



CONTROLE CINEMÁTICO DE UM ROBÔ ANTROPOMÓRFICO COM PUNHO ESFÉRICO

José Alberto Naves Cocota Júnior – cocota@em.ufop.br

Thiago D'Angelo – thiago.d.angelo@hotmail.com

João Victor Oliveira – eca.joaovictor@yahoo.com.br

André Castro – andreg.c@globo.com

Leonardo Vidigal Meireles – leopiranga@hotmail.com

Luca Turci – gpv.automacao@gmail.com

Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais (DECAT) – Escola de Minas (EM) – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)

Campus do Morro do Cruzeiro, Ouro Preto – MG, Brasil.

35400-000 – Ouro Preto – Minas Gerais

Resumo: *Uma importante ferramenta no aprendizado da robótica básica é o estudo prático desta disciplina. Contudo, os manipuladores robóticos para fins educacionais disponíveis no mercado são onerosos. Este trabalho teve como objetivo dar continuidade ao projeto de construção e controle de um robô antropomórfico de baixo custo, auxiliando na compreensão dos conceitos teóricos estudados na disciplina de Elementos de Robótica. Utilizou-se o MATLAB® para a simulação e o Arduino para o controle cinemático de um robô manipulador de seis graus de liberdade.*

Palavras-chave: *Robô antropomórfico com punho esférico, MATLAB, Arduino, controle cinemático.*

1. INTRODUÇÃO

O estudo da robótica, que vem inovando as engenharias, pode ser considerado um campo relativamente novo da tecnologia moderna (COCOTA et al., 2013). De acordo com Spong et al. (2005), a robótica envolve conceitos multidisciplinares, tais como o estudo de engenharia elétrica, engenharia mecânica, engenharia industrial e de sistemas, ciência da computação, economia e matemática.

Os cursos de engenharia são em sua grande maioria focados em teoria, o que dificulta ao discente a absorção de habilidades práticas requeridas no mercado de trabalho, fazendo com que apenas após a graduação o profissional tenha o conhecimento necessário, o que muitas vezes dificulta a entrada do recém-formado no mercado (INOVA ENGENHARIA, 2006). Projetos voltados à aplicação dos conhecimentos teóricos em solução de problemas reais se tornam muito importantes para a motivação e formação do engenheiro, proporcionando o exercício da interdisciplinaridade e o trabalho em equipe, que caracterizará sua vida profissional (COELHO E VALLIM, 2001).

Com o intuito de promover o ensino de robótica fixa através da metodologia de aprendizagem baseada em problemas (Problem-Based Learning, PBL), Cocota et al. (2013) desenvolveu um robô manipulador de baixo custo com 6 graus de liberdade (GDL), que permitiu explorar os conceitos básicos de robótica industrial com os alunos de graduação, e.g., cinemática direta, cinemática inversa e programação de trajetória por ponto-a-ponto.

Este trabalho é um aprimoramento do efetuado no passado (COCOTA et al., 2013). As melhorias efetuadas na estrutura do robô, permitiram implementar o controle cinemático na plataforma robótica que foi desenvolvida por alunos de graduação. O trabalho foi dividido em algumas seções. Em controle cinemático, são apresentados os conceitos relacionados ao controle cinemático de posição e de orientação de um efetuador ao longo de uma trajetória desejada. Em seguida, há uma breve descrição do robô e de seu espaço de trabalho. Depois, são apresentados os resultados do controle cinemático de trajetória obtidos por simulação e experimentos. Por fim, são apresentadas as conclusões obtidas após o desenvolvimento desse trabalho com alunos de graduação em Engenharia de Controle e Automação.

2. CONTROLE CINEMÁTICO DO ROBÔ DE 6 GDL

Para a implementação de uma estrutura de controle cinemático, desprezou-se a dinâmica do manipulador. Esta hipótese pode ser realizada, uma vez que as juntas, que são acionadas por servomotores, apresentam elevados fatores de redução nas engrenagens, bem como foram utilizadas baixas velocidades angulares durante a realização das trajetórias.

2.1. Desacoplamento do Controle Cinemático

No caso do manipulador antropomórfico com punho esférico, de 6 GDL, pode-se desacoplar o controle cinemático em de posição e de orientação. Isso foi possível, pois os eixos de rotação das juntas do punho esférico interceptam no mesmo ponto (Figura 1). Assim, a matriz do jacobiano geométrico que relaciona as velocidades linear (\dot{p}) e angular ($\dot{\omega}$) do efetuador em relação as velocidades das juntas ($\dot{\vec{q}}$), pode ser reduzido em dois Jacobianos analíticos, sendo possível separar as variáveis das juntas em parcelas responsáveis e pela posição (\vec{q}_p) e pela orientação (\vec{q}_o), conforme expresso na Equação (1).

$$\dot{\vec{q}} = \begin{bmatrix} \dot{\vec{q}}_p \\ \dot{\vec{q}}_o \end{bmatrix} \quad (1)$$

Sendo $\vec{q}_p = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$ e $\vec{q}_o = [\theta_4, \theta_5, \theta_6]^T$.

Dessa maneira, o jacobiano geométrico do manipulador de 6 GDL passa a ser representado na forma de uma matriz bloco triangular, que resulta na seguinte equação de cinemática diferencial:

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & 0_{3 \times 3} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\vec{q}}_p \\ \dot{\vec{q}}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & 0 \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_p \\ u_o \end{bmatrix} \quad (2)$$

Isolando as velocidades das juntas do robô, podemos encontrar a seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} u_p \\ u_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11}^{-1} & 0 \\ J_{22}^{-1} J_{21} J_{11}^{-1} & J_{22}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{u}_p \\ \bar{u}_o \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde \bar{u}_p e \bar{u}_o são os sinais de controle cinemático para posição e orientação por *feedforward*.

Dessa forma, pode-se observar que o controle de posição é desacoplado (ver Figura 2), porém o controle de orientação depende de u_p , sendo expressa essa relação por:

$$u_o = J_{22}^{-1} [J_{21} u_p + \bar{u}_o] \quad (4)$$

Portanto, a lei de controle que garante a estabilidade assintótica do sistema é expressa por:

$$\bar{u}_p = K_p e_p + \dot{p}_d \quad (5)$$

$$\bar{u}_o = K_o e_o + \omega_d \quad (6)$$

Sendo K_p e K_o as matrizes de ganho proporcional para os laços de controle cinemático de posição e orientação; e_p e e_o os sinais de erro de posição e orientação; \dot{p}_d e ω_d as velocidades linear e angular desejadas para o efetuador.

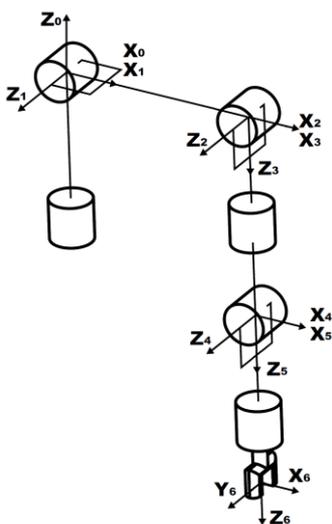


Figura 1 – Representação geométrica do robô antropomórfico com punho esférico.

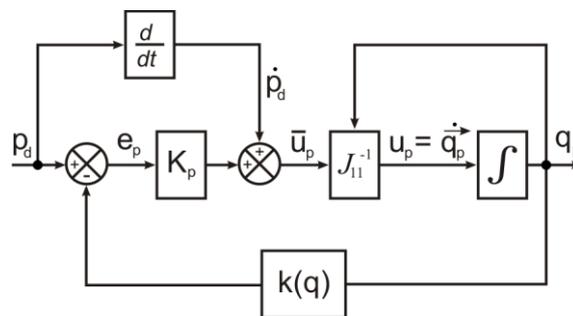


Figura 2 – Diagrama de blocos para o controle cinemático de posição do robô.

2.2. Controle Cinemático de Posição

Para que fosse possível executar esse projeto no semestre letivo, foi implementado apenas a estrutura de controle cinemático de posição.

O controle cinemático de posição resulta em uma malha de controle de velocidades em nível de juntas (Figura 2), onde u_i é o sinal de controle de velocidade aplicado ao motor da i -ésima junta. O motor, por sua vez, tem a ação de um integrador, no qual dada uma entrada em velocidade angular, apresenta em sua saída a posição angular da junta associada ao motor.

Considerando que o objetivo de controle para uma dada tarefa seja movimentar o centro do efetuador de uma posição inicial $p_0 (x_0, y_0, z_0)$, para uma posição desejada $p_d (x_d, y_d, z_d)$, o erro de posição do efetuador é dado por:

$$e_p = p_d - p_0 \quad (7)$$

Uma vez que a posição do robô no espaço pode ser determinada pela transformação de cinemática direta $p = k(\vec{q}_p)$, o objetivo de controle pode ser descrito por:

$$p(t) \rightarrow p_d(t) \quad (8)$$

Ou seja,

$$e(t) = p_d(t) - p(t) \rightarrow 0 \quad (9)$$

Para $t \rightarrow \infty$.

Desta forma, considerando o problema de controle do ponto de vista da cinemática diferencial e considerando o sinal de controle (u_i) dado pela velocidade angular de cada junta (\dot{q}_i), o problema pode ser representado por:

$$\dot{p}(t) = J_{11}(\vec{q}_p(t)) u(t) \quad (10)$$

Sendo J_{11} o jacobiano analítico de posição, dado na Equação (2), uma matriz quadrada (3x3) não singular nas condições de operação. Assim, o sinal de controle que lineariza o sistema ($\dot{p} = \bar{u}$) é dada por:

$$u_p(t) = J_{11}^{-1} \left(\vec{q}_p(t) \right) \overline{u}_p(t) \quad (11)$$

Para evitar erros de estado estacionário não nulo, a lei de controle \overline{u}_p pode ser escolhida como sendo um controle proporcional mais um termo de antecipação (*feedforward*), de acordo com a Equação (5).

Assim, a equação do erro do sistema em malha fechada passa a ser expressa por:

$$\dot{e} + K_p e = 0 \quad (12)$$

Sendo K_p uma matriz positiva definida, e o ponto de equilíbrio $e = 0$ assintoticamente estável.

3. DESCRIÇÃO DO ROBÔ

O robô utilizado nesse trabalho (Figura 3) possui uma estrutura composta por *Depron*, *MDF* e *ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)*. Na tabela 1 encontram-se os parâmetros de Denavit-Hartenberg *standard*, que foram obtidos a partir da representação geométrica do robô, conforme apresentada na Figura 1.

O controle das juntas foi efetuado pelo Arduino Mega 2560, para otimizar o tempo de resposta, uma vez que o controle pelo MATLAB® não seria possível, devido a morosidade na comunicação serial com o computador. Os potenciômetros dos servomotores possibilitam a amostragem da posição angular de cada junta do robô, por meio das portas analógicas do Arduino. A plataforma do Arduino também é responsável por enviar os sinais de controle de cada junta do robô.



Figura 3 – Robô manipulador de 6 GDL.

Tabela 1 – Parâmetros de Denavit-Hartenberg.

Elo	a_i [cm]	α_i	d_i [cm]	θ_i
1	0	90°	0	θ_1
2	19.2	0	0	θ_2
3	0	90°	0	θ_3

4	0	-90°	10.8	θ_4
5	0	90°	0	θ_5
6	0	0	8.5	θ_6

As principais características das juntas do robô estão resumidas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características gerais das juntas.

Junta	Alcance [°]	Velocidade do servo sem carga [°/ms]
θ_1	± 90	0.30
θ_2	0 ... +165	0.37
θ_3	-25 ... +90	0.30
θ_4	± 90	0.50
θ_5	-55 ... +90	0.35
θ_6	± 90	0.35

4. ESPAÇO DE TRABALHO

O espaço de trabalho pode ser definido como todos os pontos que podem ser alcançados pelo efetuador ao movimentar as juntas do robô. Com base na geometria do robô (Figura 1) e nos limites de deslocamento das juntas (Tabela 2), os discentes implementaram um *script* em MATLAB® para plotar o espaço de trabalho do robô. O *script* possibilitou posicionar o robô em diferentes configurações, nas quais se alterou uma variável de junta por vez, gerando trajetórias que representavam o volume total coberto pelo efetuador, de acordo com o algoritmo apresentado por Siaviccio e Siciliano (2000) para a projeção do espaço de trabalho do robô planar de dois elos. Por questão de simplificação deste *script*, não se considerou os movimentos angulares das juntas do punho esférico. O espaço de trabalho identificado pelos alunos encontra-se ilustrado na Figura 4.

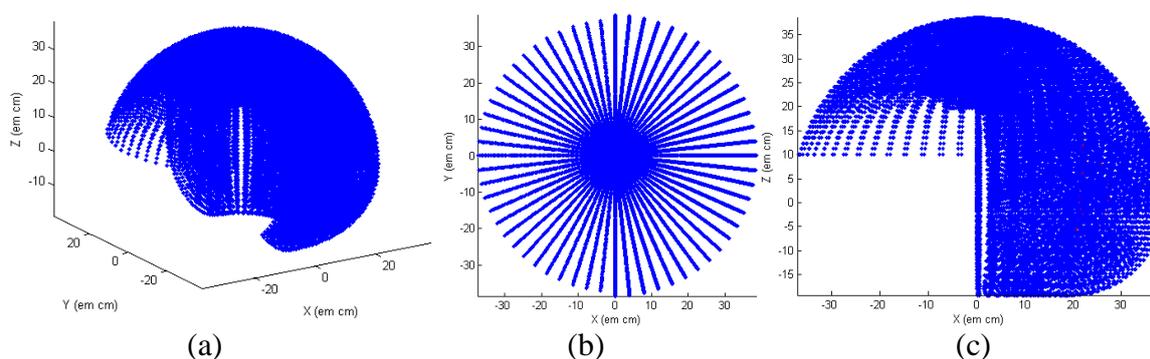


Figura 4 – (a) O espaço de trabalho do robô; (b) A visão superior do espaço de trabalho; (c) A visão lateral do espaço de trabalho.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DE SIMULAÇÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados experimentais e de simulação que foram alcançados para o controle cinemático de posição. Ao todo foram realizadas duas trajetórias, sendo uma linear e outra circular dentro do espaço de trabalho do robô.

O período de amostragem foi de 30 [ms] e cada uma das trajetórias foi dividida em 80 pontos. A matriz K_p utilizada no controle de ambas as trajetórias, possuía uma diagonal com o ganho dado por 10.

5.1. Trajetória linear

Os resultados experimentais e de simulação para a execução de trajetória linear no espaço estão apresentados nas Figuras 5 a 8. As velocidades angulares das juntas ficaram abaixo de 45°/s na simulação do controle cinemático, e alcançaram até 60°/s nos resultados experimentais. O erro médio dos resultados experimentais para a trajetória linear foi de 0,79 [cm].

Na Figura 5 encontra-se o resultado de simulação e experimental para a trajetória linear. Na Figura 6, temos os resultados das velocidades angulares das três primeiras juntas do robô ao longo da trajetória linear, e na Figura 7, estão apresentadas as variações das posições angulares de cada uma dessas juntas ao longo desta trajetória. Na Figura 8, estão apresentados os erros em X, Y e Z ao longo da trajetória que foi executada.

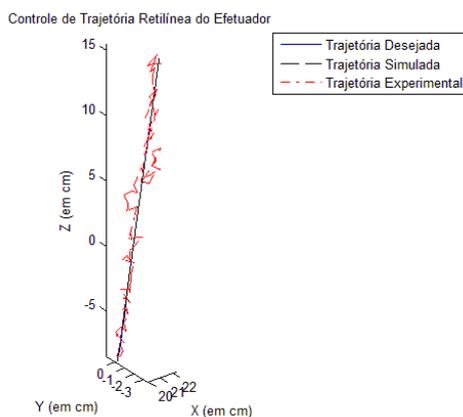


Figura 5 – Comparação entre os resultados de simulação e experimental para a trajetória linear.

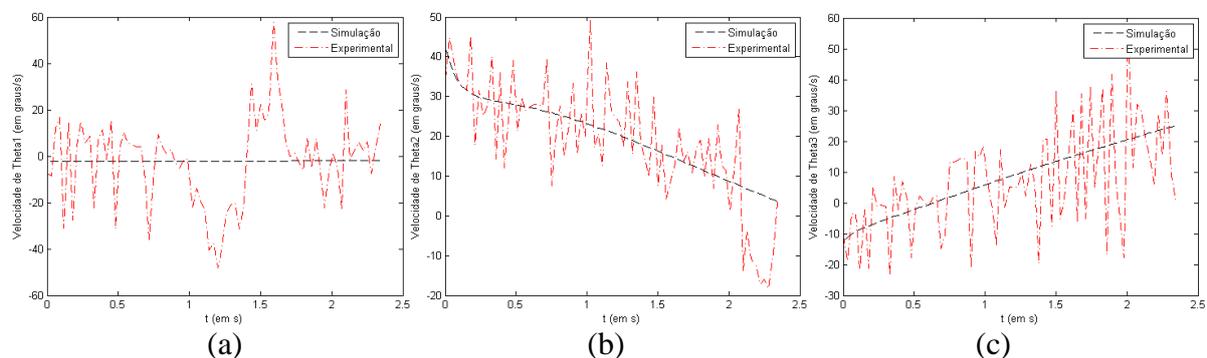


Figura 6 – (a) Variação da velocidade angular da junta 1 na trajetória linear; (b) Variação da velocidade angular da junta 2 na trajetória linear; (c) Variação da velocidade angular da junta 3 na trajetória linear.

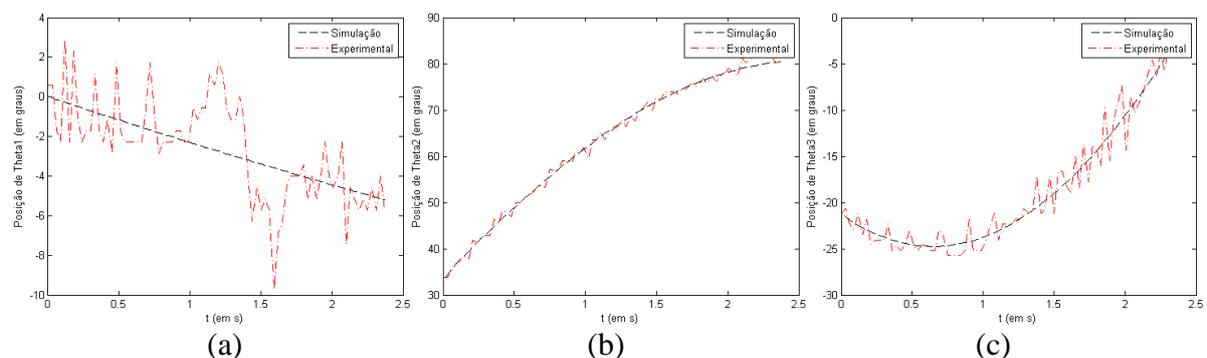


Figura 7 – (a) Variação da posição angular da junta 1 na trajetória linear; (b) Variação da posição angular da junta 2 na trajetória linear; (c) Variação da posição angular da junta 3 na trajetória linear.

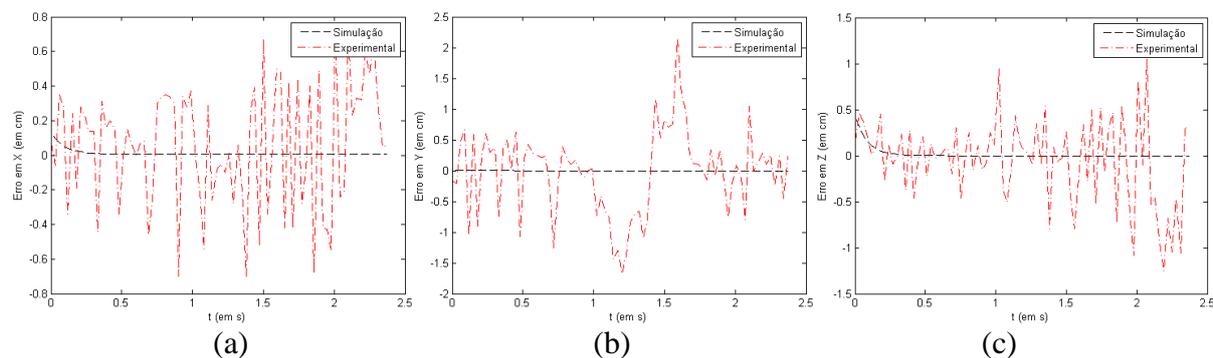


Figura 8 – (a) Variação do erro no tempo ao longo do eixo X na trajetória linear; (b) Variação do erro no tempo ao longo do eixo Y na trajetória linear; (c) Variação do erro no tempo ao longo do eixo Z na trajetória linear.

5.2. Trajetória circular

Os resultados experimentais e de simulação para a execução de trajetória circular no espaço estão apresentados nas Figuras 9 a 12. As velocidades angulares das juntas ficaram abaixo de $80^\circ/\text{s}$ na simulação do controle cinemático, e alcançaram até $60^\circ/\text{s}$ nos resultados experimentais. O erro médio dos resultados experimentais para a trajetória circular foi de $0,99$ [cm].

Na Figura 9 encontra-se o resultado de simulação e experimental para a trajetória circular. Na Figura 10, temos os resultados das velocidades angulares das três primeiras juntas do robô ao longo da trajetória circular, e na Figura 11, estão apresentadas as variações das posições angulares de cada uma dessas juntas ao longo desta trajetória. Na Figura 12, estão apresentados os erros em X, Y e Z ao longo da trajetória que foi executada.

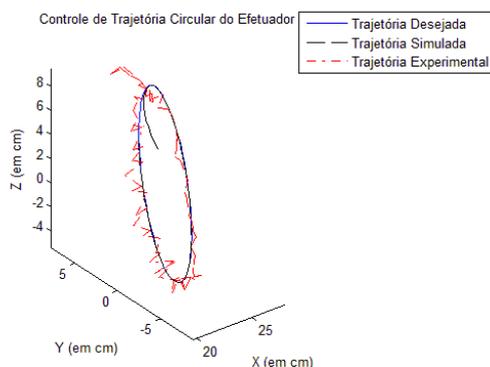


Figura 9 – Comparação entre os resultados de simulação e experimental para a trajetória circular.

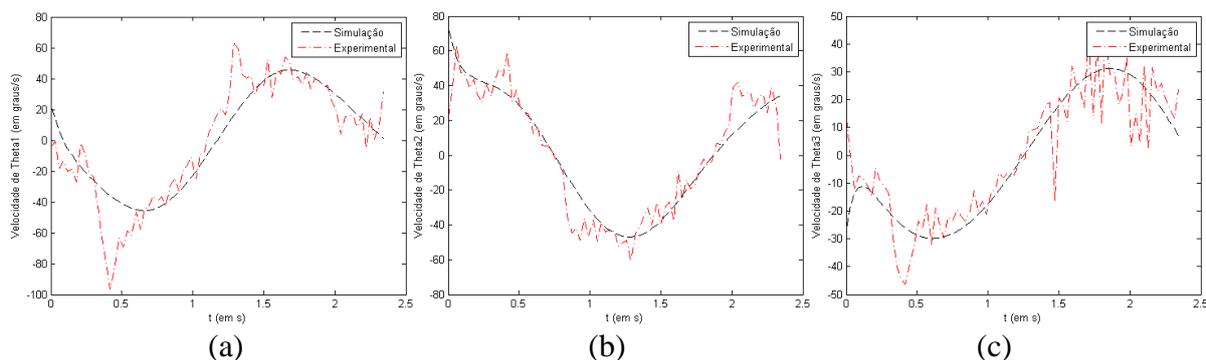


Figura 10 – (a) Variação da velocidade angular da junta 1 na trajetória circular; (b) Variação da velocidade angular da junta 2 na trajetória circular; (c) Variação da velocidade angular da junta 3 na trajetória circular.

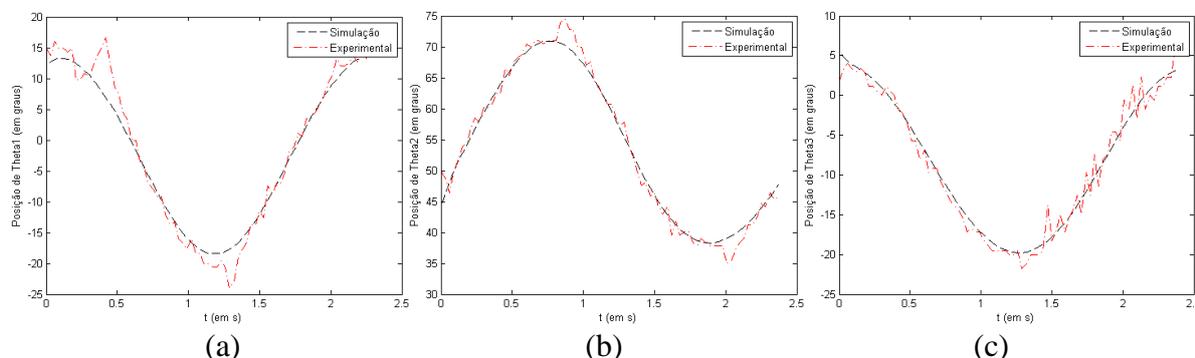


Figura 11. (a) Variação da posição angular da junta 1 na trajetória circular; (b) Variação da posição angular da junta 2 na trajetória circular; (c) Variação da posição angular da junta 3 na trajetória circular.

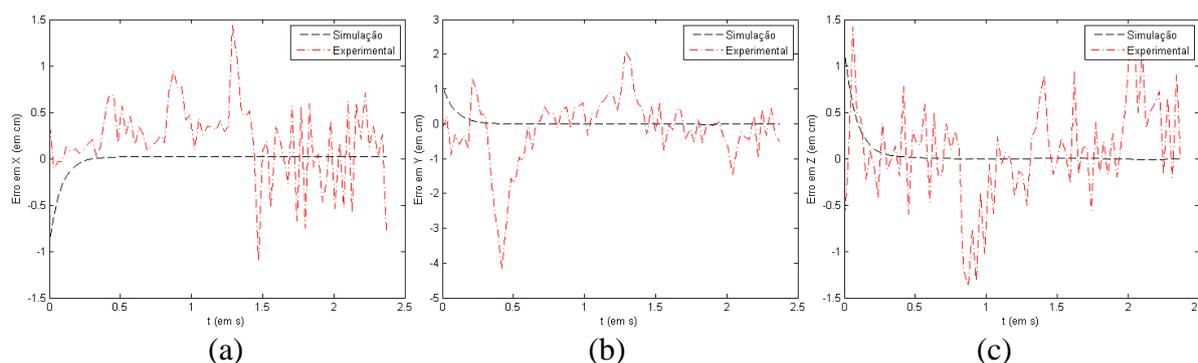


Figura 12. (a) Variação do erro no tempo ao longo do eixo X na trajetória circular; (b) Variação do erro no tempo ao longo do eixo Y na trajetória circular; (c) Variação do erro no tempo ao longo do eixo Z na trajetória circular.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho relatamos a experiência de implementação de controle cinemático de posição em uma plataforma robótica de baixo custo, que foi desenvolvida por alunos de graduação na disciplina de Elementos de Robótica. O custo do robô foi de aproximadamente R\$ 650 (incluindo a plataforma *Arduino Mega 2560*).

Os resultados experimentais foram satisfatórios, e foram fundamentais na motivação dos estudantes, pela prática do projeto, construção e programação de um robô de 6 GDL, auxiliada pelo conteúdo da disciplina que foi apresentado em sala de aula.

Para que fosse possível executar o projeto no semestre letivo, algumas simplificações foram determinadas, e.g., o uso de servomotores no manipulador, que facilitou a montagem mecânica, e o controle de velocidade de cada junta que foi efetuado pelo Arduino.

Em trabalhos futuros, deseja-se implementar o controle cinemático, que contemple o controle de orientação do efetuador, para uma dada trajetória a ser efetuada pelo robô.



Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a todos os alunos que se dedicaram ao desenvolvimento do robô, bem como à Fundação Gorceix que apoiou este projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COCOTA, J. A. N. et al. Desenvolvimento de um robô antropomórfico com punho esférico para práticas de robótica com alunos de graduação. *SBAI/DINCON*, Fortaleza. 2013.

COELHO, L. S.; VALLIM M. B. R. Uma abordagem multidisciplinar de robótica móvel em cursos de tecnologia e de engenharia. COBENGE, Porto Alegre, RS. 2001.

INOVA ENGENHARIA. Propostas para a modernização da educação em engenharia no Brasil. Brasília, pp. 43-44. 2006.

SIAVICCO, L.; SICILIANO, B. Modelling and Control of Robot Manipulators. Great Britain: Springer. 2000.

SPONG, M. W.; HUTCHINSON, S.; VIDYASAGAR, M. Robot Modeling and Control. 1st edition, USA, John Wiley & Sons. 2005.

KINEMATIC CONTROL OF AN ANTHROPOMORPHIC ARM WITH SPHERICAL WRIST

Abstract: An important part in learning basic robotics is the hands-on study in this course. However, robotic manipulators for educational purposes are onerous on the market. This project focuses on continuing the construction and control of a low-cost anthropomorphic robot, which helps on learning theoretical concepts studied during Elements of Robotics course. The Arduino and MATLAB® are used for the kinematic control and human-interfacing (HMI) of a robot manipulator with six degrees of freedom, respectively.

Keywords: Anthropomorphic robot with spherical wrist, MATLAB, Arduino, Kinematic control.