permite explorar algumas possibilidades evidentes na marcha do ser humano.

Além do aspecto da própria estabilidade, os algoritmos implementados também possuem limitações de convergência das soluções. Aumentado a velocidade de deslocamento do modelo para 0.3m/s, obteve-se a Figura 3.9 e a Figura 3.10.

Se na simulação anterior o CM foi capaz de acompanhar o deslocamento do ZMP de referência mesmo que a posição estimada para o ZMP real tenha ultrapassado a região de estabilidade da marcha (a sola do pé), nesta simulação o CM não chegou a acompanhar o deslocamento do ZMP. Este problema de convergência está relacionado tanto à inércia do modelo quanto aos “ganhos” do algoritmo de geração da trajetória do CM (Quadratic Preview), relacionados aos coeficientes Q e R, respectivamente o coeficiente de performance e o coeficiente de esforço

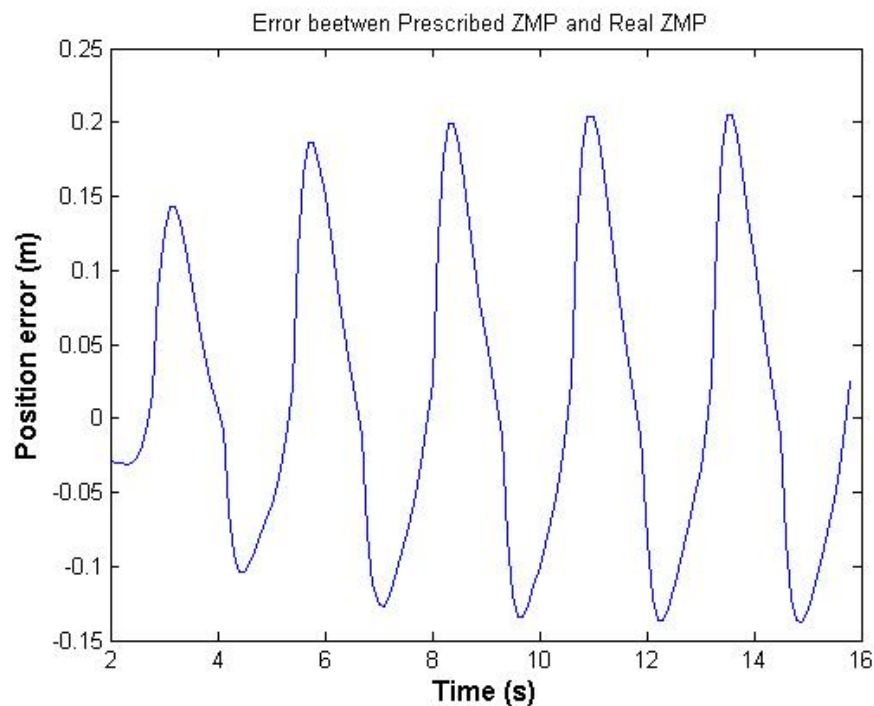


Figura 3.8: Erro de posição do ZMP real para a velocidade de 0.265m/s, estimado após o fim do algoritmo.

para fazer o ZMP resultante perseguir o ZMP de referência. Através de simulações com diferentes coeficientes Q , observou-se que ao diminuir o coeficiente Q de performance, o CM e o ZMP resultante deixam de divergir para a mesma velocidade da simulação anterior, apresentando a curva da Figura 3.11. Contudo, o erro de posicionamento do ZMP, que seria menor ao aumentar-se a performance do algoritmo, é grande o suficiente para gerar a queda do modelo.

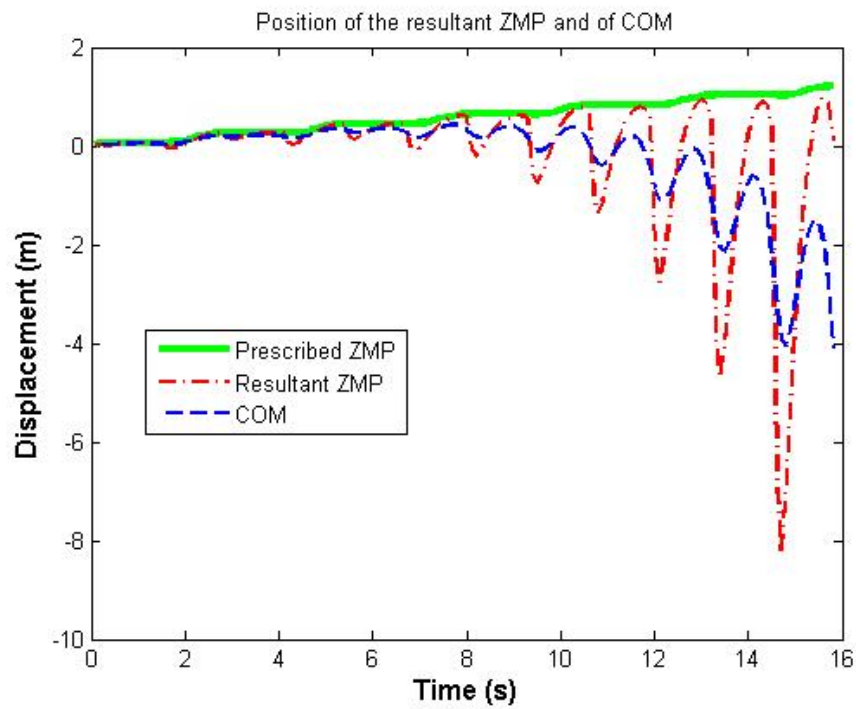


Figura 3.9: Deslocamento da posição do CM do modelo, junto com o deslocamento desejado do ZMP e com o deslocamento real final do ZMP, para a velocidade de 0.3m/s.

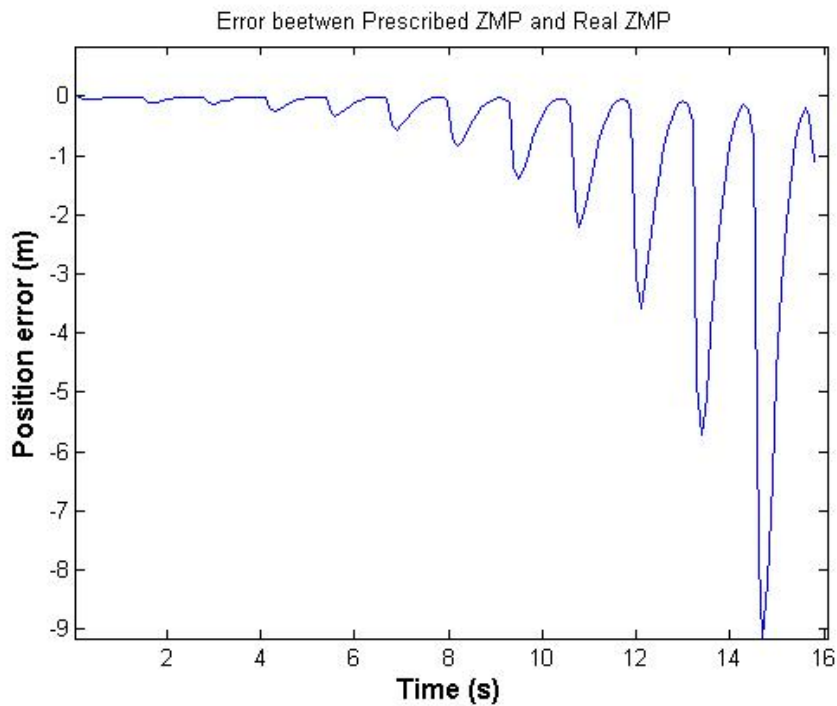


Figura 3.10: Erro de posição do ZMP real para a velocidade de 0.3m/s, estimado após o fim do algoritmo.

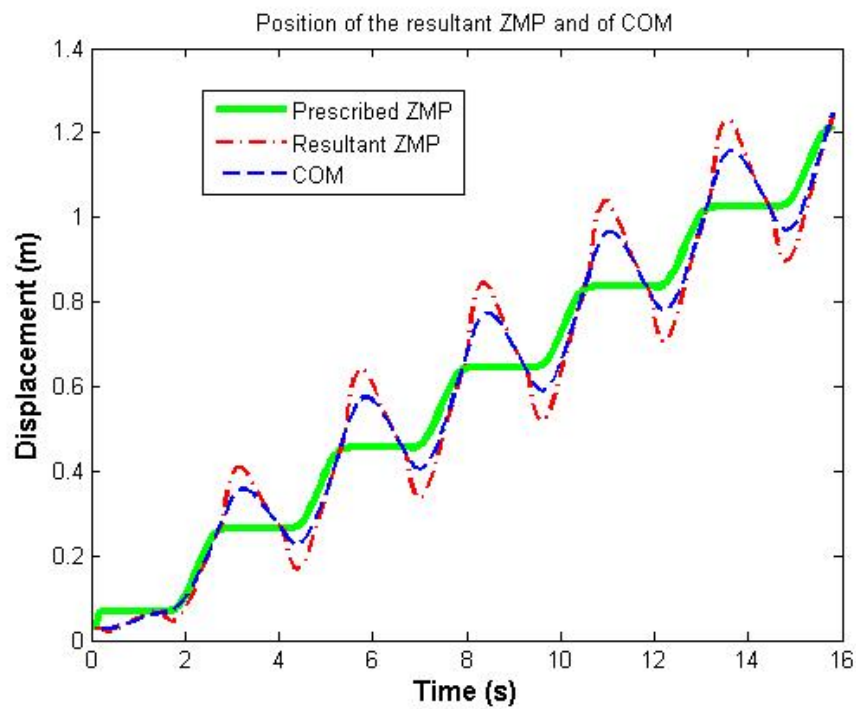


Figura 3.11: Deslocamento da posição do CM do modelo, junto com o deslocamento desejado do ZMP e com o deslocamento real final do ZMP, para a velocidade de 0.3m/s, usando um coeficiente de performance Q menor.

3.1.6 Modificação do padrão de marcha gerado

Uma forma de contornar o problema dos overshoots/undershoots do ZMP resultante, que até determinada velocidade do CM são devidos principalmente às acelerações e desacelerações do CM, é manter o movimento do mesmo durante a fase de apoio simples. Sendo assim, um novo modelo de marcha foi implementado, baseado nesta especificação.

No novo algoritmo de marcha, o ZMP de referência também se move durante a fase de suporte simples. A trajetória realizada nesta fase é uma simples trajetória linear no tempo, do centro do pé de suporte até a sua borda posterior. No final desta fase, o ZMP alcança a borda do pé de suporte, entrando no limite da estabilidade. Porém, como o pé de balanço volta ao chão neste exato momento, uma nova base de suporte para o ZMP é constituída, que vai do pé de apoio ao pé de suporte. Esta nova base coloca novamente o ZMP numa região com margens de estabilidade e garante a estabilidade da marcha numa situação sem perturbações. Nota-se, porém, que presença de perturbações pode levar o ZMP a sair da base de suporte mais facilmente, por ele não estar mais fixado no centro do pé de suporte.

A vantagem de aproximar o ZMP da borda posterior do pé durante a fase de apoio simples, ao invés da borda anterior, é a possibilidade de implementar algoritmos mais eficientes de recuperação da marcha em caso de tropeço do modelo. Um dos algoritmos consiste em levantar rapidamente o pé de balanço e estendê-lo à frente do modelo, na intenção de ultrapassar um eventual objeto que causou o tropeço do robô durante o balanço da perna [12].

Para o novo algoritmo, foi gerada a trajetória para o ZMP de referência exibida na Figura 3.12, estabelecendo a mesma velocidade de 0.3m/s usada na simulação anterior.

Ao gerar a trajetória do CM/ZMP resultante, obteve-se a curva da Figura 3.13. A curva do erro de posicionamento do ZMP, Figura 3.14, confirma que o equilíbrio da marcha foi mantido. Isto confirma a maior estabilidade do posicionamento do ZMP para uma marcha sem perturbações quando o ZMP possui um movimento contínuo, ao invés de intermitente.

Simulações posteriores mostraram a capacidade de aumentar a velocidade de deslocamento do CM, mantendo os outros parâmetros, até o limite de 0.4m/s. Isso mostra um aumento de 50% da velocidade máxima alcançada pelo CM sem a queda do modelo, em comparação com o padrão de marcha anterior. A Figura 3.15 e a Figura 3.16 exibem o deslocamento do CM/ZMP e o erro de posicionamento do ZMP para este caso limite.

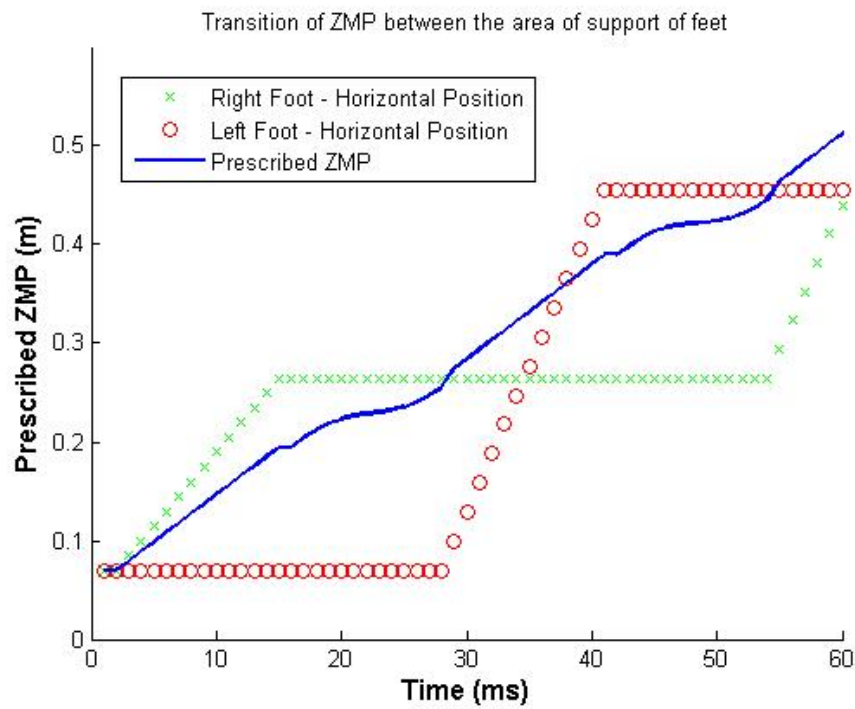


Figura 3.12: Deslocamento da posição do ZMP de referência para a velocidade de 0.3m/s, utilizando o algoritmo de deslocamento contínuo do ZMP.

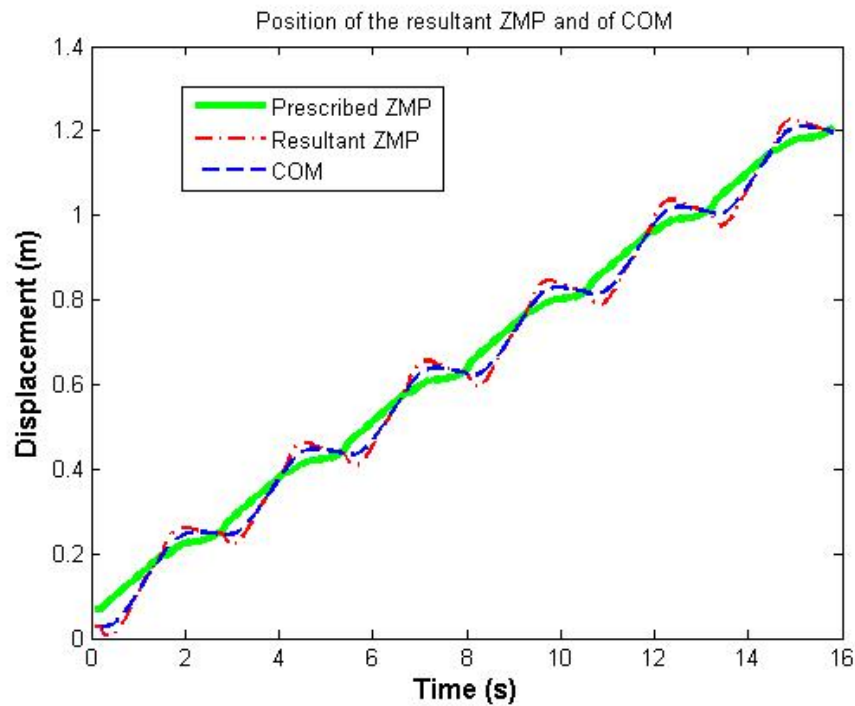


Figura 3.13: Deslocamento da posição do CM/ZMP do modelo para a velocidade de 0.3m/s, utilizando o algoritmo de deslocamento contínuo do ZMP.

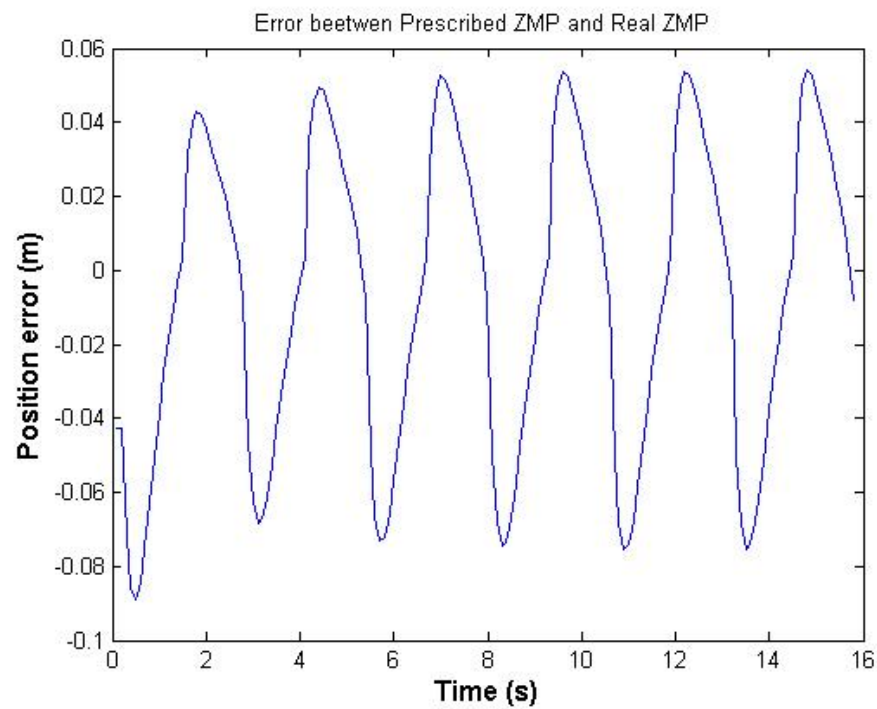


Figura 3.14: Erro de posição do ZMP real para a velocidade de 0.3m/s, utilizando o algoritmo de deslocamento contínuo do ZMP.

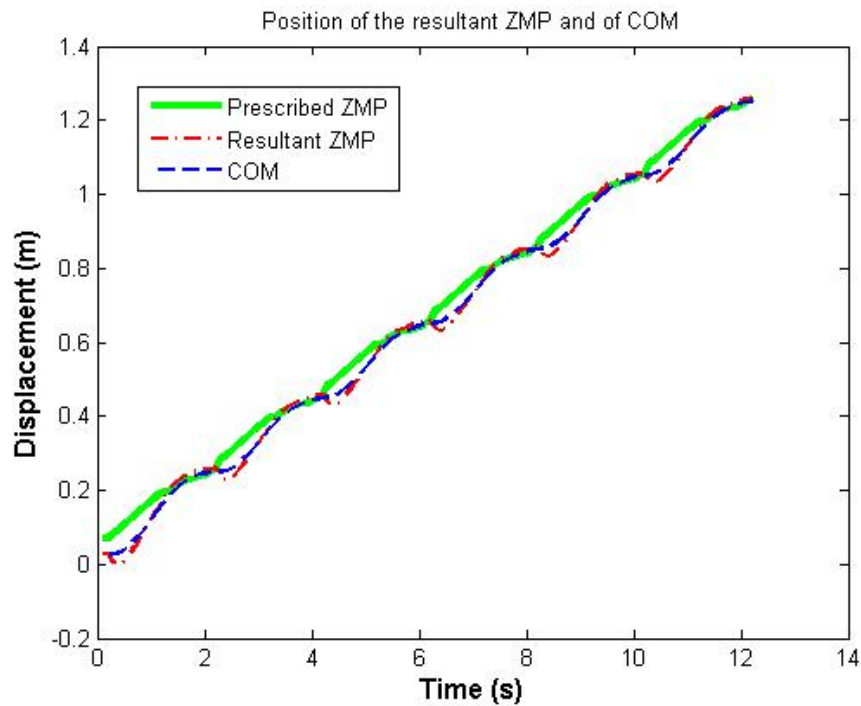


Figura 3.15: Deslocamento da posição do CM/ZMP do modelo para a velocidade de 0.4m/s, utilizando o algoritmo de deslocamento contínuo do ZMP.

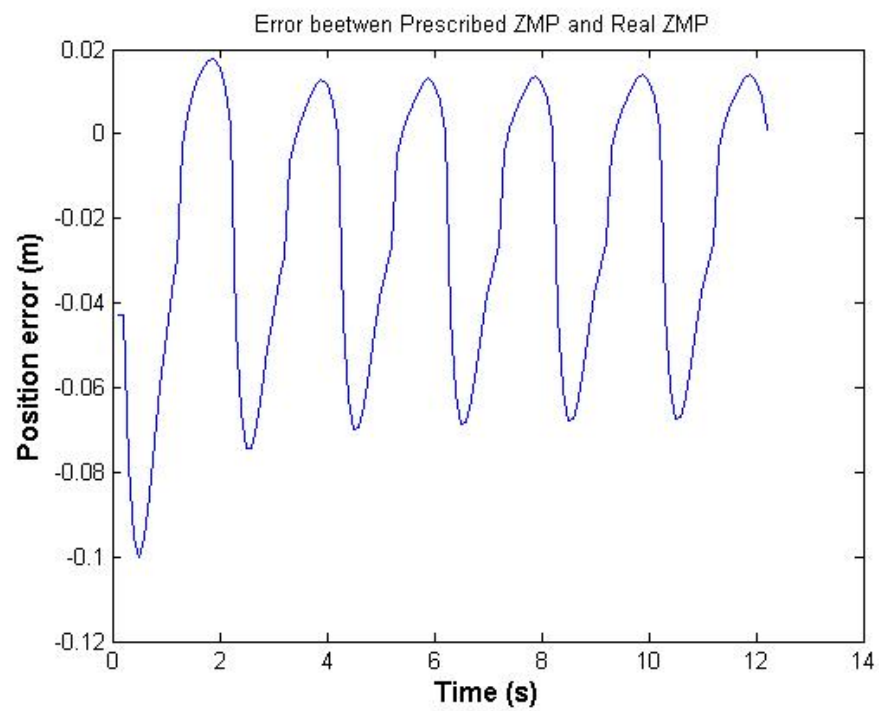


Figura 3.16: Erro de posição do ZMP real para a velocidade de 0.4m/s, utilizando o algoritmo de deslocamento contínuo do ZMP.

3.1.7 Geração das posições articulares das juntas do robô

Um colaborador do Laboratório de Biomecatrônica implementou em parceria com um pesquisador do Japão um algoritmo de cálculo da cinemática inversa de um modelo. O algoritmo tem como entrada as cadeias cinemáticas do modelo (no caso do modelo utilizado neste trabalho, três cadeias: cada uma das pernas e o torso, todas partindo do quadril) e mais dois vetores: um da ponta do pé de suporte até o pé de balanço, e outro da ponta do pé de balanço até o CM. O algoritmo fornece os deslocamentos angulares de cada uma das sete juntas do modelo ao longo do tempo de forma que o modelo gere não só o movimento desejado para os pés como também o movimento desejado para o CM. Para o padrão de marcha descrito na Subseção 3.1.1, obteve-se as curvas da Figura 3.17 e da Figura 3.18 para o deslocamento angular:

(Observação: como este algoritmo de síntese da marcha estabelece uma orientação vertical fixa para o torso, a posição angular da junta do torso é fixa durante todo o movimento.)

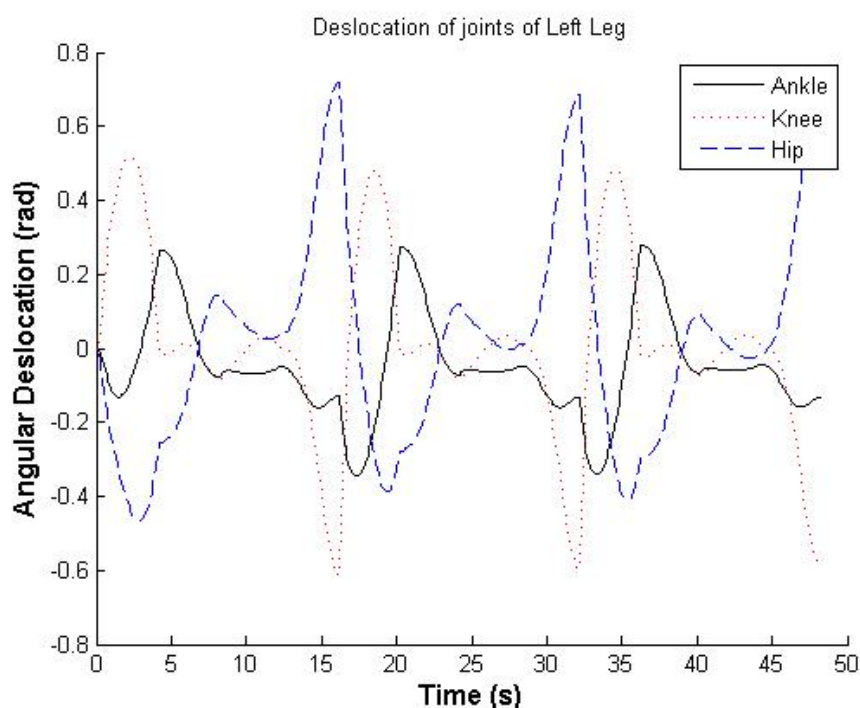


Figura 3.17: Deslocamentos angulares das juntas da perna esquerda para o primeiro padrão de marcha, na velocidade de 0.1m/s.

Conforme esperado, a única diferença entre as duas trajetórias angulares para as juntas das duas pernas é uma diferença de fase, mantendo as mesmas amplitudes e formato de curva para cada junta.

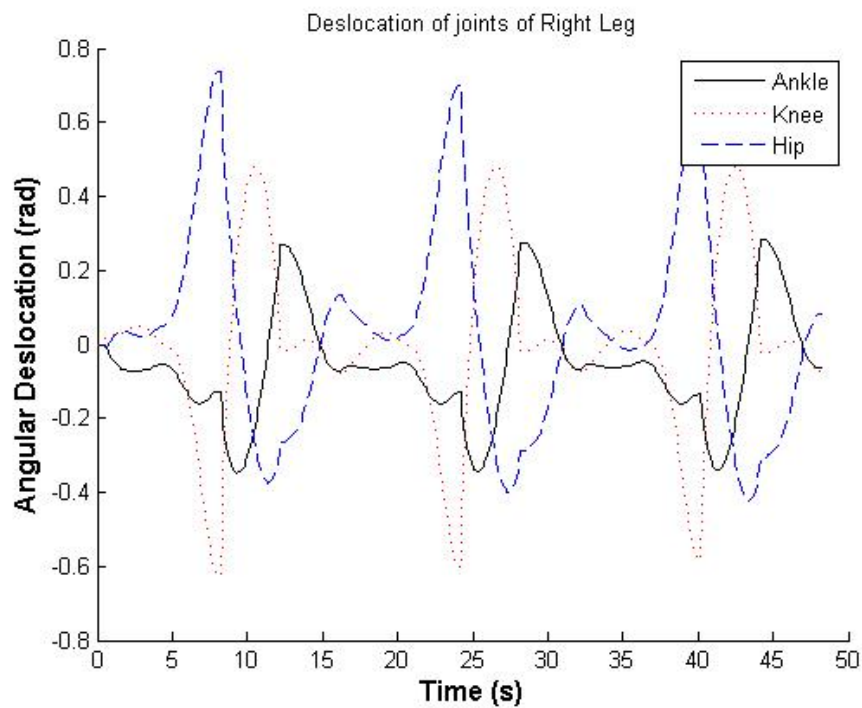


Figura 3.18: Deslocamentos angulares das juntas da perna direita para o primeiro padrão de marcha, na velocidade de 0.1m/s.

Das três juntas da perna, as juntas com maior amplitude de deslocamento são as juntas do joelho e do quadril, com uma amplitude de 1.083rad e 1.1064rad respectivamente, em comparação com 0.6159rad para a junta do tornozelo.

3.2 Controle de Estabilidade

A plataforma de desenvolvimento do algoritmo de síntese da marcha foi o MATLAB. Para realizar simulações do padrão de marcha gerado e desenvolver um sistema de controle de estabilidade da marcha, utilizou-se as plataformas Simulink/SimMechanics. Abaixo serão apresentados o modelo desenvolvido e os dados gerados no processo de simulação da marcha.

3.2.1 Desenvolvimento de um modelo de impacto para o SimMechanics

Embora a toolbox SimMechanics trate toda a dinâmica multicorpo de um modelo como um simulador multicorpo usual, a toolbox não foi desenvolvida tendo em mente a possibilidade de colisões entre corpos (a relação entre os corpos é descrita por meio de vínculos mecânicos, e não há um modelo para a restrição unidirecional de interação entre o modelo e o chão). Para gerar este tipo de restrição, utilizou-se um controlador do tipo PD para descrever a interação entre o chão e alguns pontos dos corpos do modelo (particularmente, a extremidade dos links do modelo). A ação do controlador é condicional, sendo ativada quando os pontos em questão ultrapassam a altura zero (o nível do chão) para valores negativos. A partir deste ponto, o termo Proporcional do controlador passa a simular a rigidez do chão, enquanto que o termo Derivativo passa a simular as perdas por colisão (na direção vertical) e por atrito (na direção horizontal). A Figura 3.19 apresenta o diagrama de blocos deste controlador condicional. Cada uma das extremidades dos links (que são tomados como corpos rígidos no Simmechanics) possui um bloco igual a este, modelando sua possível interação com o chão.

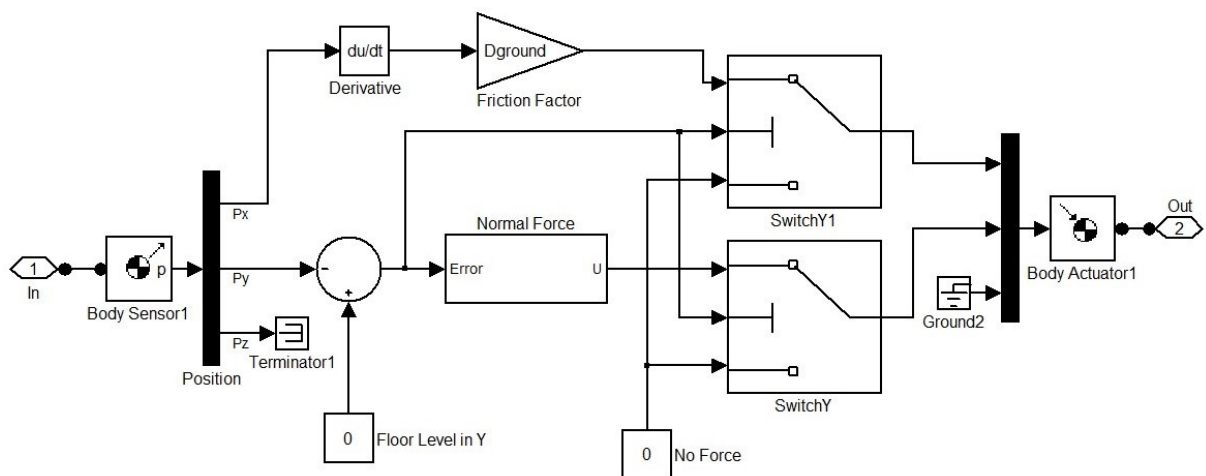


Figura 3.19: Diagrama de blocos para simulação de colisões com o chão em um modelo do Simmechanics. Baseado em [3]

3.2.2 Modelo 2D desenvolvido em SimMechanics para a marcha em malha aberta

A Figura 3.20 apresenta uma visualização do modelo, tanto no plano de ação quanto em perspectiva, enquanto a Figura 3.21 apresenta o diagrama completo de blocos do Simulink/-Simmechanics para a simulação da marcha gerada pelo processo de síntese:

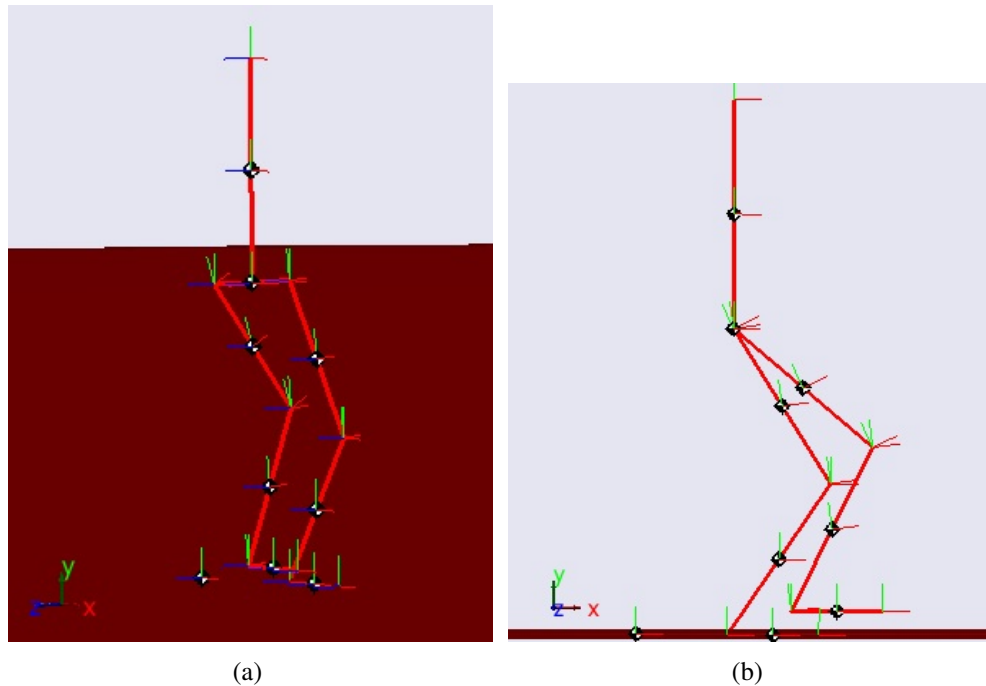


Figura 3.20: Visualização do modelo de robô gerado no Simulink com movimentação restrita ao plano XY a) em perspectiva, e b) em perfil.

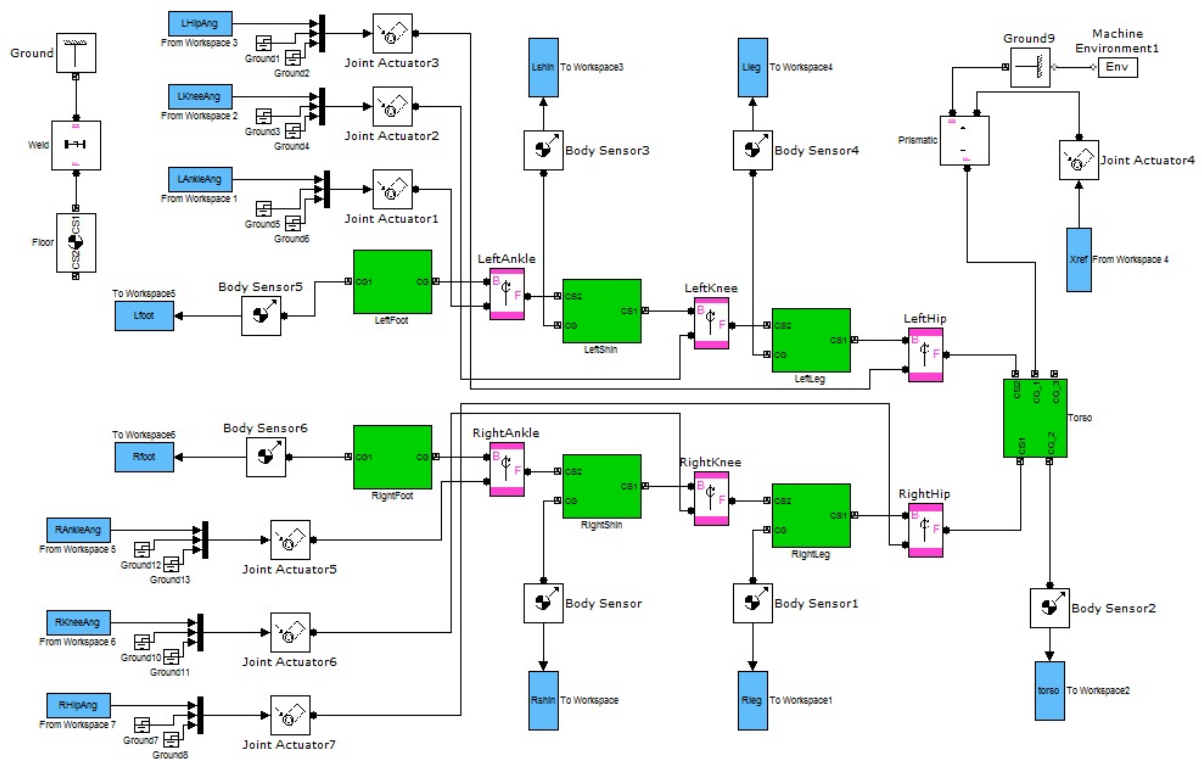


Figura 3.21: Blocos de modelagem do Simulink para a simulação da marcha gerada (em malha aberta) pelo processo de síntese. Os itens em verde são os links do modelo, itens em ciano são as juntas e itens em azul são os blocos para a entrada e saída de dados de/para o Workspace do MATLAB.

3.2.3 Resultados das simulações da marcha em malha aberta

Nesta primeira etapa da simulação, os blocos de controle geram a marcha em malha aberta e não reagem a perturbações. Contudo, para uma marcha sem perturbações, o modelo foi capaz de desenvolver uma marcha estável mesmo com as imprecisões do modelo utilizado para descrever a relação entre o CM e o ZMP (modelo do carrinho de mesa) e a rigidez não absoluta do chão, que levou a uma leve inclinação do modelo e a outras influências no movimento. As figuras seguintes apresentam os deslocamentos lineares do torso, de cada um dos pés e do CM do modelo:

Nas figuras a seguir, compara-se a trajetória planejada do CM com a trajetória real desenvolvida na simulação. Considerando que a posição do CM influencia a posição do ZMP, esta medida foi usada para avaliar o erro de posicionamento do ZMP e por consequente a estabilidade do modelo.

Uma forma mais acurada de fazer esta avaliação seria medir diretamente as forças atuantes no pé do modelo e então calcular a posição do ZMP, porém como o vínculo entre o pé do

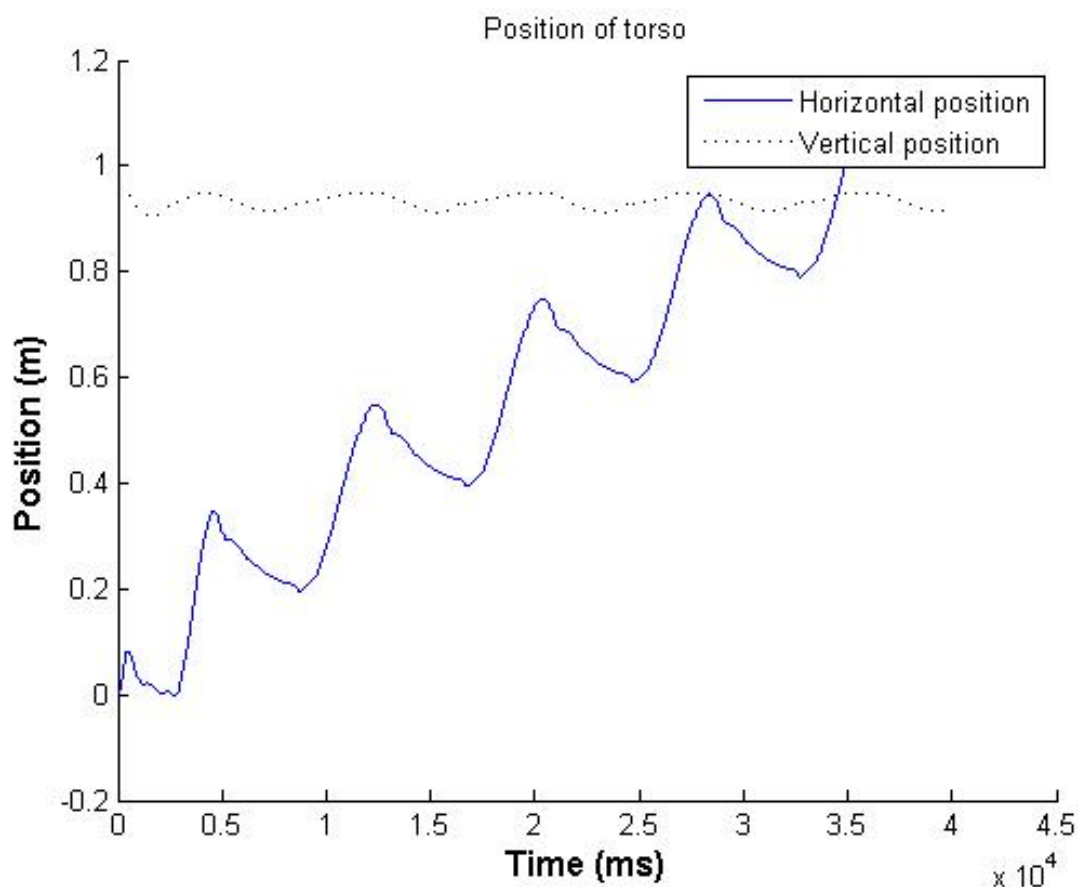


Figura 3.22: Posições horizontal e vertical do torso durante a marcha controlada em malha aberta.

modelo e o chão é adaptado, e não um objeto da biblioteca do SimMechanics, não há sensores para medir as forças atuantes no link dos pés do robô.

No gráfico acima observa-se o erro de posição do CM, que oscila entre 0.01 e -0.01m. O pequeno deslocamento contínuo dos valores do erro para valores mais positivos se deve à imprecisão da modelagem do atrito dos pés com o chão no SimMechanics, que segue um modelo viscoso, e não o modelo de fator de atrito; esta imprecisão leva a um deslocamento horizontal resultante maior do modelo.

Este erro de posicionamento se soma ao erro de posicionamento do ZMP, que conforme a (1.1) se mostra dependente da posição do CM. Sendo assim, o erro do posicionamento do ZMP observado na síntese da marcha aumenta para no máximo 20% da posição máxima possível para o mesmo sem que o robô tombe, o que demonstra uma estabilidade ainda considerável para o robô nas condições de marcha apresentadas.

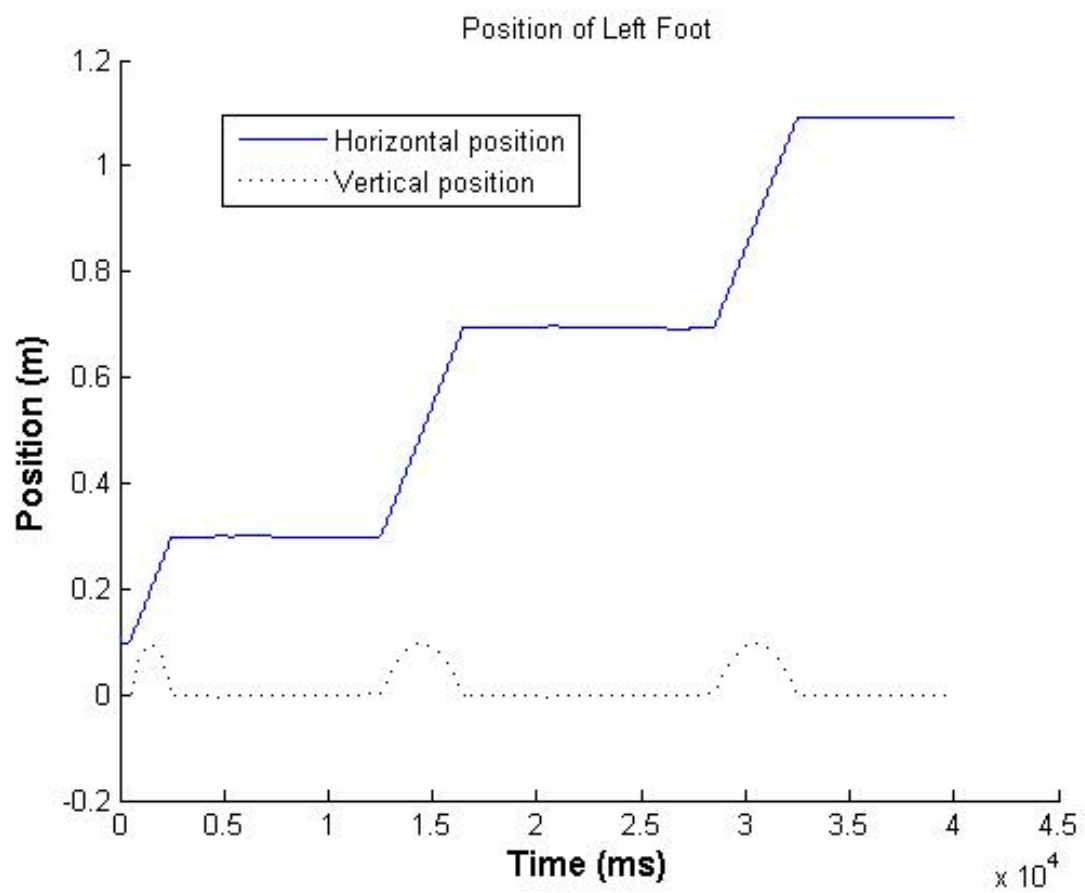


Figura 3.23: Posições horizontal e vertical do pé esquerdo durante a marcha controlada em malha aberta.

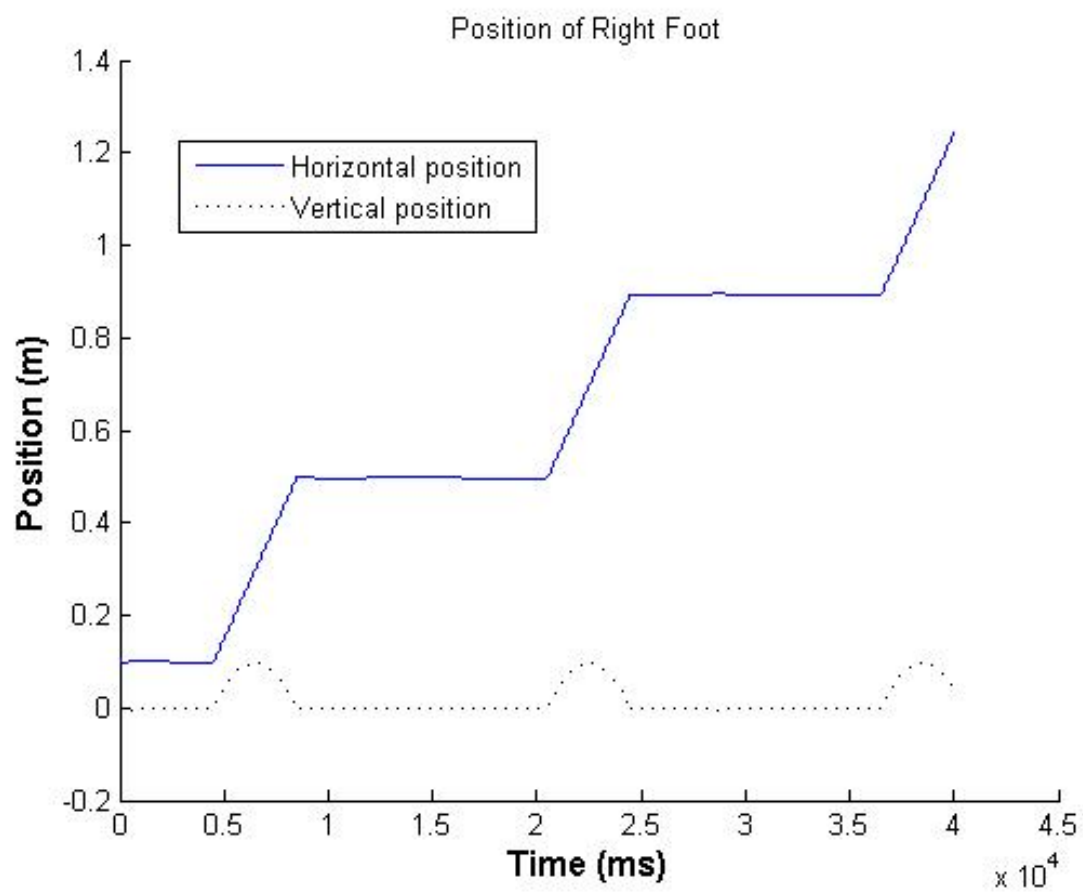


Figura 3.24: Posições horizontal e vertical do pé direito durante a marcha controlada em malha aberta.

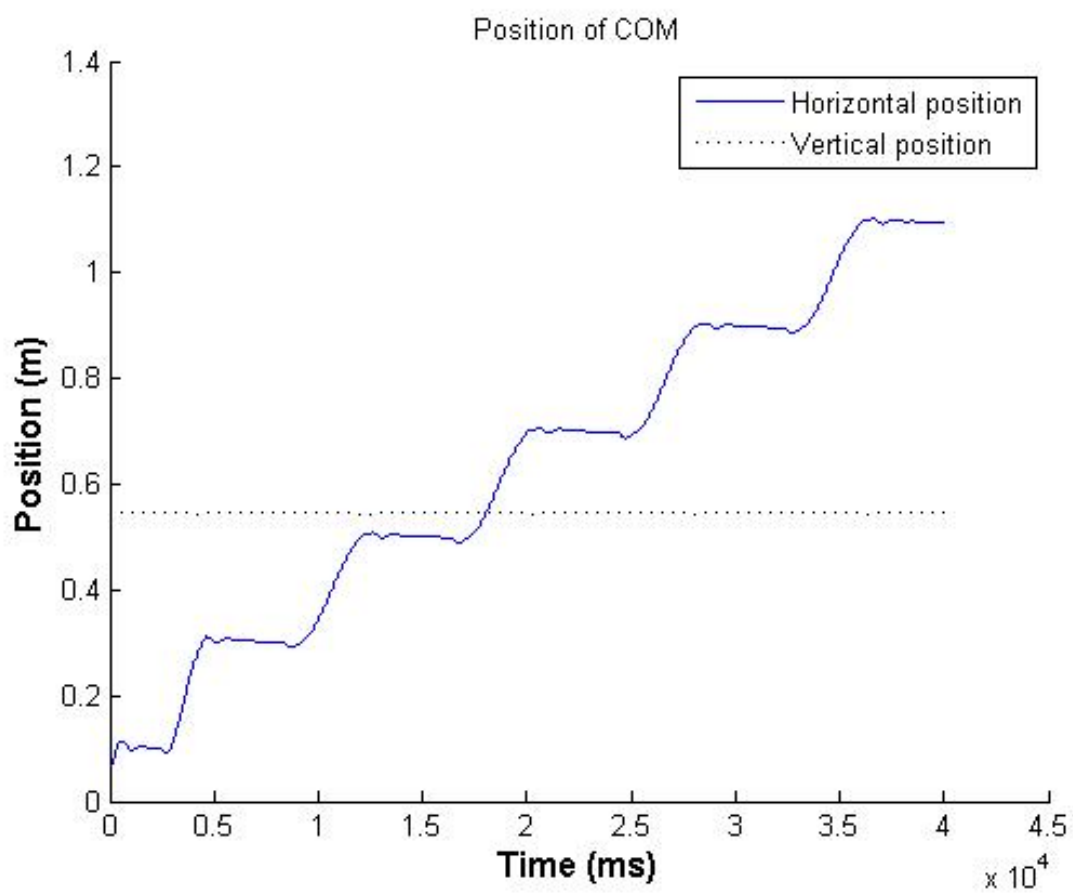


Figura 3.25: Posições horizontal e vertical do CM durante a marcha controlada em malha aberta.

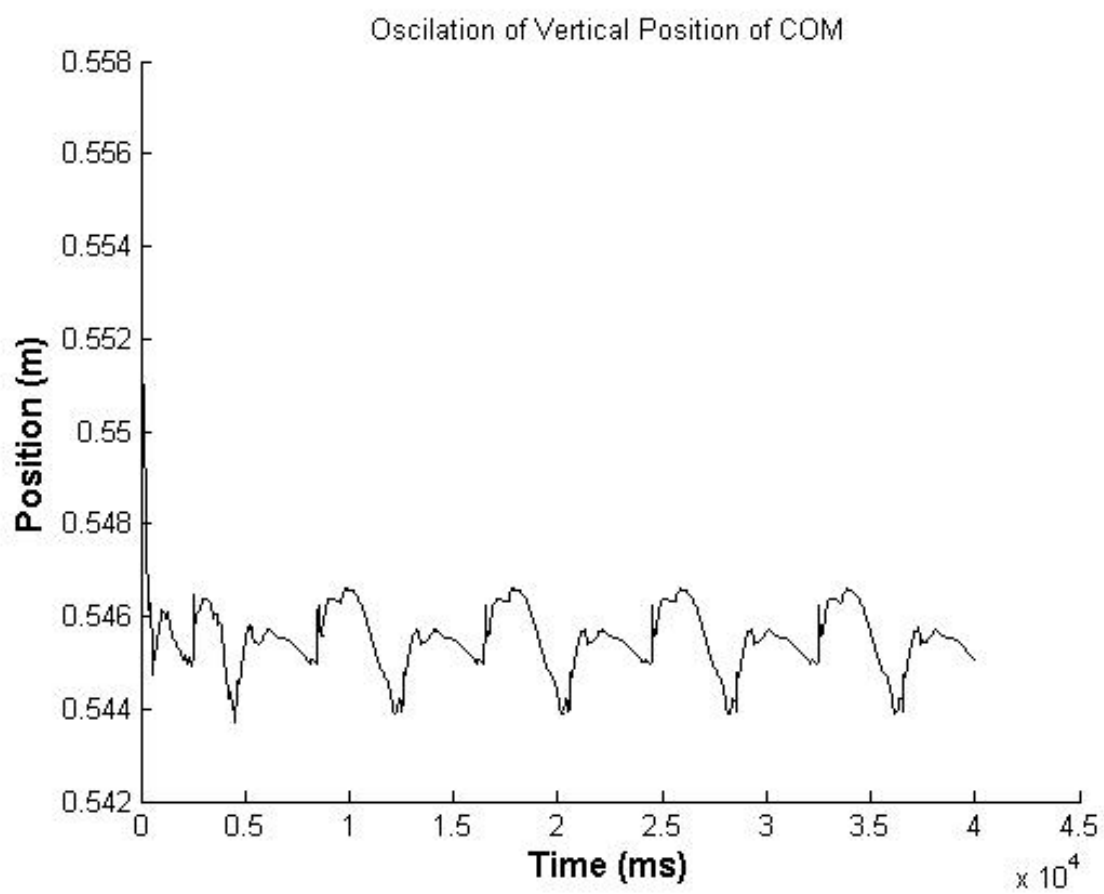


Figura 3.26: Oscilação da posição vertical do CM durante a marcha controlada em malha aberta.

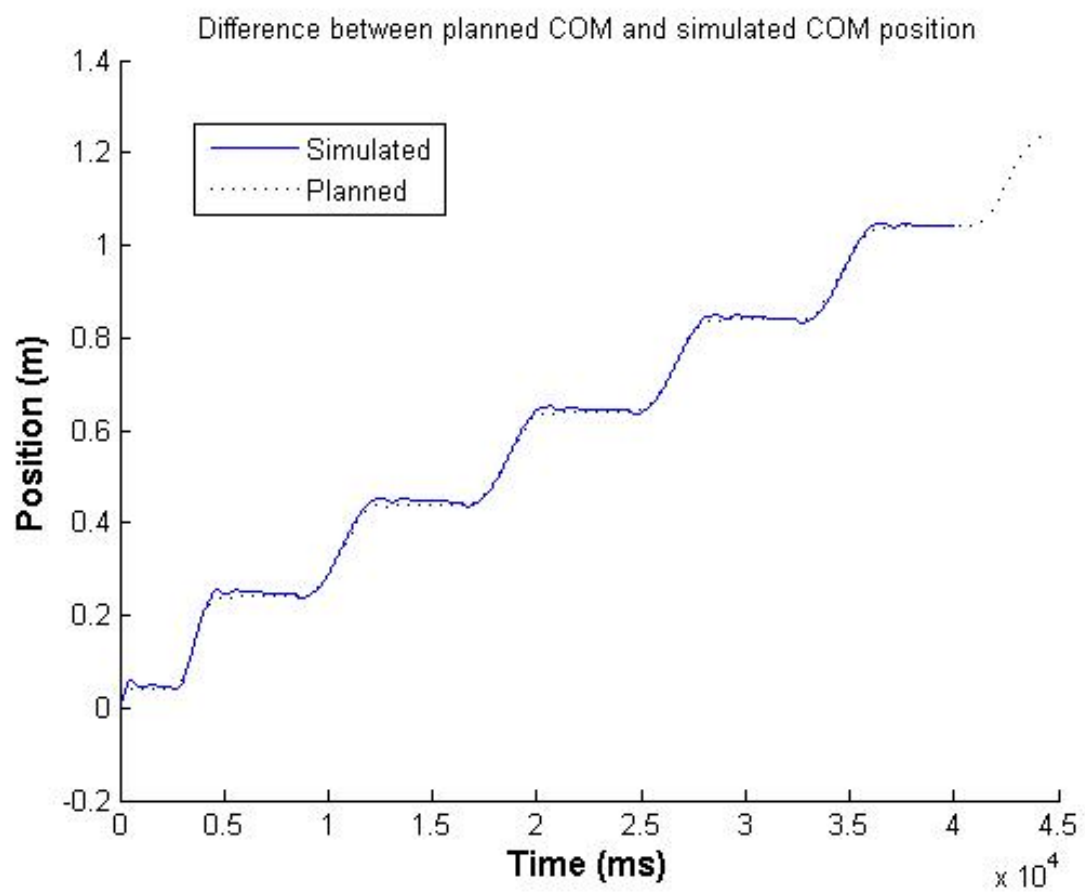


Figura 3.27: Deslocamento do CM planejado e simulado na marcha controlada em malha aberta.

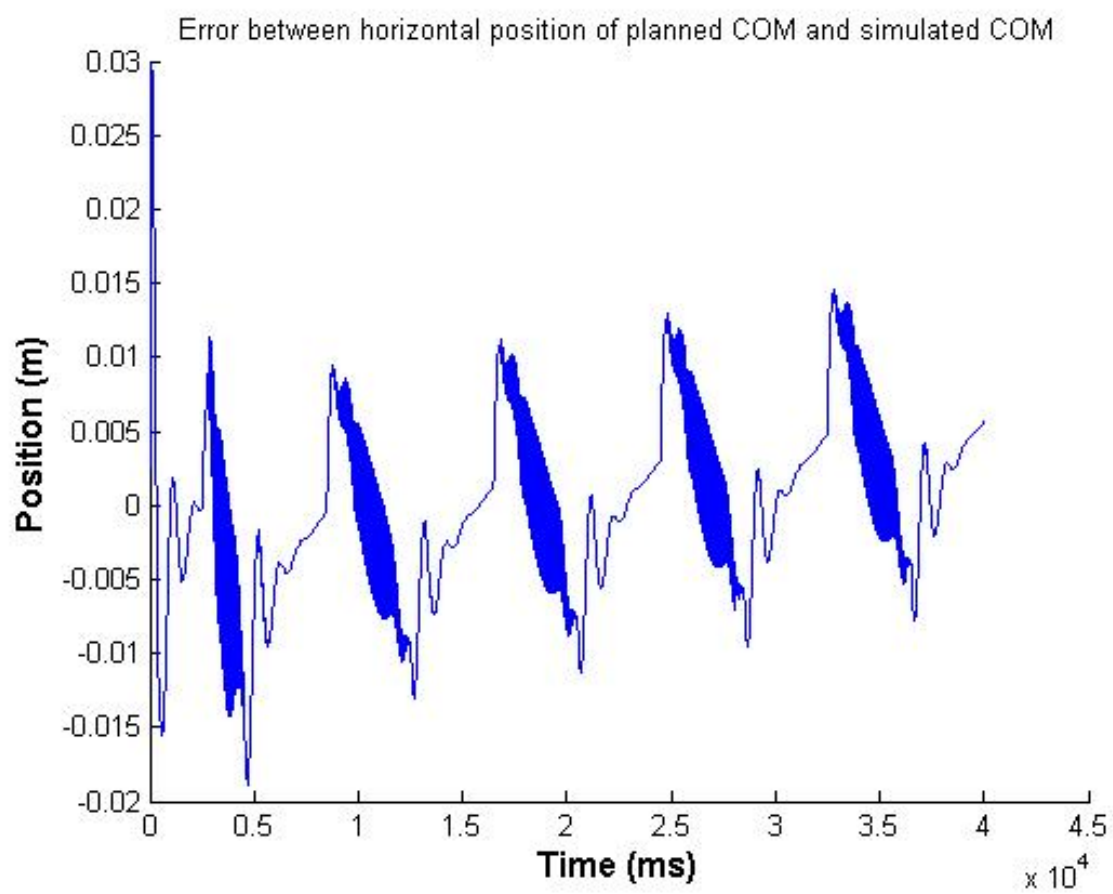


Figura 3.28: Erro de posição do CM simulado na marcha controlada em malha aberta.

3.2.4 Modelo 2D desenvolvido em SimMechanics para controle da marcha em malha fechada

A Figura 3.29 apresenta o diagrama de blocos para a simulação do sistema de controle de estabilidade do modelo, em malha fechada. O sistema de controle ainda está em fase de testes e implementação, avaliando algumas estratégias possíveis para correção da estabilidade do modelo.

Uma primeira estratégia em estudo é a correção da posição do CM, que afeta diretamente a posição do ZMP e portanto a estabilidade da marcha do robô. O bloco de controle apresentado em laranja na Figura 3.29 recebe a leitura da posição do CM de cada link do modelo, calcula a posição do CM do modelo completo, compara com o a posição de referência do CM e gera um sinal de erro, ao qual se aplica um fator de esforço de correção, somando o resultado final à posição de referência do CM. Este sinal é então enviado como entrada do algoritmo de cálculo da cinemática inversa, resultando nas posições articulares das juntas.

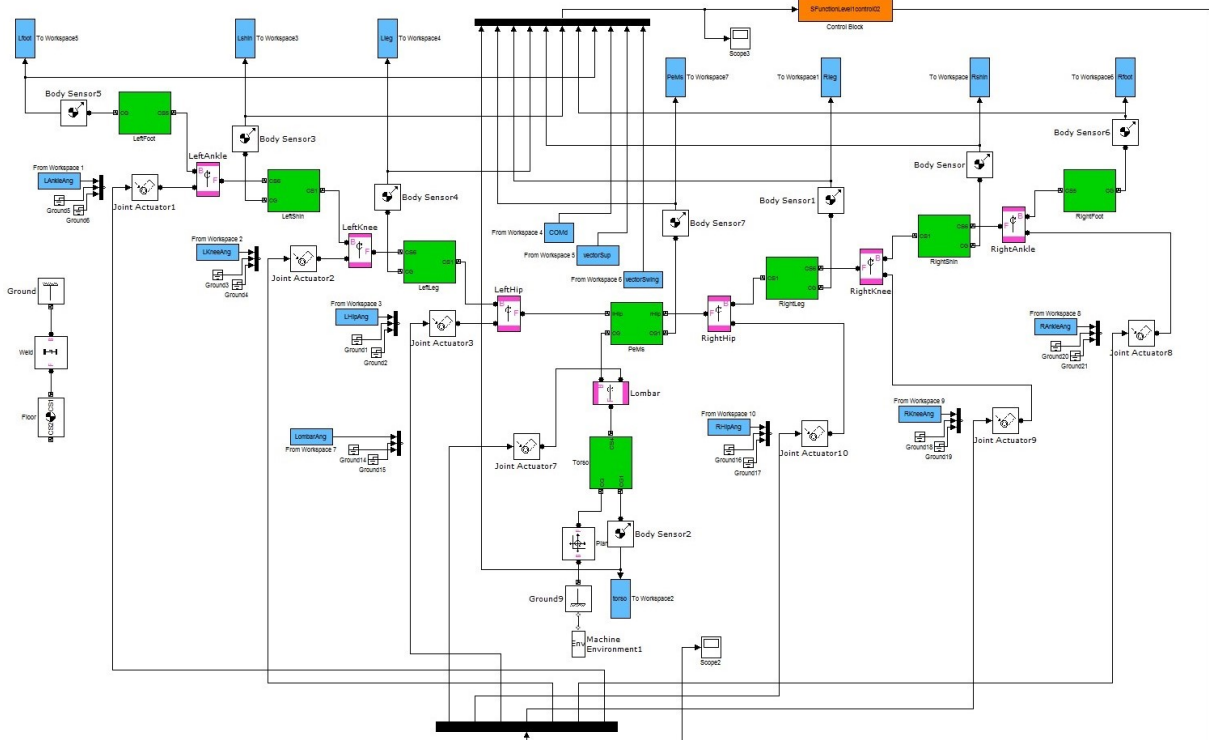


Figura 3.29: Blocos de modelagem do Simulink para a simulação do sistema de controle de estabilidade da marcha. Adicionalmente aos itens descritos na figura anterior, neste modelo há o acréscimo do bloco em laranja, que contém o bloco com a lógica de controle em malha fechada.

3.3 Estudo do Consumo Energético

Duas medidas de consumo energético foram estabelecidas para a análise do consumo da marcha gerada no presente trabalho:

1. A potência total, que soma todos os trabalhos positivos e negativos realizados em uma perna durante um ciclo da marcha (de uma saída do pé do chão até a próxima saída, passando pelo movimento da outra perna).
2. A potência total absoluta, que soma o valor absoluto de todos os trabalhos realizados em uma perna durante um ciclo da marcha.

Uma das fontes de consumo energético numa marcha bípede é a contínua retirada de energia do sistema no processo de desacelerar links do modelo, a fim de posicionar a extremidade da cadeia cinemática (o pé) conforme a trajetória determinada. Sendo assim, o modelo está continuamente inserindo energia no sistema na forma de potência positiva (isto é, torque aplicado no mesmo sentido do movimento do link), acelerando alguns links, e retirando energia do sistema na forma de potência negativa, desacelerando outros links. Contudo, seja inserindo ou retirando energia mecânica no sistema, os atuadores estão consumindo energia ao atuarem a junta em particular.

As seções abaixo apresentam e analisam as medidas da potência realizada por todas as juntas do modelo, durante o ciclo da marcha, feitas durante simulações no Simulink.

3.3.1 Consumo Energético do Padrão de Marcha com Paradas do CM

A Figura 3.30 apresenta a soma das potências realizadas pelas juntas do modelo ao longo do ciclo da marcha do primeiro padrão desenvolvido neste trabalho. Já a Figura 3.31 apresenta a soma dos valores absolutos das mesmas potências.

A soma das potências representa a energia líquida inserida no sistema, enquanto a soma das potências absolutas representa a energia total gasta ao atuar todas as juntas.

Na Figura 3.30 observa-se um grande pico no gráfico no momento em que há a aceleração do CM. O mesmo pico é observado na Figura 3.31, porém há um pico adicional próximo e anterior ao primeiro. Este pico representa os esforços das juntas quando há o impacto do pé de balanço do robô com o chão ao terminar o movimento da perna de balanço. Este consumo das juntas não adiciona energia ao sistema e por isso não é representado na Figura 3.30. Contudo, o maior pico de potência é o presente em ambos os gráficos, representando a energia de aceleração do CM.

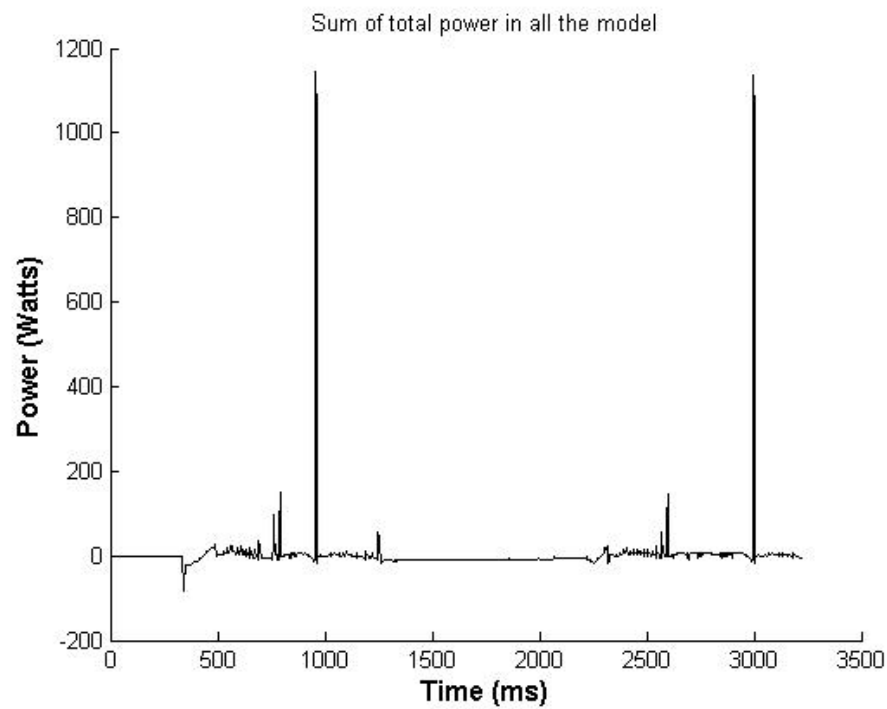


Figura 3.30: Soma das potências realizadas pelas juntas do modelo no primeiro padrão de marcha.

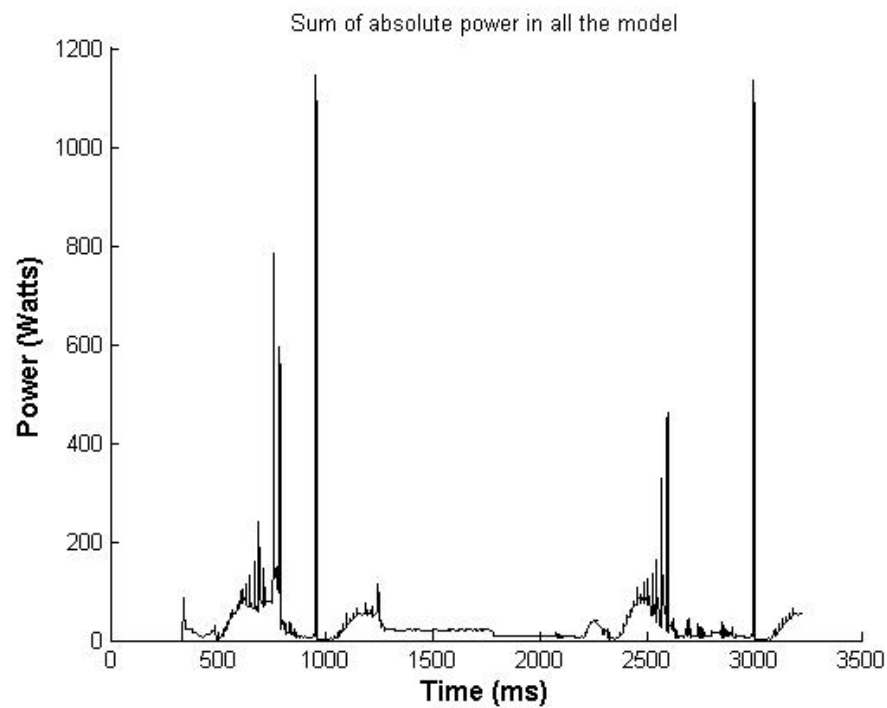


Figura 3.31: Soma do valor absoluto das potências realizadas pelas juntas do modelo no primeiro padrão de marcha.

3.3.2 Consumo Energético do Padrão de Marcha com Movimento Contínuo do CM

A Figura 3.32 apresenta a soma das potências realizadas pelas juntas do modelo ao longo do ciclo da marcha do segundo padrão desenvolvido neste trabalho. Já a Figura 3.31 a soma dos valores absolutos das mesmas potências. A Figura 3.33 apresenta a soma dos valores absolutos das mesmas potências.

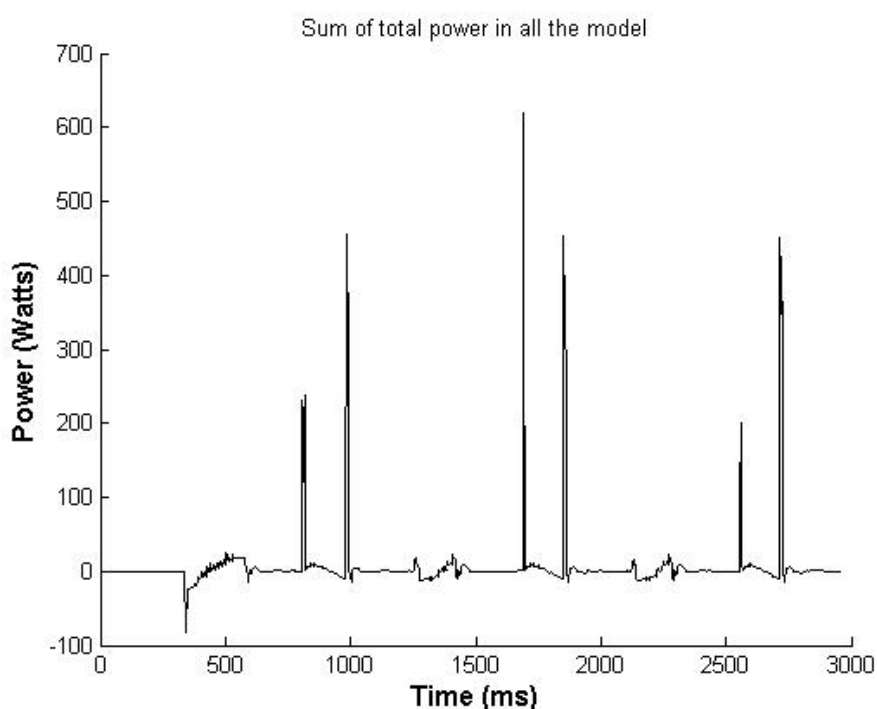


Figura 3.32: Soma das potências realizadas pelas juntas do modelo no segundo padrão de marcha.

A primeira diferença deste padrão de marcha diz respeito ao pico de potência realizado ao acelerar o CM, que é quase 50% menor. Há também inserção de energia no sistema durante o levantamento da perna de balanço, o que não ocorria anteriormente. Isto representa o fato de que, por o CM estar em movimento durante a fase de apoio simples, a energia consumida para movimentar a perna se soma ao sistema, pois devido ao fato do CM estar se movimentando, não é necessário realizar tanta potência negativa em algumas juntas para manter o CM no mesmo lugar.

Analisando o segundo gráfico, observa-se que somente o pico da aceleração do CM é muito maior que o pico no primeiro gráfico. Isto significa que a perda energética por trabalho negativo é relevante apenas neste momento, enquanto que no momento da aceleração da perda de balanço a maior parte da energia consumida nas juntas é transferida para o sistema total do robô.

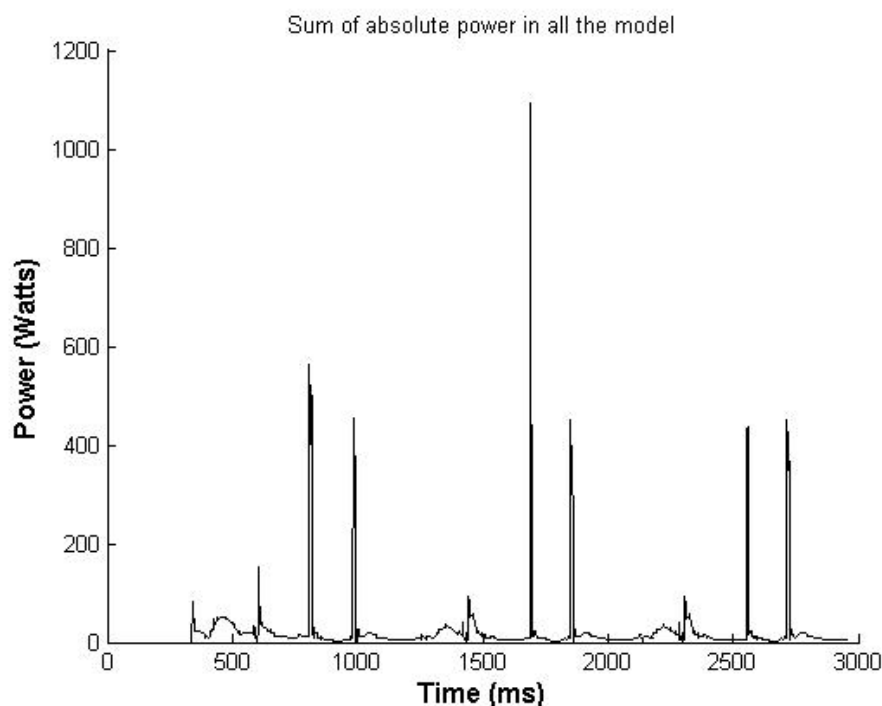


Figura 3.33: Soma do valor absoluto das potências realizadas pelas juntas do modelo no segundo padrão de marcha.

3.3.3 Comparação com o Consumo Energético de um Padrão de Marcha Realizado por um Ser Humano de Mesmas Dimensões

A Figura 3.34 e a Figura 3.35 representam as mesmas análises feitas nas duas seções anteriores, porém desta vez para a marcha de um ser humano com a mesma massa e dimensões do modelo.

A principal diferença do consumo energético deste voluntário para um modelo robótico de dinâmica similar é o valor dos picos da potência, que são de duas a quatro vezes menores que os picos dos padrões de marcha gerados para o modelo do robô. Isto representa uma eficiência energética muito maior do modelo humano. Outra observação importante é uma menor diferença entre os dois gráficos, indicando que comparativamente aos dois modelos, há um menor desperdício energético no modelo humano por conta de potências negativas.

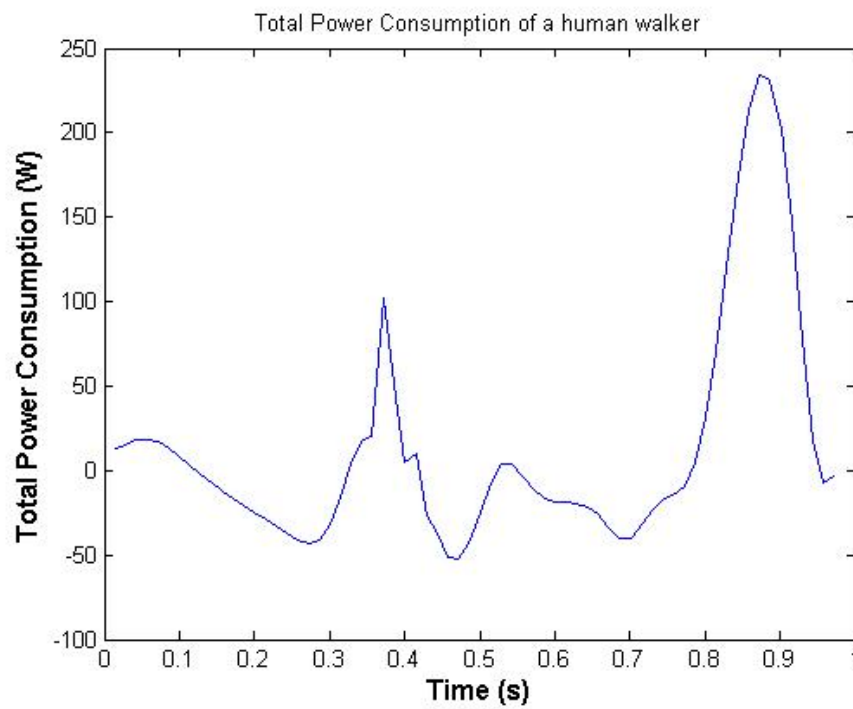


Figura 3.34: Soma do valor das potências realizadas pelas juntas de um ser humano durante a marcha. Dados retirados de [33].

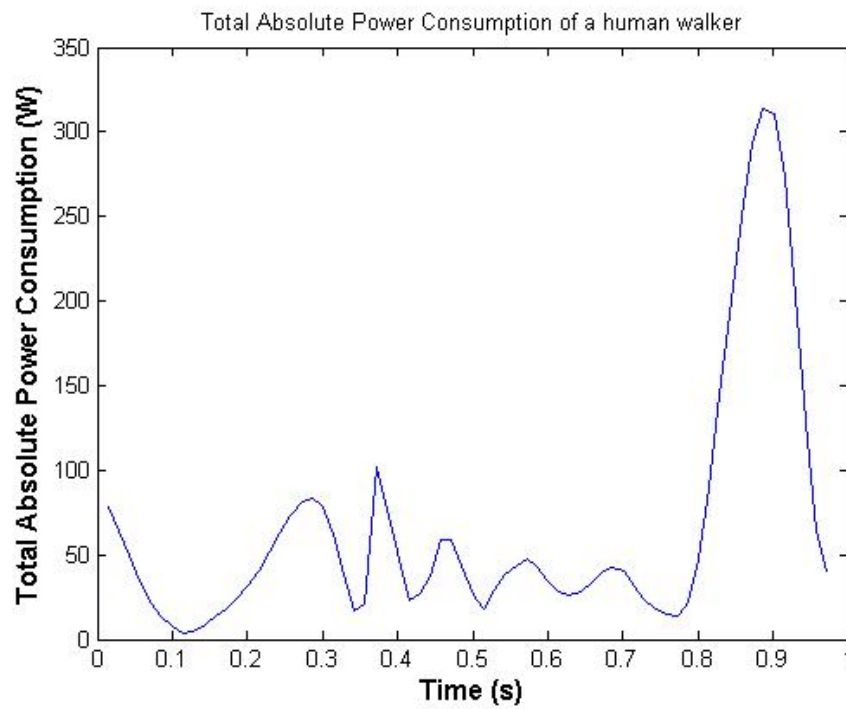


Figura 3.35: Soma do valor absoluto das potências realizadas pelas juntas de um ser humano durante a marcha. Dados retirados de [33].

Capítulo 4

Conclusão

Neste trabalho, o processo de síntese e a verificação em simulação da validade de um padrão de marcha, gerado a partir do critério de estabilidade segundo o conceito de Zero-Moment Point, foram realizados e estudados.

Verificou-se a simplicidade do modelo e a sua capacidade de executar a marcha com uma robustez interna limitada do algoritmo, que na ausência de grandes perturbações é capaz de absorver o erro inerente ao modelo simplificado assumido para a dinâmica do robô (modelo do carrinho de mesa), assim como uma pequena perturbação gerada pelo modelo de chão utilizado (a rigidez não-absoluta do chão incorria numa pequena inclinação do modelo durante as simulações, influenciando o posicionamento pré-planejado do ZMP). Tal robustez interna do algoritmo se deve à margem de erro que a extensão do pé do robô oferece para o posicionamento estável do ZMP, planejado para manter-se no centro do pé, porém deslocando-se dentro da região da sola do pé sem gerar a queda do robô durante a marcha.

Observou-se também o impacto da velocidade na estabilidade da marcha implementada através do sistema ZMP, que tradicionalmente não reaproveita a dinâmica natural de seus elementos estruturais e tem considerações a respeito da aceleração e desaceleração do seu Centro de Massa, por sua influência sobre a posição do ZMP e por consequente sobre a estabilidade da marcha.

Ao implementar um segundo padrão de marcha que não interrompe o movimento do ZMP durante a fase de suporte simples, observou-se um aumento da estabilidade em malha aberta da marcha, demonstrada pela capacidade de aumentar a velocidade de movimento máxima do robô sem causar a sua queda. Contudo, a diminuição da margem de estabilidade do modelo devido à maior aproximação do ZMP para a borda do pé se mostra um trade-off que impacta o modelo na situação de uma perturbação inesperada. A implantação de um sistema de controle de estabilidade em malha fechada é sugerida como trabalho futuro para verificar a possibilidade de se contornar tal trade-off.

A análise energética dos dois padrões de marcha, através da avaliação da soma das potências realizadas nas juntas, mostrou uma maior eficiência do segundo padrão de marcha, representada pela inserção de energia no sistema não somente durante o início da fase de apoio duplo, mas também na fase de aceleração da perna de balanço, o que não ocorre no padrão de marcha com paradas do CM (um padrão usual em sistemas de marcha ZMP). O pico de energia também é menor no início da fase de apoio duplo, representando a menor necessidade de consumo

energético para lidar com as acelerações e desacelerações do CM. Tal resultado indica que o design de sistemas de marcha ZMP com menor consumo energético envolve considerações sobre o movimento contínuo do CM do robô, o que requer o balanceamento do trade-off da diminuição da margem de estabilidade da marcha do robô, causada pela maior aproximação do ZMP da borda do pé de apoio durante a fase de balanço da perna.

Referências Bibliográficas

- [1] ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2006. Humanoid Robots. Disponível em <http://www.aist.go.jp/aist_e/sst/exhibition_guide/03.html>. Último acesso em Dezembro de 2013.
- [2] AMERICAN HONDA MOTOR CO., INC., 2005. Meet Asimo. Disponível em <<http://asimo.honda.com/gallery/>>. Último acesso em Dezembro de 2013.
- [3] APARICIO, J., 2012. Simulation of a humanoid robot. Disponível em <<http://embeddedprogrammer.blogspot.com.br/2012/08/simulation-of-humanoid-robot.html>>. Último acesso em Dezembro de 2013.
- [4] BOER, T., 2012. Foot placement in robotic bipedal locomotion. Ph.D. dissertation. Delft University, The Netherlands.
- [5] BOSTON DYNAMICS, 2008. Bigdog. Disponível em <http://www.bostondynamics.com/img/BigDog_Packs.png>. Último acesso em Dezembro de 2013.
- [6] BOSTON DYNAMICS, 2011. Petman. Disponível em <<http://www.youtube.com/watch?v=mclbVTIYG8E>>. Último acesso em Novembro de 2013.
- [7] BOSTON DYNAMICS, 2013. Robot Petman. Disponível em <http://www.bostondynamics.com/robot_petman.html>. Último acesso em Novembro de 2013.
- [8] BOVEN, HJ., 2000. Finding Limit Cycles of Dynamical Systems Using Genetic Algorithms. Master's Thesis. Universiteit Twente, The Netherlands.
- [9] CHEN, MY., 2011. The compass gait with a Torso – Analyses and Control of Walking on Stochastically Rough Terrain. Master's Thesis. University of California. Santa Barbara, USA.
- [10] DELFT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2008. Denise. Disponível em <<http://www.3me.tudelft.nl/en/about-the-faculty/departments/biomechanical-engineering/research/dbl-delft-biorobotics-lab/bipedal-robots/denise/>>. Último acesso em Dezembro de 2013.
- [11] DERTIEN, E., 2005. Realisation of an energy-efficient walking robot. Master's Thesis. University of Twente, The Netherlands.

- [12] FORNER-CORDERO, A.; KOOPMAN, HFJM.; VAN DER HELM, FCT., 2004. Mechanical Model of the Recovery Reaction from Stumbling: Effect of Step Length on Trunk Control. Biol Cybern Submitted. Universiteit Twente, The Netherlands.
- [13] GARCIA, M.; CHATTERJEE, A.; RUINA, A.; COLEMAN, M., 1998a. The Simplest Walking Model: Stability, Complexity and Scaling. ASME J. Biomechanical Engineering, Vol 120, n.o 2, pp 281-288. Cornell University, USA.
- [14] GARCIA, M.; CHATTERJEE, A.; RUINA, A.; COLEMAN, M., 1998b. Some Results In Passive-Dynamic Walking. Euromech Conference on Biology and Technology of Walking in Munich, Germany. Cornell University, USA.
- [15] HOBBELEN, D.; BOER, T.; WISSE, M., 2008. System overview of bipedal robots Flame and TULip: tailor-made for Limit Cycle Walking. 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Delft University of Technology, The Netherlands.
- [16] IBGE, 2008. População brasileira envelhece em ritmo acelerado. Disponível em <<http://saladeimprensa.ibge.gov.br/noticias?view=noticia&id=1&busca=1&idnoticia=1272>>. Seção “Sala de Imprensa”. Último acesso em Novembro de 2013.
- [17] KAJITA, S.; MATSUMOTO, O.; SAIGO, M., 2001. Real-time 3D walking pattern generation for a biped robot with telescopic legs. Proc. of the 2001 ICRA, pp.2299-2308.
- [18] KAJITA, S.; KANEHIRO, F.; KANEKO, K.; FUJIWARA, K.; HARADA, K.; YOKOI, K.; HIRUKAWA, H., 2003. Biped Walking Pattern Generation by using Preview Control of Zero-Moment Point. Proceedings of the 2003 IEEE, International Conference on Robotics & Automation. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Japan.
- [19] KAVRAKI, L. E.; LAVALLE, S. M. Springer Handbook of Robotics. Berlin. Heidelberg: Springer, 2008.
- [20] KOOLEN, T., 2011. Capturability-Based Analysis and Control of Legged Locomotion. Master’s Thesis. Delft University, the Netherlands.
- [21] MANCHESTER, I.R.; METTIN, U.; IIDA, F.; TEDRAKE, R., 2011. Stable Dynamic Walking Over Uneven Terrain Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.

- [22] MCGEER, T., 1990. Passive dynamic walking. Int. J. robotics res. Simon Fraser University, USA.
- [23] OGURA, Y.; SHIMOMURA, K.; KONDO, H.; MORISHIMA, A.; OKUBO, T.; MOMOKI, S.; LIM, H.; TAKANISHI, A., 2006. Human-like walking with kneestretched, heel-contact and toe-off motion by a humanoid robot. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 3976-3981 8. Waseda University, Japan.
- [24] RAIBERT, M.; BLANKESPOOR, K.; NELSON, G.; PLAYTER, R., 2008. BigDog, the Rough-Terrain Quaduped Robot. Boston Dynamics, USA.
- [25] SAKAGAMI, Y.; WATANABE, R.; AOYAMA, C.; MATSUNAGA, S.; HIGAKI, N.; FUJIMURA, K., 2002. The intelligent ASIMO: System overview and integration. Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2478-2483. Honda R&D Co. Ltda., Japan.
- [26] TOKYO UNIVERSITY, 2000. Perception-Action Integrated Humanoid Robot : H6 & H7. Disponível em <<http://www.jsk.t.u-tokyo.ac.jp/research/h6/>>. Último acesso em Dezembro de 2013.
- [27] UNIVERSITY OF TWENTE, 2006. Round belly robot runs more efficiently than a broad-shouldered robot. Disponível em <http://www.utwente.nl/alumni/actueel/nieuwsbrief/archief/nieuwsbrieven_2006/april%202006/ewi/0604ewi_02/>. Último acesso em Dezembro de 2013.
- [28] VAN HEERDEN, K. Robotics Corner, Learn Robotics, Biped, Trajectory Generation. Disponível em <<http://www.elysium-labs.com/robotics-corner/learn-robotics/biped-basics/trajectory-generation/>>. Último acesso em Novembro de 2013.
- [29] VUKOBRATOVIC, M.; JURICIC, D., 1969. Contribution to the Synthesis of Biped Gait. Biomedical Engineering, IEEE Transactions, Vol.BME-16, Issue 1. Institute Mihajlo Pupin, Serbia and Montenegro.
- [30] VUKOBRATOVIC, M.; BOROVAC, B., 2004. Zero-moment Point - Thirty Five Years of its Life. International Journal of Humanoid Robotics Vol. 1, No. 1 (2004) 157–173. Institute Mihajlo Pupin, Serbia and Montenegro.

- [31] WASEDA UNIVERSITY, 2008. Biped Humanoid Robot WABIAN-2R. Disponível em <<http://www.takanishi.mech.waseda.ac.jp/top/research/wabian/>>. Último acesso em Dezembro de 2013.
- [32] WIEBER, P.B., 2006. Trajectory Free Linear Model Predictive Control for Stable Walking in the Presence of Strong Perturbations. Humanoid Robots, 2006 6th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. INRIA Rhone-Alpes, France.
- [33] WINTER, D.A., 1990. Biomechanics and Motor Control of Human Movement. Second Edition. University of Waterloo. Waterloo, Ontario, Canada. A Wiley-Interscience Publication.
- [34] WISSE, M.; FELIKSDAL, G.; FRANKENHUYZEN, J.; MOYER, B., 2007. Passive-based walking robot-Denise, a simple, efficient, and lightweight biped. Delft University of Technology, The Netherlands.

Glossário

- *CM*: Centro de Massa.
- *CoP*: Center of Pressure.
- *DARPA*: Defense Advanced Research Projects Agency.
- *DRC*: DARPA Robotics Challenge.
- *DRCSIM*: DARPA Robotics Challenge Simulator.
- *FZMP*: Fictitious Zero-Moment Point.
- *GdL*: Graus de Liberdade.
- *IBGE*: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- *ZMP*: Zero-Moment Point.