

Controle de Estabilização de Caminhada de Robô Humanoide

Projeto de Pesquisa para Iniciação Científica
Departamento de Engenharia Mecânica-Aeronáutica
Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA

Beneficiário: Reynaldo Santos de Lima

Orientador: Marcos Ricardo Omena de Albuquerque Maximo

11 de dezembro de 2019

Resumo

Neste trabalho pretende-se aplicar adaptações em algoritmos de estabilização de caminhada em robô humanoide de baixo custo (ITAndroids Chape 2ª geração). Esse trabalho será realizado no Laboratório de Sistemas Computacionais Autônomos (LAB-SCA), onde existe um estudo de caminhada de robôs humanoide, Robotis OP2 e ITAndroids Chape. Em uma primeira etapa, será realizada um estudo das técnicas utilizadas previamente em estudos no LAB-SCA. Então, será estudado o código para projeto das malhas de controle de estabilização de caminhada a fim de adaptar o algoritmo para o robô Chape 2ª geração. A questão energética será abordada de tal maneira que uma nova geometria e novos materiais sejam utilizados para o desenvolvimento de um novo pé para o robô em operação permitindo realizar um rolamento natural semelhante ao que acontece na marcha humana. Para isso, primeiro será desenvolvido um simulador do novo pé robótico e depois um projeto mecânico do novo pé com forma otimizada, ou seja, um pé leve que mantenha sua rigidez e que permita o rolamento e amortecimento, diminuindo não só a energia gasta como também as forças de impacto. Para análise desse novo comportamento serão determinadas as forças de impacto por sensores de pressão. Em seguida, a fim de validar esse novo pé robótico será proposto um algoritmo de caminhada que considere esse rolamento que será implementado no robô.

1 Introdução, Justificativa e Síntese da Bibliografia Fundamental

No contexto da robótica móvel existem diversos problemas a serem abordados e um que se destaca é o estudo de robôs humanoides, especificamente a questão da caminhada. O estudo de robôs humanoides tem motivação na movimentação de robôs por terrenos irregulares, destacando-se que os ambientes desenvolvidos pelo homem são propícios para bípedes. Desse modo, por mais que o controle de robôs com rodas seja mais simples e demonstrem alta eficiência, o movimento é limitado a terrenos planos, sendo uma solução para o problema a caminhada de robôs com pernas.

Dos movimentos de robôs pernados, o movimento bípede do humanoide é de fundamental interesse exatamente pela proximidade ao movimento do ser humano. Esse movimento é uma ação complexa do ponto de vista de controle, devido às não linearidades, a subatuação e de ter alta dimensão dinâmica, ou seja, muitos graus de liberdade. Representando um grande desafio às técnicas de controle de última geração [1].

Uma primeira questão a ser analisada é a estabilidade estática dos bípedes é assegurada pela projeção de centro de massa (CM) no solo dentro de um polígono de suporte, definido na Literatura como a envoltória convexa dos pontos de contato no solo. Consequentemente, na estática, as forças de reação do solo atuam na vertical no ponto que equivale à projeção do CM para equilibrar as forças e momentos gerados pela gravidade, sendo o centro de pressão (CP) o ponto resultante das forças de reação.

Para desenvolver uma caminhada estável e rápida em robôs bípedes é necessário considerar os efeitos dinâmicos sobre o CP. Um conceito popular nesse contexto utilizado é o Zero Moment Point (ZMP), que pode ser encarado como o ponto no solo onde as forças de reação devem atuar para estabilizar o mecanismo bípede [2] assim, quando o ZMP estiver dentro do polígono de suporte, este coincide com o CP.

Quando em regime dinâmico o CM e o CP não coincidem, mas a aceleração do corpo auxilia na obtenção do equilíbrio. Por isso, na prática, para preservar a estabilidade

basta delinear o movimento de maneira que o ZMP esteja sempre dentro do polígono de suporte. Na marcha há sempre um pé em contato com o solo em algum momento da caminhada e isso auxilia na transição para o apoio seguinte.

Como robôs humanoides têm muitos graus de liberdade e sua dinâmica é não linear, o movimento se torna complexo por isso são usados modelos de ordem reduzida. Por exemplo, com o 3D Linear Inverted Pendulum Model (3D-LIPM)[3] pode se obter a trajetória do CM e depois, por cinemática inversa, determinar os ângulos das juntas durante a caminhada. Por causa das simplificações do modelo, frequentemente usam-se estratégias de realimentação e compensação de erro de dinâmica para o robô ter estabilidade [4].

O que torna o robô humanoide tão atrativo é o fato de haver semelhança física com o ser humano, facilitando a interação com ferramentas e ambientes desenvolvidos para o uso humano. Por outro lado, os critérios exigidos na modelagem da caminhada de humanoide são altamente restritivos quanto à estabilidade. Os critérios utilizados mais corriqueiramente tratam da estabilidade local da caminhada, isto é, observa-se as condições de estabilidade para o estado atual do robô a cada passo, não para a caminhada como um todo, como é o caso do próprio ZMP.

O fato da análise de estabilidade ser tratada localmente tornam os critérios estabelecidos super restritivos, produzindo um movimento de caminhada muito aquém do melhor movimento quanto ao aproveitamento energético. Para comparação, estima-se que o robô ASIMO utiliza 10 vezes mais energia que um ser humano para caminhar. [checar referência DOC manga, TEDRAKE 2004. REF \[6\] da proposta manga.](#)

Existem outros critérios mais gerais, como o "caminhada em ciclo limite", ([checar ref, HOBBELEN](#)) que estabelecem movimentos instáveis a cada passo mas estáveis num ciclo completo de caminhada. Isto é, o ZMP deixa o polígono de suporte, acelerações angulares são geradas, mas movimentos posteriores a esse momento instável permitem que a caminhada continue. Este tipo de movimento exige uma análise de todo o percurso a ser tomado, tornando a execução pouco praticável.

Com as limitações expostas e ao observar os resultados obtidos com sucesso na prática

([checar ref TEDRAKE, 2004](#)), caminhadas baseadas no critério ZMP mostraram-se como estado-da-arte, sendo o critério escolhido para estabilização de caminhada.

O grupo de pesquisa do Laboratório de Sistemas Computacionais Autônomos (LAB-SCA) do ITA tem desenvolvido estudos na área de caminhada de robôs humanoides[5]–[9]. No trabalho mais recente [9], investigaram-se formulações baseadas em Controle Preditivo que permitem ao robô decidir a trajetória do CM, as posições dos pés e durações dos passos.

Na figura 1 a) pode ser visto um robô humanoide Robotis OP2 com o qual o grupo iniciou seus estudos em caminhada [ref Protocolo FAPESP?](#); na Figura 1 b) observa-se o robô ITAndroids Chape 1ª geração, robô humanoide desenvolvido pelo LAB-SCA. Com os trabalhos desenvolvidos, faz-se essencial o desenvolvimento contínuo do projeto das malhas de controle de estabilização de caminhada.

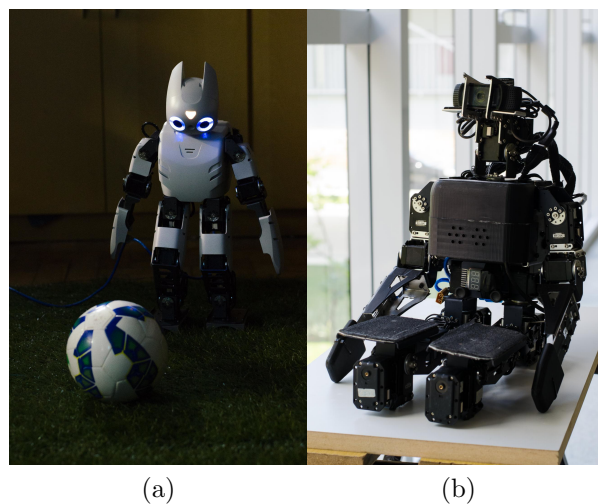


Figura 1: Modelo de robôs humanóides do LAB-SCA, a) Robotis OP2 b) Chape.

De modo geral, o movimento periódico da caminhada é resolvido em termos de controle com uma sequência de algoritmos que formam uma malha de controle fechada. Uma visão geral da arquitetura da malha de controle pode ser vista na Figura ???. Tem-se como entrada um vetor de velocidade omnidirecional desejado, para ser gerado no *Step Planner*, planejador de passos, as posições e tempos da marcha. Com o planejamento definido, utiliza-se um algoritmo gerador de trajetórias baseado na posição do ZMP de

acordo com o pé de apoio (bloco *ZMP Trajectory Generator*). Planeja-se ainda a trajetória do centro de massa (com retorno de sensores sobre posição, velocidade e aceleração para o controle) e do pé "flutuante", aquele não em contato com o solo no passo, a fim de definir totalmente as trajetórias a ser cumpridas.

Solucionado o movimento desejado, entra o algoritmo *Inverse Kinematics Solver*, solucionador inverso de cinemática, que orienta as posições desejadas nos membros e juntas do robô (orientados por servo-motores). Além de resolver a cinemática, fazem-se necessários ainda dois passos na malha de controle, representados por *Gravity Compensator*, compensador de gravidade, e *Torso Orientation Compensator*, compensador de orientação do torso.

A necessidade do compensador de gravidade surge da atuação de torques indesejados nas juntas do robô causados pela aceleração da gravidade e é implementado em momentos de suporte único no passo (isto é, quando o robô tem uma perna suporte e outra livre de contato com o solo). Já o compensador de orientação do torso surge principalmente de erros de medidas ou de perturbações externas e é implementado com um algoritmo que observa a posição do torso em cada passo utilizando Filtro de Kalman para o tratamento dos dados oriundos dos sensores. [encher de referências](#).

Essas formulações demonstraram expandir consideravelmente a margem de tolerância e perturbações do robô (i.e. o robô é capaz de tomar empurrões muito mais fortes sem cair) em comparação a uma formulação do estado da arte que trabalha com duração fixa de passo [10]. Essa característica foi comprovada tanto em simulações simplificadas usando o consagrado modelo de pêndulo invertido [3] para modelar o robô, quanto no simulador de robótica Gazebo, onde foi utilizado um modelo de simulação realista do robô humanoide Robotis OP2, desenvolvido pelo grupo a partir de dados do fabricante e de resultados de ensaios com os atuadores [7].

O embasamento matemático dos métodos propostos será apresentado a seguir:

1.1 Preview Control of ZMP

O *Preview Control of Zero-Moment Point* é um método seminalítico de controle de caminhada bípede baseado em *Model Predictive Control* (MPC) [24]. Não apenas esse método foi implementado em vários robôs humanoides [25], mas também serve de base para técnicas no estado da arte [9], [26]. Além disso, o LAB-SCA tem experiência no uso desse tipo de algoritmo de caminhada [5], [9], de modo que o *Preview Control of ZMP* será um ponto de partida para esse trabalho. Nessa subseção, apresentar-se-á uma introdução teórica a esse método.

A inspiração para o uso de MPC advém do fato de que, durante a caminhada, mudanças instantâneas ocorrem no polígono de suporte devido aos pés do robô fazerem e quebrarem contato com o chão. Com isso, é interessante que o controlador de caminhada antecipe a referência futura de ZMP ao mover o ZMP antes que uma mudança repentina de polígono de suporte aconteça.

Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC) é uma abordagem moderna de controle ótimo em que o comportamento futuro do sistema dinâmico é previsto através da integração de um modelo matemático. A seguir, deduz-se as equações apenas para o eixo de coordenadas x , dado que estendê-las para o eixo y é trivial.

Primeiramente, considere controle direto sobre a sobre-aceleração (i.e. derivada da aceleração) do CM do robô \ddot{x} , então a evolução temporal do CM é ditada pela Cinemática. Assumindo-se a hipótese de seguidor de ordem zero sobre um passo de tempo de duração T , pode-se obter o seguinte modelo de tempo discreto para a dinâmica do CM:

$$\mathbf{x}[k+1] = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}[k] + \begin{bmatrix} T^3/6 \\ T^2/2 \\ T \end{bmatrix} \ddot{x}[k], \quad (1)$$

em que $\mathbf{x}[k] = [x[k] \ \dot{x}[k] \ \ddot{x}[k]]^T$. Além disso, se a altura do CM h é mantida constante e a variação do momento angular é ignorada, a dinâmica do ZMP segue o conhecido modelo

de pêndulo invertido [3]:

$$z_x[k] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -h/g \end{bmatrix} \mathbf{x}[k], \quad (2)$$

em que g é a aceleração da gravidade. A predição do comportamento futuro do sistema em um horizonte de N passos de tempo, dada uma sequência de comandos $\ddot{\mathbf{X}}[k] = [\ddot{x}[k|k] \ \cdots \ \ddot{x}[k+N-1|k]]^T$, pode ser obtida por:

$$\mathbf{X}[k] = \begin{bmatrix} x[k+1|k] \\ \vdots \\ x[k+N|k] \end{bmatrix} = \mathbf{P}_{ps}\mathbf{x}[k] + \mathbf{P}_{pu}\ddot{\mathbf{X}}[k], \quad \dot{\mathbf{X}}[k] = \begin{bmatrix} \dot{x}[k+1|k] \\ \vdots \\ \dot{x}[k+N|k] \end{bmatrix} = \mathbf{P}_{vs}\mathbf{x}[k] + \mathbf{P}_{vu}\ddot{\mathbf{X}}[k], \quad (3)$$

$$\ddot{\mathbf{X}}[k] = \begin{bmatrix} \ddot{x}[k+1|k] \\ \vdots \\ \ddot{x}[k+N|k] \end{bmatrix} = \mathbf{P}_{as}\mathbf{x}[k] + \mathbf{P}_{au}\ddot{\mathbf{X}}[k], \quad \mathbf{Z}_x[k] = \begin{bmatrix} z_x[k+1|k] \\ \vdots \\ z_x[k+N|k] \end{bmatrix} = \mathbf{P}_{zs}\mathbf{x}[k] + \mathbf{P}_{zu}\ddot{\mathbf{X}}[k], \quad (4)$$

em que as matrizes \mathbf{P}_{ps} , \mathbf{P}_{pu} , \mathbf{P}_{vs} , \mathbf{P}_{vu} , \mathbf{P}_{as} , \mathbf{P}_{au} , \mathbf{P}_{zs} , e \mathbf{P}_{zu} podem ser determinadas usando as equações (1) e (2). Assim, rastreia-se uma trajetória futura de ZMP de referência sobre um horizonte através do uso da seguinte função de custo:

$$J(\ddot{\mathbf{X}}[k]) = \frac{\alpha}{2} \|\ddot{\mathbf{X}}[k]\|^2 + \frac{\gamma}{2} \|\mathbf{Z}_{r,x}[k] - \mathbf{Z}_x[k]\|^2, \quad (5)$$

em que os pesos α e γ penalizam o uso de sobre-aceleração e o erro de rastreamento de ZMP, respectivamente. Além disso, $\mathbf{Z}_{r,x}[k]$ é a trajetória de referência de ZMP no eixo x , i.e. $\mathbf{Z}_{r,x}[k] = [z_{r,x}[k+1] \ \cdots \ z_{r,x}[k+N]]^T$.

Para o máximo de estabilidade, o artigo original sugere escolher uma referência de ZMP poligonal que mantém o ZMP no meio do pé de suporte durante suporte simples e move o ZMP entre os pés durante suporte duplo [24]. A hipótese implícita aqui é que o rastreamento de ZMP é bom o suficiente para manter o ZMP sempre dentro do polígono de suporte, como exigido pelo critério de estabilidade de ZMP [2]. Porém, outro tipo de referência é mais interessante caso deseje-se reduzir consumo energético, conforme já

explorado por pesquisadores do LAB-SCA [5].

O algoritmo é usado em conjunto com um planejador de passos que escolhe as posições dos pés de acordo com um objetivo de alto nível. A trajetória de sobre-aceleração é obtida através da solução do problema de otimização definido pela função de custo (5), o qual possui solução analítica:

$$\ddot{\mathbf{X}}[k] = \left(\mathbf{P}_{zu}^T \mathbf{P}_{zu} + \frac{\alpha}{\gamma} \mathbf{I}_N \right)^{-1} \mathbf{P}_{zu}^T (\mathbf{Z}_{r,x} - \mathbf{P}_{zs} \mathbf{x}[k]), \quad (6)$$

em que \mathbf{I}_N representa a matriz identidade de tamanho N . Como não é possível controlar diretamente sobre-aceleração em um robô com atuadores de posição, como o Robotis OP2, é necessário reconstruir a trajetória de CM usando (3). Para mais informações sobre como implementar essa técnica em um robô real, sugere-se ler [9].

Um ponto que se deve destacar é que esse método se baseia no consagrado 3D-LIPM [3], que mantém a altura do CM constante para resultar numa dinâmica linear. Entretanto, alguns pesquisadores tem explorado prescrever uma trajetória para a altura do CM [27], de modo que o algoritmo de controle deve lidar com uma dinâmica linear variante no tempo:

$$z_x[k] = x[k] - \frac{h}{\ddot{z}_{r,CM}[k] + g} \ddot{x}[k] \quad (7)$$

em que $\ddot{z}_{r,CM}[k]$ é a trajetória prescrita para a altura do CM. Conforme descrito em [27], uma formulação de MPC sem restrições lida facilmente com esse tipo de dinâmica. Nesse trabalho, pretende-se explorar a melhoria da eficiência energética da caminhada obtida com a variação da altura do CM, juntamente com o rolamento do pé, que será abordado na próxima subseção. Ambas características estão presentes na caminhada humana.

1.2 Análise da MAT de estabilidade com o manga

Para uma análise de energia que considera a nova forma geométrica dos pés robótico, propõe-se usar o método proposto em [28]. Na figura 3, é exemplificada o efeito de variação de raio ρ e comprimento l de um pé em forma de arco, em um modelo de

caminhada simples.

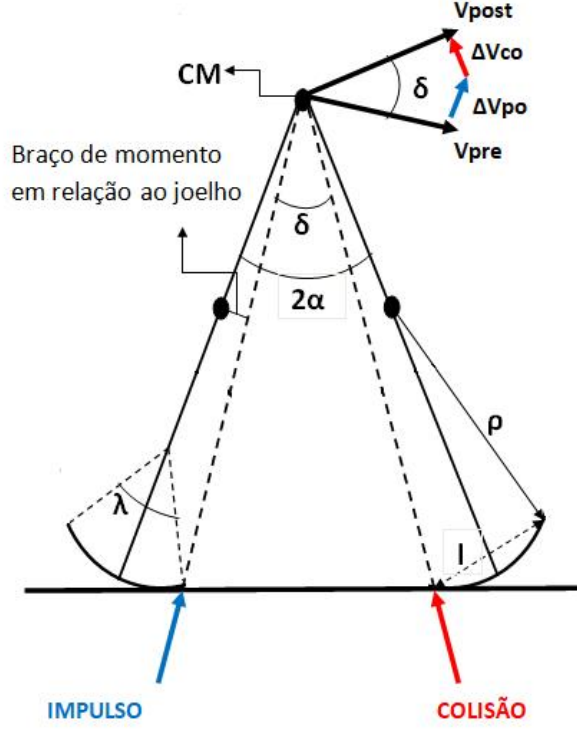


Figura 2: Modelo de caminhada.

Na figura 3 para a transição dos passos é considerado como trabalho positivo o impulso e trabalho negativo a colisão, para redirecionar a velocidade CM. O redirecionamento (representado pelo ângulo δ) é determinado pela distância entre os pontos de contato do solo para os dois arcos.

Para um valor maior de redirecionamento do CM é necessário mais trabalho (mais energia). A mudança de velocidade devido ao impulso e a colisão são mostrados como Δv_{PO} e Δv_{CO} , respectivamente.

Mantendo constante o comprimento do passo, determina-se tanto o ângulo entre as pernas (2α) quanto o ângulo mínimo de redirecionamento (δ). Os impulsos redirecionam o CM com uma velocidade de pré transição (v_{pre}) para a velocidade de meio transição (v_{mid}), já a colisão redireciona o CM com uma velocidade de pós transição (v_{post}).

Sendo o comprimento do pé dado pela relação $l=2\rho\sin(\lambda/2)$, onde λ é o ângulo do arco do pé. Para encontrar δ , usa-se a relação:

$$\tan \frac{\delta}{2} = \frac{\rho \sin(\alpha - \frac{\lambda}{2}) + (1 - \rho) \sin \alpha}{\rho \cos(\alpha - \frac{\lambda}{2}) + (1 - \rho) \cos \alpha} \approx \alpha - \frac{l}{2} \quad (8)$$

Para a marcha se manter estável a magnitude do trabalho da colisão deve ser igual a do trabalho do impulso, encontrado por:

$$W = \frac{1}{2}M(v_{mid})^2 - \frac{1}{2}M(v_{post})^2 = \frac{1}{2}M(v_{post})^2 \tan^2 \frac{\delta}{2} \quad (9)$$

$$W \approx \frac{1}{2}M(v_{post})^2 (\alpha - \frac{l}{2})^2 \quad (10)$$

2 Objetivos

Conforme apresentado anteriormente, no estágio atual da pesquisa de robôs humanoides, para obter a estabilidade desejada frente a fatores do mundo real para um robô humanoide, dispõe-se principalmente de uma malha de controle baseada em um sistema PD, além de um sistema de modelagem com parâmetros bem ajustados.

Este trabalho irá desenvolver a modelagem do robô Chape 2ª geração segundo o ajuste de seus parâmetros para aplicação destes na malha de controle de estabilização. Serão realizados ainda adaptações nos algoritmos de estabilização já desenvolvidos pelo laboratório LAB-SCA, com o objetivo de tornar a caminhada do novo robô humanoide.

Para isso, segue os seguintes objetivos específicos:

1. Identificar, a partir do modelo do Robô ITAndroids Chape 2ª geração, os parâmetros da malha de controle de estabilização.
2. Adaptar a malha de controle de estabilização da caminhada para novo robô humanoide Chape 2ª geração.
3. Ajustar ganhos para melhor funcionamento da malha no robô real.

Finalmente, como objetivo institucional busca-se o fortalecimento da equipe de robótica do ITA, ITAndroids, cujos trabalhos na categoria humanoide são relacionados ao laboratório LAB-SCA e geram expressivos resultados a nível mundial, como na competição mundial de robótica, Robocup. Espera-se que o trabalho fomente continuidade no desenvolvimento da pesquisa na área de caminhada, pelo menos em um trabalho de conclusão de curso.

Também espera-se a publicação dos temas: identificação de robô humanoide, projeto mecânico do pé com rolamento, caminhada do robô humanoide com rolamento e instrumentação do pé.

Pretende-se a publicação nas seguintes conferências:

- International Congress of Mechanical Engineering (COBEM);
- Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM);
- International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics (DINAME);
- Ibero Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CI-LAMCE);
- Latin American Robotics Symposium (LARS);
- IEEE RAS Internacional Conference on Humanoids Robots(HUMANOIDS);
- International Conference on Robotics and Automation (ICRA);
- International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS).

Pretende-se publicação nos seguintes periódicos:

- Journal Of Mechanisms and Robotics (Qualis B1 engenharias III);
- Journal of Intelligent & Robotics Systems (Qualis B1 engenharias III);
- IEEE/ASME Transactions on Mechatronics (Qualis A1 engenharias III).

3 Plano de trabalho

- A. Revisão bibliográfica;
- B. Utilizar a técnica de cinemetria nos robôs do LAB-SCA para refinamento de parâmetros;
- C. Elaboração de algoritmo que permite rolamento do pé;
- D. Verificação em simulação da proposta de algoritmo de caminhada;
- E. Projeto mecânico do pé e fabricação;
- F. Implementação do algoritmo no robô;
- G. Cinemetria com o novo pé;

H. Redação /defesa do exame de qualificação;

I. Instrumentação;

J. Testes e análises de resultados;

K. Redação/defesa da tese.

Tabela 1: Cronograma de atividades detalhado.

Semestre	Atividade										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1											
2											
3											
4											
5											
6											

4 Material e métodos

Para a execução do projeto proposto são necessários os seguintes recursos materiais:

1. O robô humanoide (Robotis OP2) comprado pelo projeto FAPESP 2016/03647-3, utilizado na tese de doutorado [9];

2. Acesso ao LAB-SCA (Laboratório de Sistemas de Controle autônomos), o qual contribuirá com equipamentos de confecção.

3. Acesso ao LBRSC (Laboratório de Biomecânica, Robótica e Simulação Computacional), o qual contribuirá com a Cinemetria.

4. Licença do software Matlab, obtido pelo projeto FAPESP 2016/03647-3.

5. Modelo de simulação do Darwin desenvolvido na tese de doutorado dentro do contexto do projeto FAPESP 2016/03647-3.

6. Biblioteca com acesso eletrônico aos periódicos de interesse nas áreas da proposta.

A metodologia seguida neste trabalho consiste em uma primeira etapa de experimentos para identificação de parâmetros de um robô Robotis OP2, para o qual existe um modelo de caminhada em um simulador.

Após isso propõe-se um novo modelo de caminhada que considerará o rolamento, com a construção de um novo pé. Posteriormente, serão feitas simulações dinâmicas tanto para validação do dispositivo construído quanto para a caminhada. Por fim, a implementação desse dispositivo no humanoide Robotis OP2.

5 Forma de análise dos resultados

Pretende-se aproveitar a experiência da instituição em identificação [29], a partir disso os dados obtidos por Cinemetria e Dinamometria serão analisados por algum método de identificação na abordagem amostrada por [30], [31].

No projeto mecânico do pé robótico será verificado a resistência mecânica de cada componente considerando um carregamento estático. Para as forças dinâmicas será realizada uma análise modal, utilizando o método de elementos finitos.

A caminhada com o novo pé será analisada por um simulador, por experiência do LAB-SCA pretende utilizar o simulador Gazebo que atualmente é usado para o modelo de simulação do Robotis OP2.

O uso de simulação será usado numa etapa preliminar de resultados, além disso possui vantagens por fornecer diversos dados que são dificilmente extraídos de um experimento real. Como as forças e torques de todos os componentes do robô.

Essas informações são essenciais para uma avaliação precisa do consumo energético, de modo a validar o aumento da eficiência energética da caminhada proposta.

Posteriormente, o experimento da cinemetria será repetido para a caminhada que utiliza os pés curvos, para uma validação experimental do algoritmo e do dispositivo desenvolvidos neste trabalho.

Inicialmente a instrumentação do pé será validada em bancada, posteriormente o pé sensoriado será integrado no robô e será realizados novos experimentos com esse pé.

Referências

- [1] S. H. Collins, A. Ruina, R. Tedrake e M. Wisse, “Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers”, *Science*, vol. 307, n.º 5712, pp. 1082 –1085, 2005.
- [2] M. Vukobratović e B. Borovac, “Zero-Moment Point – Thirty Five Years of Its Life”, *Int. J. Humanoid Robots*, vol. 1, n.º 1, pp. 157 –173, 2004.
- [3] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Yokoi e H. Hirukawa, “The 3D Linear Inverted Pendulum Mode: A simple modeling for a biped walking pattern generation”, em *Proc. Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, Maui, EUA, 2001, pp. 239 – 246.
- [4] T. Takenaka, T. Matsumoto e T. Yoshiike, “Real Time Motion Generation and Control for Biped Robot -1st Report: Walking Gait Pattern Generation”, em *Proc. Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, St. Louis, EUA, 2009, pp. 1084 –1091.
- [5] M. R.O. A. Maximo, C. H. C. Ribeiro e R. J. M. Afonso, “Reference zmp manipulation for energetic and computationally efficient walking using zmp preview control”, em *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, Porto Alegre, Brasil, 2017.
- [6] M. R.O. A. Maximo, C. H. C. Ribeiro e R. J. Afonso, “Mixed integer programming for automatic walking step duration”, em *Proc. Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, Daejeon, Coréia, 2016, pp. 5399–5404.
- [7] M. R.O. A. Maximo, C. H. C. Ribeiro e R. J. M. Afonso, “Modeling of a position servo used in robotics applications”, em *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, Porto Alegre, Brasil, 2017.
- [8] M. R. Maximo, E. L. Colombini e C. H. Ribeiro, “Stable and fast model-free walk with arms movement for humanoid robots”, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 14, n.º 3, pp. 1–10, 2017.

- [9] M. Maximo, “Automatic walking step duration through model predictive control”, Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2017.
- [10] A. H. ande H. Diedam, D. D. P.-B. Wieber, K. Mombaur e M. Diehl, “Online walking motion generation with automatic foot step placement”, *Advanced Robotics*, vol. 24, n.º 5–6, 2010.
- [11] T. Buschmann, S. Lohmeier, H. Ulbrich e F. Pfeiffer, “Dynamics Simulation for a Biped Robot: Modeling and Experimental Verification”, em *Proc. Int. Conf. Robotics and Automation*, Orlando, EUA, 2006, pp. 2673 –2678.
- [12] C. C. D. da Silva, L. H. M. Duque e J. P. de Gouvêa, “Modelo para representar o comportamento de um polímero de caráter não linear”, em *Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, Salvador, Brasil, 2018.
- [13] G. D. Magistris, A. Pajon, S. Miossec e A. Kheddar, “Humanoid walking with compliant soles using a deformation estimator”, em *Proc. Int. Conf. Robotics and Automation*, Estocolmo, Suécia, 2016, pp. 1757 –1762.
- [14] W. Choi, G. A. Medrano-Cerda, D. G. Caldwell e N. G. Tsagarakis, “Design of a Variable Compliant Humanoid Foot with a New Toe Mechanism”, em *Proc. Int. Conf. Robotics and Automation*, Estocolmo, Suécia, 2016, pp. 642 –647.
- [15] J. E. Leu, Y.-H. Chen, S.-T. Liu e W.-P. Shih, “Development of a Humanoid Robot Foot with Distributive Force Sensors”, em *Proc. Int. Conf. Control, Automation and Robotics*, Nagoya, Japão, 2017, pp. 134 –137.
- [16] Seung-Joon e D. D. Lee, “Heel and Toe Lifting Walk Controller for Resource Constrained Humanoid Robots”, em *Proc. Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, Daejeon, Coréia, 2016, pp. 5452 –5458.
- [17] J. Alves, E. Seabra, C. Ferreira, C. P.Santos e L. P. Reis, “Design and dynamic modelling of an ankle-foot prosthesis for humanoid robot”, em *Proc. Int. Conf. Autonomous Robot Systems and Competitions*, Coimbra, Portugal, 2017, pp. 128 –133.

- [18] J. C. Morenoa, F. Brunettia, E. Navarrob, A. Forner-Cordero e J. L. Ponsa, “Analysis of the human interaction with a wearable lower-limb exoskeleton”, *Applied Bionics and Biomechanics*, vol. 6, n.º 2, pp. 245–256, 2009.
- [19] L. M. Lessa, “ Análise do impacto durante a marcha para o desenvolvimento de uma prótese para amputados unilateral de membro inferior ”, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, 2017.
- [20] A. C. M. Maffra, C. C. D. da Silva, B. T.J. D. de Sousa, D. de Avila, G. R. Baumgardt, R. S. Nascimento, T. R. Rebelo, L. H. M. Duque e J. P. de Gouvêa, “Análise cinemática do membro superior humano durante a marcha através do modelo multicorpos”, em *Safety, Health and Environment World Congress*, Vila Real, Portugal, 2017, pp. 177 –181.
- [21] G. V. de Souza, “ Geração de MDT usando um triplet de imagem de alos e transformação linear direta (DLT) ”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2011.
- [22] C. C. D. da Silva, “ Simulação dinâmica de um pé protético considerando rolamento e deformação de contato ”, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, 2018.
- [23] R. L. Tedrake, “Applied Optimal Control for Dynamically Stable Legged Locomotion”, Tese de Doutorado, Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [24] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi e H. Hirukawa, “Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point”, em *International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, 2003, pp. 1620–1626.
- [25] S. J. Yi, S. McGill, D. Hong e D. Lee, “Hierarchical Motion Control for a Team of Humanoid Soccer Robots”, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 13, n.º 1, p. 32, 2016.

- [26] A. Herdt, H. Diedam, P. B. Wieber, D. Dimitrov, K. Mombaur e M. Diehl, “On-line Walking Motion Generation with Automatic Footstep Placement”, *Advanced Robotics*, vol. 24, n.º 5-6, pp. 719–737, 2010.
- [27] A. Herdt, N. Perrin e P. B. Wieber, “LMPC based online generation of more efficient walking motions.”, em *Humanoids*, IEEE, 2012, pp. 390–395.
- [28] P. G. Adamczyk e A. D. Kuo, “Mechanical and energetic consequences of rolling foot shape in human walking”, *The Journal of Experimental Biology*, vol. 216, pp. 2722–2731, 2013.
- [29] J. A. B. Gripp, F. L. M. Santos, C. R. Bernardo e L. C. S. Góes, “ Modeling and Identification of a Two Link Flexible Manipulator”, em *Brazilian Congress of Mechanical Engineering*, Natal, Brasil, 2011.
- [30] P. van Zutven, “Control and Identification of Bipedal Humanoid Robots: Stability Analysis and Experiments”, Tese de Doutorado, Eindhoven University of Technology, 2014.
- [31] J. C. A. Reggeti, “Parameter Identification and Modeling of Contact Properties”, Tese de Doutorado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 2017.