

Controlo de um Robô Bípede com base em sensores de força nos pés

João Paulo Ferreira⁽¹⁾
Manuel Crisóstomo⁽²⁾ A. Paulo Coimbra⁽²⁾

(1) Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Departamento de Engenharia Electrotécnica
R. Pedro Nunes, 3030-199 Coimbra, Portugal

(2) Instituto de Sistemas e Robótica, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Universidade de Coimbra, Polo 2, 3030-290 Coimbra, Portugal
ferreira@mail.isec.pt, mcris@isr.uc.pt, acoimbra@deec.uc.pt

Resumo: Este artigo descreve o controlo de um robô bípede que usa para o seu equilíbrio o movimento do tronco. O projecto possui características inovadoras, nomeadamente ao nível da autonomia, tornando-se importante a ausência de ligações físicas entre o robô e o PC de supervisão, havendo um sistema de transmissão rádio e alimentação por baterias.

Neste trabalho é proposto um método que consiste no equilíbrio dos “gaits” através da correcção do ângulo lateral e longitudinal de um pêndulo. Este método apresenta três fases. Primeiro, é gerada a trajectória do pé em movimento; segundo, recorrendo a uma “spline”, um polinómio de interpolação de 3º ordem, obtêm-se as acelerações lineares e angulares das trajectórias das 8 partes do robô bípede; e, por último, é calculado o ZMP (ponto de momento nulo) como parâmetro de verificação da margem de estabilidade pretendida. Caso não se verifique este critério é realizada a compensação por correcção do ângulo lateral e longitudinal do pêndulo.

De modo a permitir um controlo em tempo real obtém-se o valor do ZMP através de 4 sensores de força em cada pé. Usando controlo Neuro-Difuso pretende-se assegurar a estabilidade do robô, mesmo que existam perturbações internas ou externas ao sistema.

Palavras-chave: robô bípede, robótica, estabilidade, dinâmico, estático, controlo Neuro-Difuso.

1. Introdução

Durante os últimos anos, na área da robótica bípede, os principais progressos foram feitos a nível da construção e estabilização da locomoção. A locomoção em ambientes não estruturados requer a habilidade do robô bípede de adaptar o seu padrão de locomoção de acordo com a situação presente, de forma a que os obstáculos que se apresentam no seu caminho possam ser ultrapassados.

Normalmente, o problema de executar um “gait” estável é resolvido por pré-computação de uma trajectória de referência adequada. Como consequência da não linearidade e da elevada complexidade do sistema, não é possível alcançar a resolução em tempo real. Uma possível solução é armazenar uma série de “gaits” obtidos off-line com parâmetros de “gait” diferentes num

banco de dados. Estas trajectórias satisfazem o ZMP de modo a assegurar a estabilidade do robô bípede.

De modo a possibilitar um controlo em tempo real do robô bípede, utiliza-se o controlo Neuro-Difuso, pois este controlo não tem a necessidade de ter constantemente em linha de conta o modelo dinâmico do robô. Sendo assim, o robô bípede será capaz de se adaptar a ambientes estruturados e não estruturados. Para além do controlo é imperativo que o planeamento de trajectórias possua vários tipos de movimentos versáteis do robô para possibilitar a adaptação a contingências, como sejam a locomoção em planos inclinados ou irregulares e forças externas.

1.1 Estado do conhecimento

O estudo de robôs bípedes tem despertado o interesse da comunidade científica, devido à sua melhor mobilidade em terrenos hostis, caracterizados por obstáculos e planos inclinados.

Vukobratovic [1], um investigador muito conhecido na área da robótica bípede, propôs um modelo matemático e o seu método de controlo. Zerrugh [2] investigou o “gait” do bípede recorrendo a dados da cinemática humana. Mcgeer [3] apresentou um padrão de locomoção gerado por uma acção passiva da gravidade e de inércia numa rampa inclinada descendente.

Com o objectivo de estender a aplicação do método “Energy-Optimal Walking” à locomoção ascendente em rampas, Rostomi [4] e Roussel [5] propuseram métodos de geração de “gaits” através da minimização do consumo de energia. No entanto, as investigações desenvolvidas não consideram a estabilidade do robô. Como o robô bípede é facilmente derrubável, é necessário ter em linha de conta a estabilidade para a determinação do passo. Zheng [6] propôs um método de síntese do “gait” contemplando a estabilidade estática. Chevalleireau [7] levantou a discussão acerca da estabilidade dinâmica através da análise da força de reacção entre a base do pé e o solo; infelizmente a

trajectória referência definida não assegura que a restrição de estabilidade seja satisfeita.

Para assegurar a estabilidade dinâmica num robô bípede, Shin [8] e Hirose [9] propuseram métodos síntese padrão do “gait” baseado no ZMP [10]. Basicamente este método contempla duas etapas:

1. Projecto da trajectória ZMP desejada;
2. Correção do movimento do torso e do pêndulo para concretizar a trajectória definida.

Dado que a mudança do ZMP devido ao movimento do torso e pêndulo estão limitados, nem todas as trajectórias ZMP desejadas serão realizáveis [11]. Além disso, para concretizar a trajectória do ZMP desejado, o movimento do torso e pêndulo podem variar radicalmente. Como o torso do robô bípede é relativamente volumoso, o consumo de energia aumentará. Então, tanto a estabilidade do robô como a suavidade do movimento do torso passam a ser dois aspectos a ter em consideração.

Para que o robô bípede seja capaz de se adaptar a diferentes características do solo, como a inclinação, rugosidade e obstáculos, é imperativo que ele possua vários tipos de movimentos do pé. Por exemplo, é desejável que o robô bípede possa erguer os pés a uma altura suficiente que lhe permita vencer os obstáculos.

1.2 Robô concebido

A estrutura mecânica do robô apresentado neste artigo [13] é simples visto que tem apenas as articulações principais da anca, joelho, e tornozelo, para cada perna. Existe uma outra articulação, o pêndulo invertido activo que é usado para equilibrar a estrutura.

O robô possui 7 servo motores, a estrutura é feita de acrílico e alumínio, com 1.7 Kg de peso e 50 cm de altura.

A Figura 1 apresenta o robô implementado, que foi totalmente projectado e construído no Instituto de Sistemas e Robótica, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Universidade de Coimbra.



Fig. 1. Robô implementado.

O robô foi projectado para se deslocar em planos horizontais e inclinados, subir e descer degraus, tendo uma velocidade de passo de aproximadamente 5 cm/s.

O projecto possui características inovadoras, nomeadamente ao nível de autonomia, tornando-se importante a existência de um meio de transmissão que ligue o software à estrutura física do robô de uma forma eficaz e sem ligações físicas. Para isso utiliza-se a transmissão radio e alimentação por pilhas, acoplada ao robô.

O robô tem localizados nas plantas dos pés uma matriz de sensores de força, que lhe permite calcular o ZMP real, de modo a possibilitar o controlo em malha fechada com um controlador Neuro-Difuso.

A figura 2 mostra o diagrama simplificado do fluxo de dados entre os vários componentes do sistema.

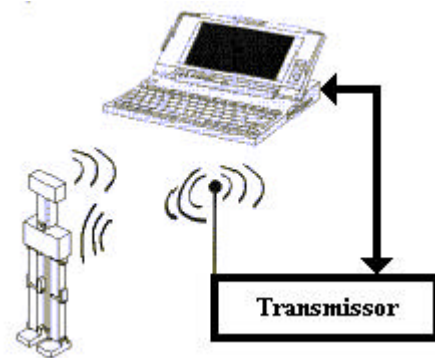


Fig. 2. Principais componentes do sistema.

2. Cinemática

No âmbito da robótica, a cinemática estuda o problema da posição, velocidade e aceleração de um corpo, aplicado a manipuladores, pernas e, mais genericamente, robôs.

Podem dizer-se que a modelação cinemática permite a descrição do movimento de um robô em termos da sua posição, velocidade e aceleração. A cinemática abstrai-se totalmente dos conceitos de massa, inércia e força ignorando-os. O formalismo mais usado para este problema é o método de Denavit-Hartenberg. Os sistemas de eixos adoptados para modelizar o robô bípede são os que se apresentam na figura 3.

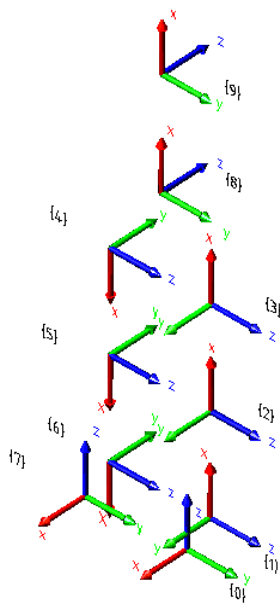


Fig. 3. Modelo dos sistemas de eixos.

3. Dinâmica

A dinâmica é o campo da física que estuda a aplicação de sistemas de forças e momentos a um corpo rígido. No caso do robô bípede uma formulação pode ser utilizada [12], é a que é baseada no cálculo do ZMP (“Zero Moment Point”) através do sistema dinâmico ou estático, sendo ambos utilizados neste trabalho.

Devido à complexidade que a modelização de robôs bípedes acarreta, torna-se necessário recorrer a simplificações que possibilitem, do ponto de vista matemático, a tradução do comportamento do robô.

3.1 ZMP – “Zero Moment Point”

Considere-se um robô bípede antropomórfico com tronco e pêndulo, em que cada perna é constituída pela anca, tornozelo e pé. Para um robô com quatro ou mais pernas é possível considerar a estabilidade estática que usa o centro de gravidade, mas para um robô bípede pode ser necessário ter em conta a estabilidade dinâmica; e o cálculo do ZMP permite contabilizar esse aspecto. No caso do robô bípede vai-se apresentar dois sistemas de modelização, o 1º é o sistema estático e o 2º é o sistema dinâmico.

O ZMP é definido como o ponto no solo onde a soma de todos os momentos de força é nulo.

Na figura 4, a distância mínima entre o ZMP e a fronteira da região estável é denominada margem de estabilidade e pode ser considerada como um indicador da qualidade da estabilidade.

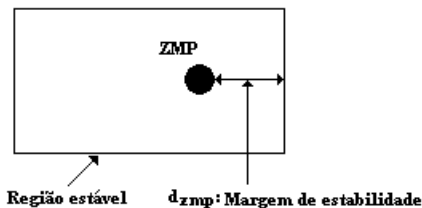


Fig. 4. Definição de margem de estabilidade.

Caso o ZMP esteja enquadrado dentro do polígono de contacto (região estável) entre o pé e o solo, pode-se afirmar que o robô bípede está estável.

Na situação em que a distância entre o ZMP e a fronteira da região estável do polígono é máxima, ou seja quando as coordenadas do ZMP estão próximas das do centro da região estável, pode-se afirmar que o robô bípede apresenta uma estabilidade elevada.

3.2 Inércia

Na dinâmica dos corpos rígidos, no caso de existir movimento de rotação, deve-se ter em linha de conta o momento de inércia.

Considerando que as partes físicas que compõem o Robô bípede apresentam as características mostradas na figura 5, então todas as partes podem ser aproximadas a um paralelepípedo.

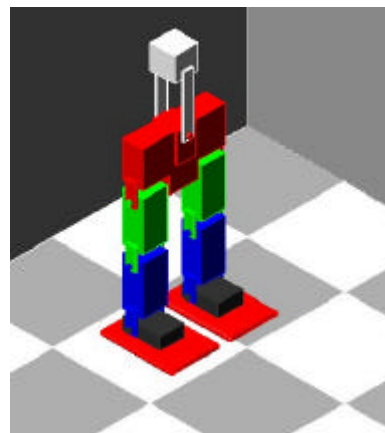


Fig. 5. Robô bípede.

Visto que os produtos de inércia são nulos e como as rotações das articulações do robô são segundo os eixos x e y, não existe a necessidade de calcular I_z , obtendo-se os momentos de inércia I_x e I_y mostrados na tabela I.

Tabela I – Características físicas do robô.

	Massa (Kg)	Compr. (m)	I_x ($\times 10^{-4} \text{ kg.m}^2$)	I_y ($\times 10^{-4} \text{ kg.m}^2$)
Pé	0,16	0,025	0,813	1,413
Perna inf.	0,17	0,115	8,188	7,721
Perna sup.	0,17	0,115	8,188	7,721
Corpo	0,4	0,065	14,167	6,467
Pêndulo	0,3	0,065	50,725	51,050

3.3 Sistema estático

O cálculo do ZMP considerando o sistema estático tem apenas em conta o momento devido ao peso das diversas partes que constituem o robô, desprezando por completo o momento devido à aceleração linear e angular. O ZMP estático é então representado pelas equações (1) e (2):

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^7 m_i \cdot g \cdot x_i}{\sum_{i=0}^7 m_i \cdot g} \quad (1)$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^7 m_i \cdot g \cdot y_i}{\sum_{i=0}^7 m_i \cdot g} \quad (2)$$

3.4 Sistema dinâmico

O cálculo do ZMP considerando o sistema dinâmico, além de ter em linha de conta o momento devido ao peso dos diversos corpos que constituem o robô (como num sistema estático), contempla ainda o momento devido ao movimento de translação e rotação desses mesmos corpos. O ZMP dinâmico é então traduzido pelas equações (3) e (4).

$$x_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^7 m_i (\ddot{z}_i + g)x_i - \sum_{i=0}^7 m_i \ddot{x}_i z_i - \sum_{i=0}^7 I_{iy} \alpha_{iy}}{\sum_{i=0}^7 m_i (\ddot{z}_i + g)} \quad (3)$$

$$y_{zmp} = \frac{\sum_{i=0}^7 m_i (\ddot{z}_i + g)y_i - \sum_{i=0}^7 m_i \ddot{y}_i z_i + \sum_{i=0}^7 I_{ix} \alpha_{ix}}{\sum_{i=0}^7 m_i (\ddot{z}_i + g)} \quad (4)$$

onde \ddot{x} , \ddot{y} e \ddot{z} são as acelerações lineares,

I_{ix} , I_{iy} , é a inércia dos vários elementos do corpo,

α_{ix} , α_{iy} é a aceleração angular dos vários elementos do corpo,

m_i é massa dos vários elementos do corpo, e g é a aceleração da gravidade.

4. “Gaits”

“Gait” é o termo usado para designar um ciclo de movimento das pernas de um animal ou robô. Pode-se dizer que o “gait” define a forma e as características do modo como um corpo se desloca; por este motivo o estudo dos “gaits” é fundamental para a robótica com pernas.

Neste trabalho foram concebidos 8 “gaits” diferentes, tendo como objectivo abordar os “gaits” que se consideram ser os mais frequentes na locomoção do ser humano. A figura 6 representa a estrutura de concepção dos “gaits”, bem como a sua denominação.

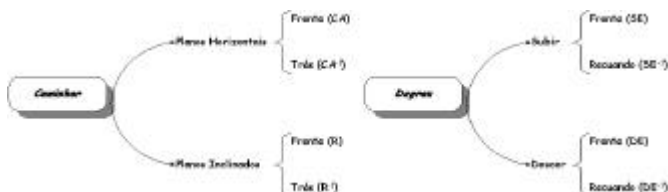


Fig. 6. Estrutura de concepção dos “gaits”.

Para projectar os “gaits” usados neste trabalho definiu-se uma trajectória para o movimento do pé, trajectória essa que teve em conta os seguintes pressupostos:

- A semelhança com a trajectória do pé do ser humano;
- No início e no fim da trajectória, a distância do pé ao solo é nula;
- A 50% da trajectória a distância do pé ao solo é máxima.

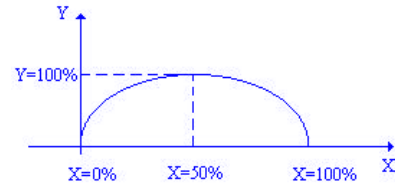


Fig. 7. Trajectória normalizada.

A partir destes pressupostos propôs-se seguinte equação normalizada para a trajectória do pé (figura 7):

$$y = 4 \cdot (x - x^2) \quad 0 \leq x, y \leq 1 \quad (5)$$

Para se obter a trajectória real, necessita-se de saber a altura (A) e o comprimento (C) da trajectória, resultando:

$$Y = A \cdot 4 \cdot \left(\frac{X}{C} - \left(\frac{X}{C} \right)^2 \right) \quad \begin{matrix} 0 \leq Y \leq A \\ 0 \leq X \leq C \end{matrix} \quad (6)$$

$$\text{sendo} \quad Y = A \cdot y \quad (7)$$

$$X = C \cdot x \quad (8)$$

Para caminhar em planos horizontais aplica-se directamente a trajectória dada pela equação 6. Para caminhar em planos inclinados a trajectória anterior é rodada de um valor igual ao ângulo de inclinação desse plano inclinado.

As trajectórias de subir e descer degraus são obtidas da forma que a figura 8 ilustra,

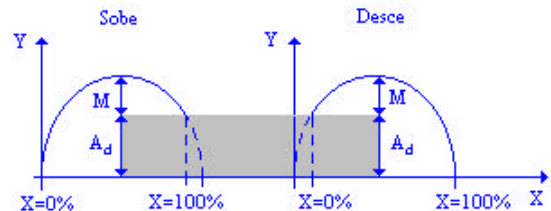


Fig. 8. Trajectórias para subir e descer degraus.

sendo A_d a amplitude do degrau e M a margem de segurança. Resolvendo a equação 6 com $C=1$, $A=A_d+M$ e $Y=A_d$, obtêm-se as percentagens de comprimento relativo ao “gait” original, que de seguida é convertido em 0% ou 100% quando desce ou sobe, respectivamente.

5. Trajectória

Com a discussão de cinemática e dinâmica de um robô existe agora a necessidade de resolver o problema de controlar o robô, de forma a que este siga a trajectória planeada. O método de “spline” cúbica oferece várias vantagens: primeiro, porque utiliza o mais baixo grau de uma função polinomial que permite continuidade em velocidade e aceleração; segundo, ao utilizar um polinómio de baixo grau está-se a reduzir o esforço de computação e a possibilidade de instabilidades numéricas. Embora se possam utilizar diversas funções de base, neste trabalho utiliza-se a interpolação polinomial por troços, “spline” cúbica, correspondente, como o próprio nome indica, à utilização de polinómios do 3º grau em cada troço de interpolação. Isto deve-se ao facto de neste trabalho ser necessário a utilização da segunda derivada para obter a aceleração linear e angular.

6. Algoritmo do planeamento de trajectórias

Inicialmente, no robô bípede proposto o controlo era realizado em malha aberta, não existindo retorno de nenhuma variável. O controlo estava totalmente dependente da precisão das características consideradas de todos os corpos do robô bípede e da precisão de execução dos actuadores (servo motores).

Neste trabalho, é proposto um método que consiste no equilíbrio do “gait” através da correcção dos ângulos das ancas e pêndulo. Primeiro, tendo em conta as características do passo, são obtidos os pontos notáveis da trajectória e é então gerada a trajectória do pé recorrendo a uma interpolação com uma spline de 3º ordem, sendo de seguida gerada a trajectória das restantes articulações utilizando a cinemática directa e inversa. Por último é estimado numericamente o ZMP, que será comparado com o centro do pé fixo de modo a verificar a margem de estabilidade (K) escolhida. No caso de não se verificar a margem de estabilidade são então corrigidos os ângulos das ancas e pêndulo até se conseguir atingir a estabilidade desejada. Devido a limitações angulares dos servo motores do pêndulo e ancas existem alguns “gaits” em que não é possível obter estabilidade. Apresenta-se na figura seguinte o fluxograma deste algoritmo.

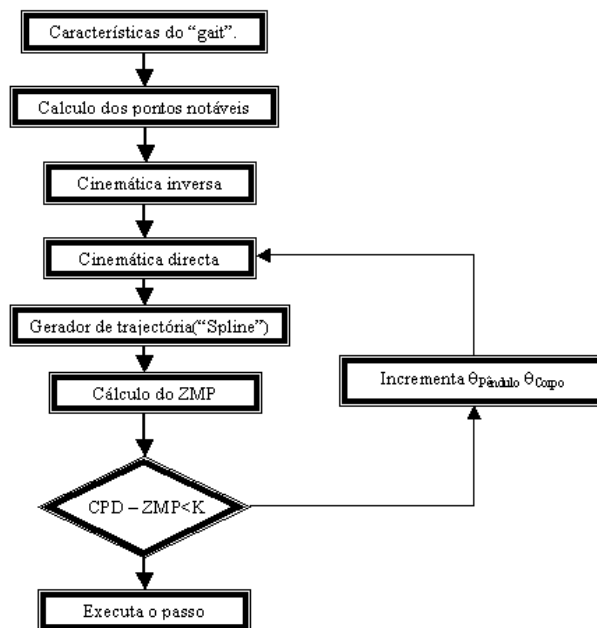


Fig. 9. Algoritmo do planeamento de trajectória

Este algoritmo é utilizado quer para o sistema estático quer para o dinâmico. No caso do estático não existe a necessidade do cálculo da “spline”, o que leva a uma grande redução do tempo de cálculo; no caso dinâmico é necessário calcular 4 “splines” por cada corpo, o que resulta numa elevadíssima necessidade de cálculo, tornando difícil, com os computadores pessoais actuais, considerar a resolução destas equações em tempo real.

7. Algoritmo de Controlo

De modo a permitir um controlo em tempo real necessita-se de obter o valor do ZMP real. Para determinar o ZMP real utilizam-se 4 sensores de força em cada pé do robô bípede, dispostos da forma que a figura 10 ilustra. Pretende-se detectar em que local do pé é exercida a força e qual a sua intensidade, permitindo assim o controlo em malha fechada com um controlador Neuro-Difuso.

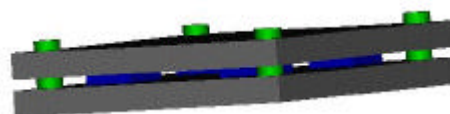


Fig. 10. Base do pé do robô bípede

O Modelo de controlo sugerido é o apresentado na figura 11, no qual se pode verificar que inicialmente existe um planeamento de trajectórias da qual resultam as coordenadas internas do robô, que por sua vez são utilizadas no controlador Neuro-Difuso, que também tem em conta o ZMP determinado pelos sensores colocados nos pés do robô.

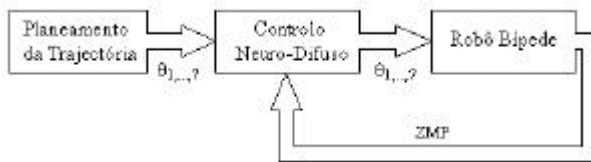


Fig. 11. Modelo de controlo do Robô Bípede

Pretende-se com este controlo assegurar a estabilidade do robô, mesmo que existam perturbações internas ou externas ao sistema.

8. Conclusões

Quanto ao “hardware” mecânico utilizado verifica-se que a autonomia do robô é bastante satisfatória tendo em linha de conta os robôs apresentados até ao momento, e que o sistema de comunicação sem fios implementado tem um bom desempenho.

O planeamento da trajectória do robô bípede através do formalismo do ZMP leva a uma diminuição do tempo de execução do controlo; mesmo assim, este formalismo não permite o planeamento em tempo real da trajectória, se considerarmos o sistema dinâmico.

Tendo em linha de conta o observado pelas diversas simulações pode-se dizer que a correcção angular lateral do pêndulo só é afectada quando se aplica o modelo dinâmico, variando com o suposto tempo de execução do “gait”. A correcção angular longitudinal é condicionada pelas características do “gait”, ou seja, comprimento, altura, inclinação e tempo de execução. Sendo assim, é crucial o controlo do ângulo longitudinal do pêndulo.

Por último, as principais dificuldades encontradas neste trabalho prendem-se com a dificuldade de modelização e calibração do robô. A modelização do sistema bípede requer muitas simplificações, tais como a diminuição das articulações de rotação e a associação de diversas partes do corpo em apenas uma, conduzindo a uma modelização imperfeita.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro concedido pela Fundação para a Ciência e Tecnologia para o desenvolvimento deste projecto.

Referências

- [1] M. Vukobratovic. Biped locomotion :Dynamics, Stability, Control and Application. Berlin: Springer-Verlag, 1990.
- [2] M. Y. Zarrugh e C. W. Radcliffe, “Computer Generation of Human Gait Kinematics”, J. of Biomechanics, Vol. 12, pp 99-111,(1979).

- [3] T. McGeer, “Passive Walking with Knees”, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp, 1640-1645 (1990).
- [4] M. Rostami e G. Bessonnet, “Impactless Sagittal Gait of a Biped Robot during the Single Support Phase”, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1385-1391 (1998).
- [5] L. Roussel, C. Canudas-de-wit, and A. Goswami, “Generation of Energy Optimal complete Gait Cycles for Biped Robots”, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 2036-2041 (1998).
- [6] Y. F. Zheng and J. Shen, “Gait Synthesis for the SD-2 Biped Robot to Climb Sloping Surface”, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 6, No. 1, pp. 86-96 (1990).
- [7] C. Chevallereau, A. Formal’sky, e B. Perrin, “Low Energy Cost Reference Trajectories for a Biped Robot” Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1398-1404 (1998).
- [8] C. L. Shin, Y. Z. Li, S. Churng, T. T. Lee, e W. A. Cruver, “Trajectory Synthesis and Physical admissibility for a Biped Robot During the Single-Support Phase”, Proc. Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1646-1652 (1990).
- [9] K. Hirai, M. Hirose, Y Haikawa, e T.Takenaka, “The Development of Honda Humanoid Robot”, Proc. Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1321-1326 (1998).
- [10] M. Vukobratovic e D. Juricic, “Contribution to the Synthesis of Biped Gait”, IEEE Trans, on Bio-Medical Engineering, Vol. BME-16, No. 1,pp. 16 (1969).
- [11] Jong H. Park e Kyoung D. Kim. “Biped Robot Walking Using Gravity-Compensated Inverted Pendulum Mode and Computed Torque Control.”, International Conference on Robotics and Automation, volume 4, pp. 3528-3533. IEEE Press, Maio 1998.
- [12] Q. Huang, S. Kajita, K. Kaneko, K. Yokoi, K. Komoriya, e K. Tanie, “A High Stability, Smooth Walking Pattern for a Biped Robot”, Proc. Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 65-71 (1999).
- [13] João Paulo M. Ferreira, Manuel M. Crisóstomo and António P. Coimbra, “Decreasing the dynamic stability calculation time of a Biped Robot”, Jornadas Luso-Espanholas, vol. I, pp. 3.103-3.108, Vilamoura, Portugal, 3-5 Julho 2003.