

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM ROBÔ PARA A ROBOCUP HUMANOID LEAGUE

EDUARDO M. NOTTOLINI, MILTON PERES CORTEZ JUNIOR,

FLAVIO TONIDANDEL E REINALDO A. C. BIANCHI

Centro Universitário da FEI

Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972

CEP 13081-970 – São Bernardo do Campo SP

*E-mails: eduardo.mellonotto@gmail.com, milton.cortez@hotmail.com,
flaviot@fei.edu.br, rbianchi@fei.edu.br*

Resumo— Este trabalho descreve o projeto, desenvolvimento e construção de um robô humanoíde destinado a aplicações em pesquisas e apto a participar de competições de futebol de robôs organizadas em nível mundial pela RoboCup, obedecendo as regras da Robocup Humanoid League KidSize. Para tanto, é apresentada a constituição mecânica, os sistemas de eletrônica e o sistema de geração de marcha do robô, utilizando um modelo de diagrama de estados. Testes preliminares mostram a viabilidade do projeto.

Palavras-chave— Robôs Humanóides, Locomoção Bípede, RoboCup Humanoid League.

1 Introdução

Robôs antropomórficos constituem apenas uma pequena parcela dos vários tipos de robôs já existentes, mas certamente, quando se pensa em robôs eles são a primeira imagem que vem às nossas mentes. Robôs humanoídes apresentam uma grande complexidade pelo seu grande número de articulações e principalmente por sua locomoção sobre duas pernas. Deste modo, são poucos os trabalhos que tratam com profundidade a construção dos robôs bípedes em relação aos artigos relacionados a outros tipos de robôs (Nicholls, 1998; Sardain e Bessonnet 2004; Iida et al, 2009).

Este artigo foca no desenvolvimento de um robô humanoíde, desde sua concepção até a constituição de um protótipo e implementação de marcha em malha aberta, usando máquina de estados. A seção 2 detalha o projeto mecânico desenvolvido. Na seção 3 temos a descrição do protótipo. Na seção 4 é exposto o sistema eletrônico para a demonstração na seção 5 da marcha do robô. Seção 6 conclui o artigo.

2 O projeto mecânico

Para a concepção do projeto mecânico de um robô humanoíde, deve-se definir os graus de liberdade que o robô terá em sua versão final e completa.

Pode-se entender como grau de liberdade os deslocamentos lineares ou angulares realizados em relação a um sistema de eixos cartesianos, no caso particular das juntas de articulação do robô, existem apenas movimentos rotacionais, podendo chegar a três graus de liberdade por junta (Iida et al., 2009).

O corpo humano possui uma quantidade grande de graus de liberdade que não precisam, necessariamente, serem reproduzidos em um robô humanoíde para que ele possa andar ou desempenhar algumas funções durante uma competição da RoboCup Humanoid League. Realizou-se, portanto, uma análise da quantidade necessária de graus de liberdade para um caminhar semelhante ao humano,

assim como a quantidade para os movimentos periféricos de braços e pescoço.

Analisando os robôs de equipes participantes da Humanoid-League da RoboCup, chegou-se a conclusão que seriam suficientes 22 graus de liberdade (DOF), distribuídos da seguinte forma: seis em cada uma das pernas, três em cada braço, dois no tronco e dois no pescoço, conforme representado esquematicamente na figura 1.

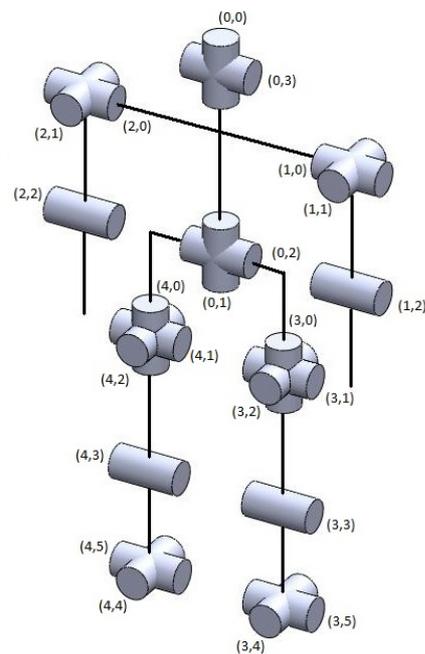


Figura 1 – Representação esquemática dos graus de liberdade liberdade e numeração das juntas.

2.1. Dinâmica

Considerando robôs móveis com quatro ou mais pernas, garante-se a estabilidade considerado apenas o equilíbrio estático, visto que o movimento pode ser realizado com três apoios de contato com o solo (Nicholls, 1998). Entratento, em relação aos

robôs bípedes, tem-se apenas um ponto de apoio durante a troca de pernas, sendo assim é necessário considerar as características dinâmicas do robô para garantir estabilidade e equilíbrio durante a caminhada. Os critérios do equilíbrio estático regem a geometria construtiva do robô. Não obstante, deve-se conhecer as limitações oriundas da dinâmica para que não seja projetado um sistema incapaz de manter a estabilidade durante o movimento. Utilizou-se os conceitos de Ponto de Momento Nulo e Centro de Pressão (Sardain e Bessonnet 2004) para análise da estabilidade.

Em robôs humanóides todas as juntas do mecanismo são motorizadas e podem ser diretamente controladas, com exceção do contato entre o chão e o pé do robô, que se pode considerar como um grau de liberdade adicional.

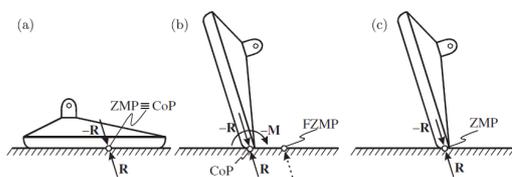


Figura 2 – Vínculo entre pé e solo / posição do ZMP. Pé totalmente apoiado, (b) pé inclinado e ZMP fora do vértice, (c) pé inclinado e ZMP no vértice (Vukobratovic e Borovac, 2004).

Este novo grau de liberdade, por não ser motorizado, não pode ser controlado diretamente como os outros, gerando as dificuldades no controle e estabilidade do robô bípede. Dessa forma o indicador geral do comportamento do mecanismo é o ponto onde a influência de todas as forças atuantes sobre o sistema pode ser substituída por uma única força. Esse ponto é denominado Ponto de Momento Nulo (ZMP). A teoria deste método foi proposta por Vukobratovic e Borovac (2004) e por muito tempo foi utilizada como único procedimento na síntese da movimentação bípede. Ainda hoje é largamente utilizada em conjunto com outras teorias. Ela permitirá a análise da constituição do robô bípede.

O ZMP é definido como o ponto sobre o solo onde a resultante de todas as forças inerciais e da gravidade não possui componente ao longo do eixo horizontal. Em outras palavras, é o ponto onde $M_x = 0$ e $M_y = 0$, M_x e M_y representam o momento em torno dos eixos x e y , gerada respectivamente pela força de reação F_r e momento de reação T_r . Matematicamente o ZMP está definido como a seguinte função:

$$PZMP = (x_{ZMP}, y_{ZMP}, 0) \in S \quad (1)$$

Onde PZMP é o ponto dado pelas coordenadas x e y e S é a região que delimita a superfície de suporte sob os pés. Enquanto o PZMP encontra-se dentro da região S o contato entre o solo e o pé é estável.

Considerando-se o robô apoiado apenas em uma das pernas, existe uma carga distribuída agindo sob o pé. Esta carga pode ser substituída por uma única força resultante em um ponto onde a somatória dos momentos é nula (Sardain e Bessonnet 2004). Este ponto denomina-se Centro de Pressão (CoP).

O conceito do CoP é bastante parecido com o de ZMP, mas está relacionado às forças transmitidas por contato, dentro da área de suporte S , enquanto ZMP considera as forças sem contato, como gravidade e inércia.

Com a análise do ZMP e do CoP, seguindo o equacionamento definido em (Vukobratovic e Borovac, 2004), permite definir o tamanho dos pés para evitar o escorregamento das pernas em contato com o solo e permitir o caminhar. Além disso, auxiliará na constituição das pernas para gerar corretamente as forças de movimentação de modo a manter a estabilidade.

2.2. Servo-Motores

Cada um dos graus de liberdade tem seu movimento realizado por um motor. Os motores são componentes importantes de um robô, pois tem influência direta na velocidade e precisão dos movimentos.

Selecionou-se o servo-motor RX-28 da Dynamixel, (Robotis, 2012), pois além de atender às características de torque e precisão desejadas, possui uma geometria que favorece a sua alocação e fixação na estrutura do robô. O peso do motor é de 72 gramas (dando ao robô um peso de 1584 gramas em motores), torque de 3,5 Nm, e um consumo de 1,5 A.

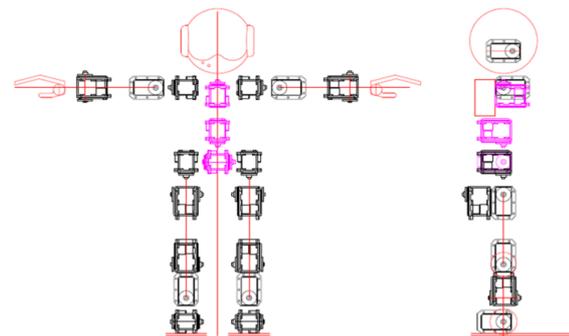


Figura 3 – Disposição dos servo-motores.

Na concepção da estrutura do robô, e posicionamento dos graus de liberdade, deve-se considerar haver espaço suficiente para que as articulações realizem seus movimentos sem colidir com outras partes do robô. Além disso os motores devem respeitar os limites geométricos da forma humanóide. A figura 3 mostra os motores nas posições que atendem aos respectivos graus de liberdade do robô.

2.3. Estrutura

No projeto da estrutura do robô é necessário garantir a mobilidade necessária para cada uma das articulações, evitando colisões e interferências de movimentos simultâneos. Para o projeto de cada uma das peças procedeu-se da seguinte maneira: desenhou-se os motores e avaliou-se o movimento relativo entre eles; na seqüência definiu-se as distâncias de forma a manter coerentes a anatomia e funcionamento do robô. Para cada um dos motores

desenhou-se linhas de construção (Figura 4 em vermelho) delimitando a região livre necessária aos seus movimentos e assegurando que não houvesse intersecção entre essas regiões garantiu-se o funcionamento sem colisões.

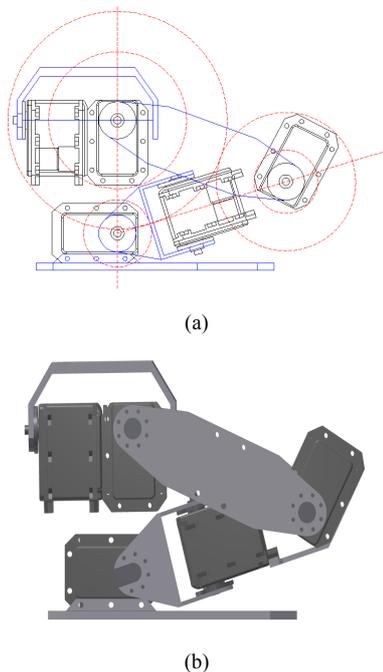


Figura 4 – Em (a) Articulações da perna. Em preto estão as linhas do motor. Vermelho a região de movimentação livre e em azul as peças da estrutura do robô. Em (b) o modelo 3D da perna.

Cada perna é composta por cinco motores (figura 4), dois respectivamente, para a articulação frontal e lateral do pé, um para o joelho e mais dois para a elevação frontal e lateral da coxa.

Após os desenhos dos modelos 3D de cada componente articulado do robô, verificou-se, por meio da análise por elementos finitos, a resistência de cada uma das peças, permitindo com isso a definição da espessura das peças, quando necessário, de forma a manter as tensões provenientes da solicitação mecânica dentro de uma faixa admissível. Conforme pode ser observado na figura 5, a tensão máxima não ultrapassa 25MPa, valor bastante inferior aos 152MPa do material utilizado, a liga de alumínio 6351. O design completo e final do robô pode ser visto na figura 6.

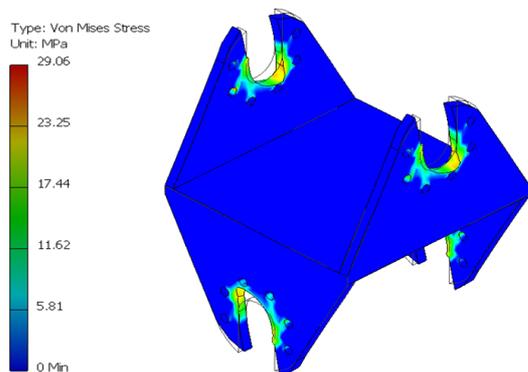


Figura 5 – Análise por elementos finitos.

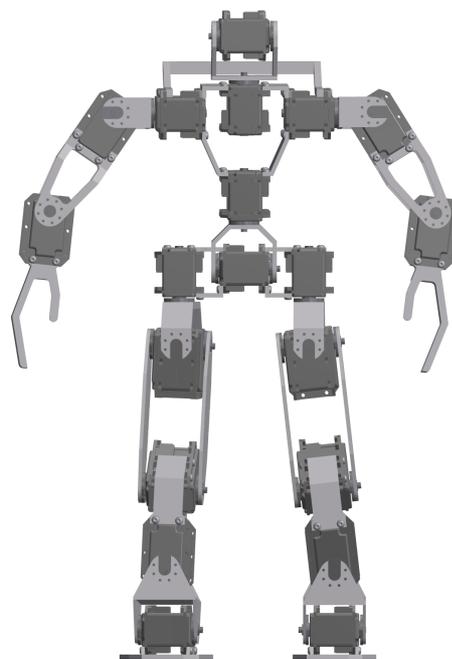


Figura 6 – Modelo 3D da Estrutura mecânica do robô.

3 O Sistema Eletrônico

Para uma melhor organização, a figura 7 apresenta o diagrama de blocos representando as principais partes do sistema eletrônico.

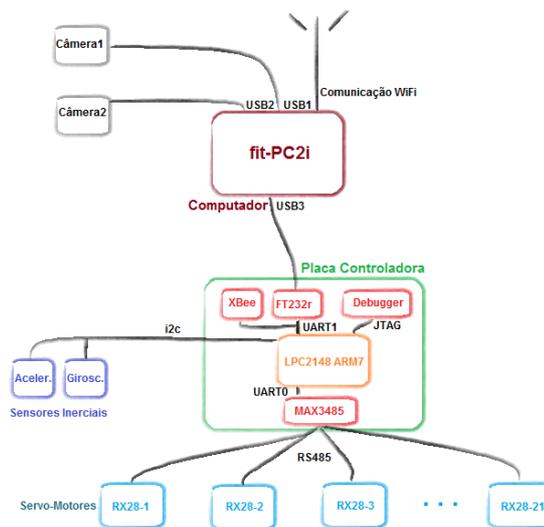


Figura 7 – Diagrama em blocos do Sistema Eletrônico.

O sistema eletrônico do robô humanoide deve ser capaz de controlar os motores do robô, ler os sensores e processar as imagens provenientes de duas câmeras de visão estéreo. Além disso, como o robô deve ser completamente autônomo, o sistema eletrônico deve ainda possuir todo o software embarcado que permita o robô atuar em uma partida de futebol, conforme as regras da Robocup Humanoid League. Para tanto, determinou-se o uso de um computador compatível com todas as funções que deverá exercer, o fit-PC2i (CompuLab, 2012), que possui uma CPU formada pelo microcontrolador Intel Atom Z530, 1Gb de memória, Disco de Estado Sólido (SSD) de 8Gb e

comunicação externa por Ethernet, Wireless e USB. Além disso, possui uma pequena dimensão apropriada ao robô.

Para aliviar o computador principal das tarefas de baixo nível, como a movimentação dos servomotores e a leitura do acelerômetro e giroscópio via barramento I²C (I²C Specifications, 2012), deixando apenas encarregado com tarefas mais complexas como processamento de imagens, estratégia de jogo e movimentação, projetou-se uma placa sub-controladora.

Esta placa contém a eletrônica necessária ao funcionamento do robô, essencialmente o microcontrolador ARM7 LPC2148, o conversor usbuart que realiza a comunicação entre o fit-PC2i e o módulo microcontrolador e o circuito conversor de níveis de tensão padrão RS485 para a comunicação com os servo-motores. Além disso, a placa controladora ainda recebe os dados provenientes dos sensores antes de enviá-los ao computador principal.

O acelerômetro utilizado é BMA180 (Bosch, 2012) de 3 eixos (x,y,z), com algumas funcionalidades interessantes, como interrupções programáveis para microcontroladores, escalas de medição configuráveis e resolução de pelo menos 12 bits, importante para as funcionalidades do robô humanoide.

O giroscópio é o L3G4200D (ST Electronics, 2012) com rotação em torno dos eixos (x,y,z). Possui também funcionalidades importantes para o robô humanoide, inclusive com sensor de temperatura integrado.

Além dos circuitos e módulos mencionados foram adicionados ao projeto da Placa de Controle um módulo de comunicação sem fio XBee series 2 (Digi International, 2012), com a capacidade de transmitir e receber dados de um computador remoto, importante para o monitoramento de dados de posicionamento e aceleração.

Para a comunicação com os servo-motores foi utilizado o circuito integrado de transceiver RS485 MAX3485, em um único barramento, como apresentado na figura 8, facilitando o cabeamento entre todos os servos presentes no robô.

Na figura 9 temos a imagem da placa prototipada, com o microcontrolador ARM7 LPC2148 e os circuitos descritos.

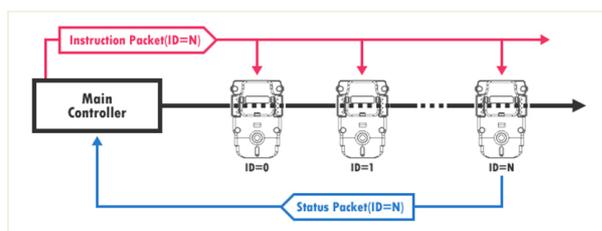


Figura 8 – Barramento único do RS485.

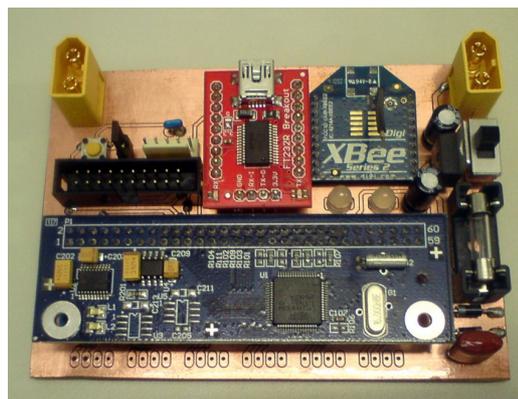


Figura 9 – Placa Controladora implementada.

4 Controle de Marcha

Com a estrutura mecânica definida, conforme a figura 6, e a parte eletrônica especificada conforme seção 3, definiu-se o controle de marcha do robô bípede usando máquina de estados. Embora os sensores estejam operacionais, o primeiro desenvolvimento do robô foi seu teste de marcha em malha aberta (sem leitura dos acelerômetros e giroscópios), baseando-se apenas nos posicionamentos dos servomotores.

O pseudo-código apresentado resume a estrutura da máquina de estados implementada, onde continuamente a posição dos servos é monitorada até alcançarem os valores de terminação para a mudança de estado.

```

if (estado = 1)
    balanço_esquerda()
    if (angulo_motor_bacia1 > terminador1)
        estado = 2;

if (estado = 2)
    levanta_perna_direita();
    rotaciona_quadril_anti_horario();
    if (angulo_motor_joelho1 > terminador2)
        estado = 3;

if (estado = 3)
    abaixa_perna_direita();
    if (angulo_motor_joelho1 < terminador3)
        estado = 4;

if (estado = 4)
    Balanço direita()
    if angulo_motor_bacia2 > terminador4
        estado = 5;

if (estado = 5)
    levanta_perna_esquerda()
    rotaciona_quadril_horario();
    if (angulo_motor_joelho2 > terminador2)
        estado = 6;

if (estado = 6)
    abaixa_perna_esquerda()
    
```

Os valores para os terminadores dos estados foram ajustados empiricamente, bem como as funções que atuam nos servo-motores a fim de realizar os movimentos desejados.

O resultado deste controle de marcha pode ser visto nas figuras 10, 11 e 12, onde é apresentado: um gráfico da posição das juntas da perna esquerda em graus durante a execução da máquina de estados da marcha; e o robô em movimento tanto de frente

(onde se pode ver o movimento pendular da esquerda para a direita que o robô realiza para se equilibrar em apenas um pé) quanto de lado (onde pode-se ver os pés se movendo para a frente (vídeos disponíveis no site www.fei.edu.br/~rbianchi/humanoide)).

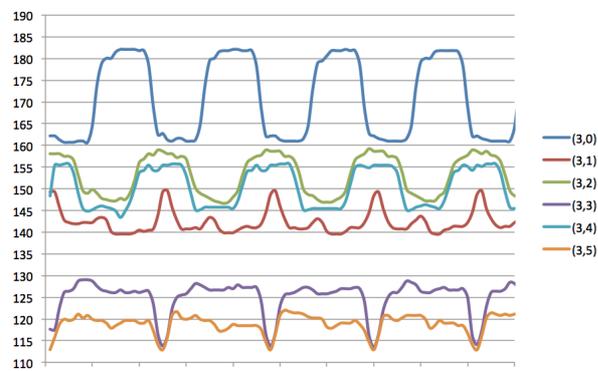


Figura 10 – Posição em graus das juntas da perna esquerda durante a marcha

5 CONCLUSÃO

Este artigo descreveu o projeto mecânico, eletrônico e do controle de marcha por malha aberta de um robô humanoide. Os resultados são promissores e atendem as expectativas iniciais. O robô bípede descrito neste artigo participou da Competição Brasileira de Robótica, em 2012, na categoria IEEE Humanoid Racing, conseguindo alcançar o feito de percorrer 4 metros de corrida humanoide em um tempo razoável.

Como trabalho futuro, o projeto aqui descrito deve ser aprimorado com pesquisas acerca da dinâmica de locomoção bípede por malha fechada, com o uso intensivo dos acelerômetros e giroscópio embarcados. Além disso, deve-se ter um sistema de visão computacional capaz de detectar uma bola de jogo da RoboCup Humanoid League, permitindo assim seu desenvolvimento em futebol de robôs.

Agradecimentos

À equipe RoboFEI, ao Centro de Laboratórios Mecânicos, Centro de Laboratórios Elétricos e ao Laboratório de Robótica e Inteligência Artificial do Centro Universitário da FEI pelo suporte ao projeto.

Referências Bibliográficas

- Vukobratovic, Miomir e Borovac, Branislav (2004). “Zero-Moment Point — Thirty Five Years Of Its Life”. *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 1, No. 1, pp 157–173.
- Sardain, Philippe; Bessonnet, Guy (2004) “Forces Acting on a Biped Robot. Center of Pressure - Zero Moment Point”. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, Vol. 34, No. 5,
- Nicholls, Elliot (1998). “Bipedal Dynamic Walking in Robotics”. Honours Thesis - The University of Western Australia; Department of Electrical and Electronic Engineering
- Iida, Fumiya; Minekawa, Yohei; Rummel, Jürgen e Seyfarth, André (2009). “Toward a human-like biped robot with compliant legs”. *Robotics and Autonomous Systems* 57, pp139-144.
- I²C Specifications - I2C-bus specification and user manual - Disponível em <http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf> Acesso em 26/07/2012.
- W. Bosch-Sensortec –BMA180 – Digital triaxial acceleration sensor. Disponível em <<http://www.bosch-sensortec.com/content/language1/downloads/BS-T-BMA180-FL000-03.pdf>> Acesso em 26/07/2012
- ST Electronics - L3G4200D Datasheet - ultra-stable three-axis digital output gyroscope. Disponível em <http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00265057.pdf> Acesso em 26/07/2012
- Digi International – Xbee Series 2 Datasheet - XBee Series 2 OEM RF Modules. Disponível em <ftp://ftp1.digi.com/support/documentation/90000866_A.pdf> Acesso em 26/07/2012
- Robotis – Dynamixel RX28. Disponível em <http://support.robotis.com/en/product/dynamixel/rx_series/rx-28.htm> Acesso em 31/05/2013
- CompuLab - fit-PC2i. Disponível em <<http://www.fit-pc.com/web/fit-pc/fit-pc2i-specifications/>>

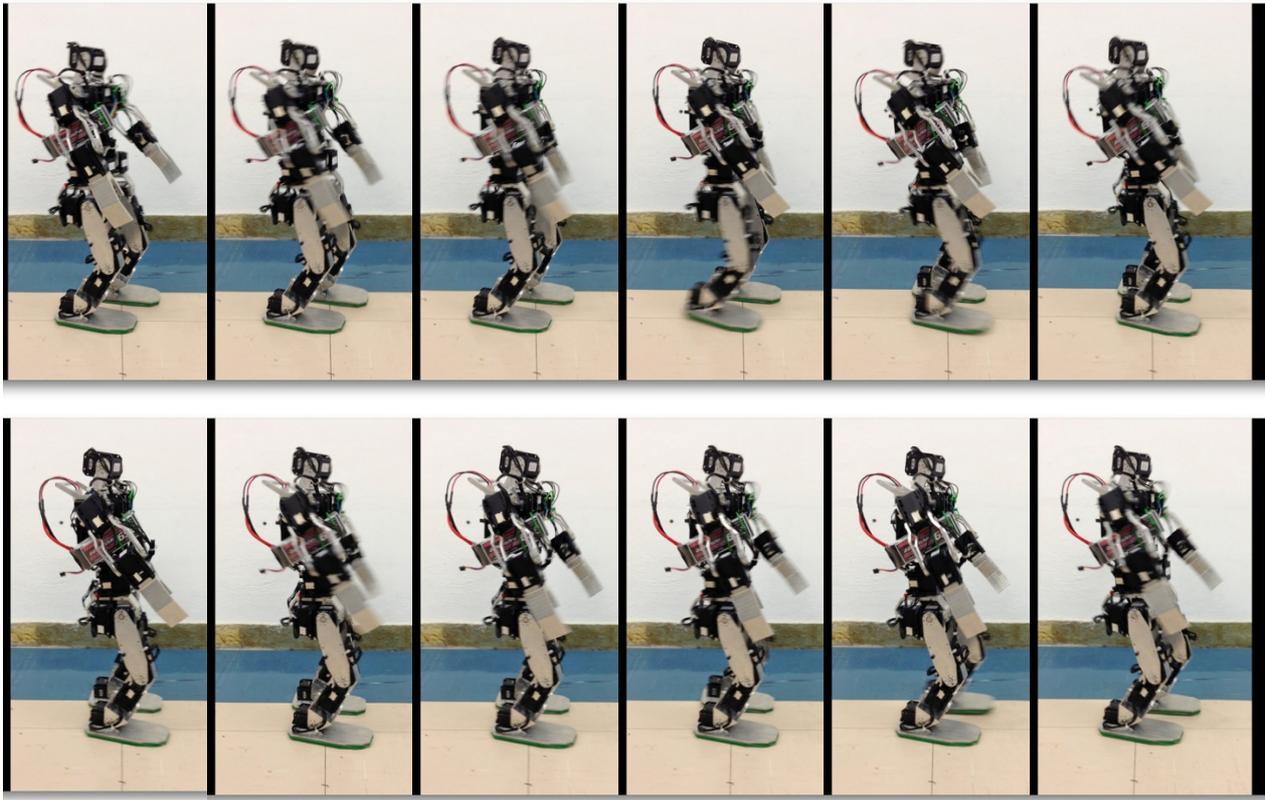


Figura 11 – Vista lateral do movimento de marcha bípede do robô humanoide.

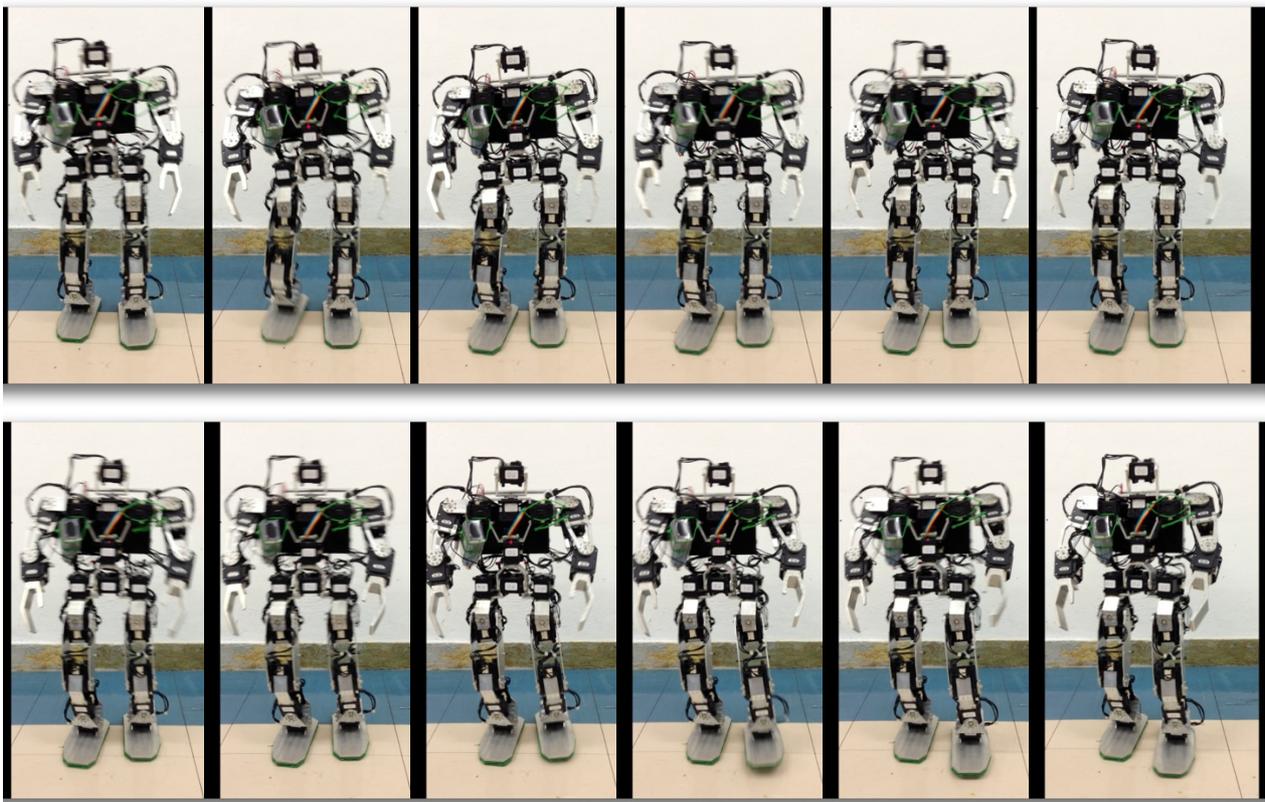


Figura 12 – Vista frontal do movimento de marcha bípede do robô humanoide.