

DESENVOLVIMENTO DE UM ROBÔ ANTROPOMÓRFICO COM PUNHO ESFÉRICO PARA PRÁTICAS DE ROBÓTICA COM ALUNOS DE GRADUAÇÃO

JOSÉ ALBERTO NAVES COCOTA JUNIOR, RÚBEN CHRISTIAN BARBOSA, ALBERT DIAS MOREIRA, VINICIUS LAGE

*Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais (DECAT),
Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)
UFOP, Campus Morro do Cruzeiro, Escola de Minas, DECAT, Ouro Preto, MG – CEP35400-000
E-mails: cocota@em.ufop.br, rubenchristianbarbosa@hotmail.com,
albert-dm@outlook.com, viniciusop@gmail.com*

Abstract— Nowadays, dropping out of engineering courses practically occurs in all universities of the world. Over the past few years, active learning has been recognized by the educational community as the most effective learning method. In this paper we will discuss the educational experience associated with the design and development of a low-cost robot manipulator with six degrees of freedom to motivate the students of Control and Automation Engineering during a semester of Industrial Robotics subject. In addition, the activities in which the students participated during the execution of this work are presented. The robot developed could be used as a platform for the research and teaching of robotics.

Keywords— Fixed robot manipulator, education, kinematics.

Resumo— Hoje em dia, a evasão dos cursos de engenharia ocorre praticamente em todas as universidades do mundo. Ao longo dos últimos anos, a aprendizagem ativa tem sido reconhecida pela comunidade educacional como o método de aprendizagem mais eficaz. Neste artigo vamos discutir a experiência educacional associada à concepção e desenvolvimento de um robô manipulador de baixo custo com seis graus de liberdade para motivar os alunos de Engenharia de Controle e Automação, durante um semestre da disciplina de Elementos de Robótica. Além disso, são apresentadas as atividades efetuadas pelos alunos durante a execução do trabalho. O robô desenvolvido pode ser utilizado como uma plataforma para pesquisa e ensino de robótica.

Palavras-chave— Robô manipulador fixo, educação, cinemática.

1 Introdução

A robótica é um campo relativamente novo da tecnologia moderna que cruza as fronteiras tradicionais de engenharia. De acordo com Spong et al. (2005), a robótica envolve o estudo da engenharia elétrica, engenharia mecânica, engenharia industrial e de sistemas, ciência da computação, economia e matemática. Devido à natureza multidisciplinar desse campo, o ensino de robótica é mais efetivo quando conceitos teóricos são associados a experimentos tangíveis. Fazer essa associação tornar-se efetiva requer uma maneira pragmática de aplicação do material tradicional de robótica em trabalhos de laboratórios motivadores (Wood, 2008).

Nos últimos anos, tem se tornado cada vez mais comum o uso de robôs como plataformas experimentais nas universidades e nos institutos de pesquisa. Entretanto, a maioria dos sistemas disponíveis é destinada à robótica móvel e há poucas empresas que desenvolvem robôs manipuladores para cursos de robótica industrial. No catálogo da Quanser (2013) existem disponíveis três modelos de robôs, sendo dois em cadeia cinemática fechada (o Hexapod e o robô planar de 2 graus de liberdade – GDL) e um em cadeia cinemática aberta (Omni Bundle). Como os sistemas da Quanser são caros para as universidades dos países em desenvolvimento, Galvan et al. (2006) propôs o uso do LEGO® MINDSTORMS® devido ao seu custo acessível, permitindo aos alunos adquirir experiência no projeto cinemático de robôs manipuladores fixos. Embora tenha sido um esforço no sentido de ampliar o acesso a experiências práticas

de robótica, o kit de robótica produzido pela LEGO® não é adequado para o ensino e pesquisa na universidade, devido às suas limitações de hardware. Mais recentemente, Cocota et al. (2012) desenvolveu um robô manipulador de baixo custo com 4 GDL, que permitiu explorar os conceitos básicos de robótica industrial com os alunos de graduação, e.g., cinemática direta, cinemática inversa de posição e programação de trajetória por ponto-a-ponto.

Neste artigo apresenta-se o desenvolvimento de um manipulador em série (i.e., os elos são dispostos em uma cadeia cinemática aberta) com 6 GDL e uma garra de dois dedos. Este trabalho é um aprimoramento do efetuado no passado (Cocota et al., 2012), com o incremento do número de graus de liberdade do robô, o controle da velocidade angular de cada junta, a implementação da cinemática inversa de orientação, e a identificação da precisão e repetibilidade do robô. Os cálculos de cinemática direta e inversa são realizados em MATLAB®, sendo a comunicação do microcomputador com os sistemas embarcados efetuada pela interface USB.

2 Metodologia

Para a execução deste projeto com os alunos de graduação foi utilizado a metodologia de aprendizagem baseada em problemas (Problem Based Learning - PBL), na qual o aprendizado é centrado no aluno, que deixa de ser o receptor passivo, para ser o principal responsável pelo seu aprendizado.

Neste trabalho os alunos da disciplina de Elementos de Robótica foram desafiados a projetarem e construir um robô manipulador antropomórfico com um punho esférico e um efetuador do tipo garra. Para que o sucesso na execução desse trabalho fosse alcançado em um semestre letivo, foi importante simplificar os requisitos dos projetos mecânico e eletrônico do robô, e.g., o uso de servomotores e da plataforma Arduino.

3 Projeto

As atividades relacionadas ao projeto e à construção do robô foram realizadas por cinco grupos de estudantes da disciplina de Elementos de Robótica do curso de graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). É importante destacar que a escolha dos materiais, dos componentes e da linguagem de programação foi de responsabilidade dos alunos, dando a eles maior liberdade. Dessa forma, buscou-se estimular a criatividade dos alunos e promover o trabalho em equipe.

As atividades de cada grupo requeriam um certo grau de interação com os demais grupos. O grupo 1 ficou responsável pelo projeto e construção do braço antropomórfico, bem como pelo acionamento das juntas do braço. O grupo 2 ficou responsável pelo projeto e construção do punho esférico, bem como pelo acionamento das juntas do punho e da garra de dois dedos. O grupo 3 ficou responsável pela amostragem da posição angular das juntas do robô, bem como do ângulo de abertura da garra. O grupo 4 ficou responsável pelo desenvolvimento de uma interface gráfica do usuário em MATLAB para práticas de cinemática direta e inversa. O grupo 5 ficou responsável pela determinação do espaço de trabalho e simulação da cinemática direta e inversa usando o Toolbox de Robótica para o MATLAB (Corke, 2013). Os dois primeiros grupos também implementaram o controle em malha aberta da velocidade angular de cada junta do robô.

3.1 Componentes e Estrutura do Robô

O robô desenvolvido possui 6 GDL, sendo classificado quanto a sua geometria como um manipulador antropomórfico com um punho esférico. Um modelo em CAD da estrutura do manipulador é apresentado na Fig. 1.

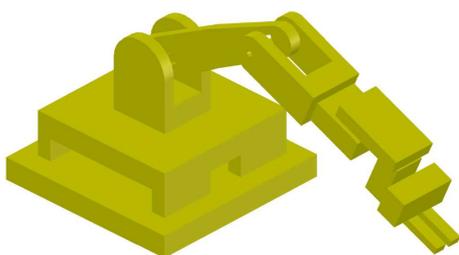


Fig. 1. Modelo em CAD 3D do robô.

A garra e os elos que compõem a estrutura do robô foram confeccionados com Depron, que é um poliestireno extrudado. Esse material apresenta a densidade nominal de $40 [kg/m^3]$. Foram utilizados três modelos de servomotores que são comumente empregados em aeromodelos. Nas três primeiras juntas do robô foram utilizados o servomotor TowerPro MG995, para a rotação do corpo, para o movimento do braço e do antebraço do robô. Para o movimento das juntas do punho foram utilizados três servomotores Futaba S3003, e para o acionamento da garra foi utilizado o servomotor TowerPro Sg90. A Fig. 2 mostra o robô que foi desenvolvido.

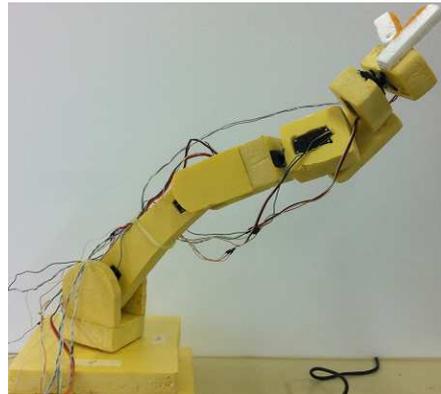


Fig. 2. Robô antropomórfico com punho esférico e garra.

3.2 Hardware

Para o acionamento das juntas do robô e a leitura de suas respectivas posições angulares foram utilizados duas plataformas de Arduino. Os grupos 1 e 2 optaram pelo Arduino MEGA 2560 para acionar os servomotores (Fig. 3). Por sua vez, o grupo 3 usou o Arduino Nano para medir as posições angulares das juntas, através da amostragem das saídas analógicas dos potenciômetros dos servomotores (Fig. 4). Para uma melhor amostragem das posições angulares, quando o robô encontrava-se em uma determinada configuração estática, o Arduino Nano realizava uma média aritmética de dez leituras do sinal analógico do potenciômetro de cada servomotor.

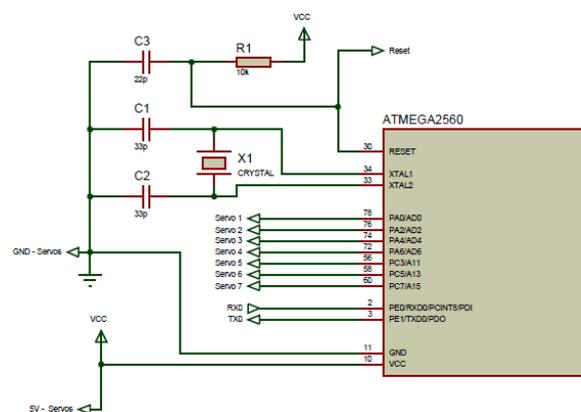


Fig. 3. Diagrama esquemático do Arduino MEGA 2560 para comando dos servomotores.

Os alunos desenvolveram um protocolo próprio de comunicação, que possibilitou a troca de dados entre as duas plataformas Arduino e o microcomputador pela porta USB.

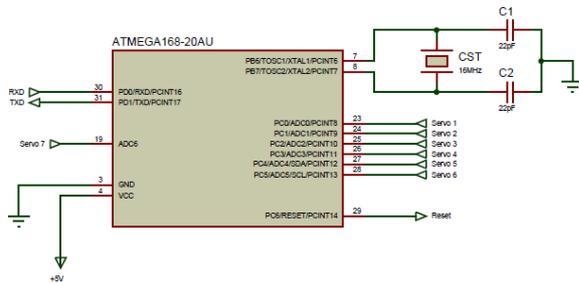


Fig. 4. Diagrama esquemático do Arduino Nano para a amostragem dos sinais analógicos dos potenciômetros.

3.3 Cinemática Direta

A cinemática direta permite determinar a posição e a orientação do efetuador em função das variáveis das juntas do robô. É possível realizar essa análise fixando um sistema de coordenadas em cada elo. Para fazer isso de forma sistemática, a versão *standard* da convenção de Denavit-Hartenberg (DH) foi utilizada. Os parâmetros de DH (Tab. 1) foram encontrados a partir da geometria do robô (Fig. 5), e consistem em um conjunto de quatro quantidades, que descrevem a posição e orientação de um sistema de coordenadas de um elo em relação ao sistema de coordenadas do elo precedente ao longo da cadeia cinemática.

Os parâmetros de DH standard são definidos como:

- a_i – distância entre z_{i-1} e z_i ao longo de x_i ;
- α_i – ângulo entre z_{i-1} e z_i ao redor de x_i ;
- d_i – distância entre x_{i-1} e x_i ao longo de z_{i-1} ;
- θ_i – ângulo entre x_{i-1} e x_i ao redor de z_{i-1} .

Uma vez que todas as juntas do robô são de rotação, somente os θ_{is} são variáveis.

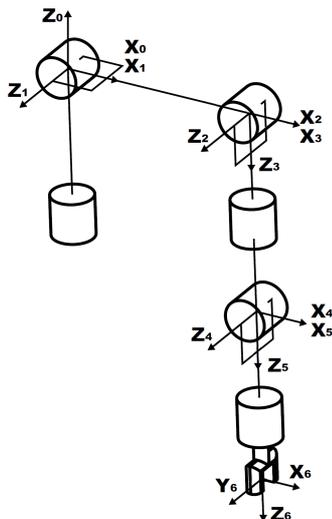


Figura 5. Representação da posição inicial do robô de acordo com a convenção de Denavit-Hartenberg.

Tabela I – Parâmetros de Denavit-Hartenberg.

Elo	a_i [cm]	α_i [°]	d_i [cm]	θ_i [°]
1	0	90	0	θ_1
2	20	0	0	θ_2
3	0	90	0	θ_3
4	0	-90	17.5	θ_4
5	0	90	0	θ_5
6	0	0	14	θ_6

A partir dos parâmetros de DH, o grupo 4 escreveu um script em MATLAB para calcular a transformada homogênea que fornece a posição e a orientação do efetuador em relação ao sistema de coordenadas base.

3.3 Cinemática Inversa

A cinemática inversa possibilita determinar as variáveis das juntas em função da posição e orientação do efetuador. O conhecimento da solução do problema de cinemática inversa é indispensável para o controle de trajetória ponto-a-ponto. Quando a posição do centro do efetuador não é alterada com o movimento das suas juntas, é possível utilizar o método de desacoplamento cinemático (Fig. 6), que permite dividir o problema da cinemática inversa em dois problemas mais simples, conhecidos, respectivamente, por cinemática inversa de posição (em função das juntas do braço), e cinemática inversa de orientação (em função das juntas do punho). Esse é o caso de nosso robô, que possui um punho esférico, no qual os eixos das suas três juntas interceptam num mesmo ponto (Fig. 5).

A partir da posição do efetuador e de sua orientação, é possível determinar a posição do centro do punho (p_c) pela seguinte expressão

$$p_c = p_e - d_6 z_6 \tag{1}$$

onde p_e é a posição do centro do efetuador ($p_e = p_{06}$).

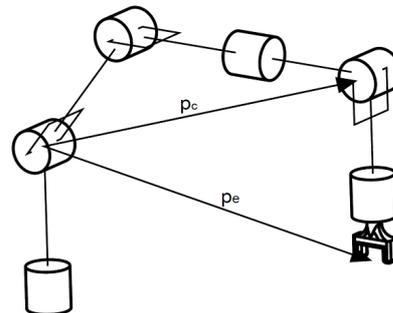


Figura 6. Desacoplamento cinemático. Onde p_c é o centro do punho e p_e é a posição do centro do efetuador.

Uma vez conhecida a posição do centro do punho ($p_c = [p_x, p_y, p_z]$), é possível determinar as variáveis de junta do braço (Fig. 7) por cinemática inversa de posição, a partir das seguintes aproximações geométricas

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \text{atan2}(p_y, p_x) \\ \theta_3 &= \text{atan2}\left(\pm\sqrt{1-D^2}, D\right) \\ \theta_2 &= \text{atan2}(p_z, r) \mp \text{atan2}(a_3s_3, a_2 + a_3c_3) \end{aligned} \quad (2)$$

onde $D = \frac{r^2 + p_z^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3}$, $s_3 = \text{sen}(\theta_3)$ e $c_3 = \text{cos}(\theta_3)$.

A orientação do cotovelo (abaixo ou acima) é determinada de maneira a respeitar os limites dos deslocamentos angulares de θ_2 e θ_3 . As principais características das juntas do robô estão resumidas na Tabela II.

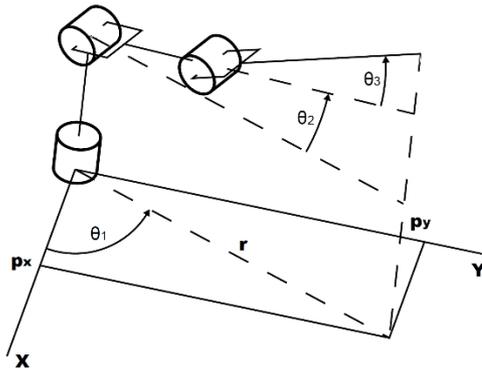


Figura 7. Cinemática inversa de posição.

Tabela II – Características gerais das juntas

Junta	Alcance [°]	Velocidade servo sem carga [°/ms]
θ_1	± 90	0.46
θ_2	0 – 180	0.46
θ_3	± 75	0.46
θ_4	± 90	0.32
θ_5	± 90	0.32
θ_6	0 – 180	0.32

Uma vez encontrada a orientação do centro do punho em relação a base (R_{03}), a partir das variáveis de junta do braço (θ_1, θ_2 e θ_3), pode-se determinar a orientação do efetuador em relação ao centro do punho (R_{36}), desde que conhecida a orientação do efetuador em relação a base (R_{06}), pela seguinte expressão

$$R_{36} = R_{03}^T R_{06} \quad (4)$$

Sendo a matriz de rotação R_{36} dada por

$$R_{36} = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & c_4s_5 \\ \cdot & \cdot & s_4s_5 \\ -s_5c_6 & s_5s_6 & c_5 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Para que a representação do robô pela cinemática direta, tenha a mesma configuração da cinemática inversa (braço totalmente estendido), é necessário atualizar o valor da variável da junta 3 ($\theta_3 = \theta_3 + 90^\circ$) no cálculo da matriz de orientação R_{03} .

De acordo com Siaviccio e Siciliano (2000), como as juntas do punho esférico estão na configuração dos ângulos de Euler (ZYZ), suas variáveis de junta podem ser determinadas pela cinemática inversa de orientação pela seguinte relação

$$\begin{aligned} \theta_4 &= \text{atan2}(r_{23}, r_{13}) \\ \theta_5 &= \text{atan2}\left(\sqrt{r_{13}^2 + r_{23}^2}, r_{33}\right) \\ \theta_6 &= \text{atan2}(r_{32}, -r_{31}) \end{aligned} \quad (6)$$

onde r_{ij} são os elementos da linha i , coluna j de (5).

Existindo uma singularidade para $s_5 = 0$ (quando $\theta_5 = 0, \pm 180^\circ, \dots$).

3.4 Interface Gráfica do Usuário

Para as práticas de cinemática direta e cinemática inversa, uma interface gráfica do usuário (GUI) foi criada. A GUI foi desenvolvida através da Toolbox GUIDE do MATLAB.

O usuário pode optar pelo modo de cinemática direta (Fig. 8), na qual o microcomputador requisita ao circuito do Arduino Nano os valores dos ângulos de cada junta do manipulador para uma dada configuração do robô no espaço. Depois de realizar as medidas, os dados são transmitidos ao microcomputador, que calcula a transformada homogênea e fornece a posição e orientação do efetuador expressas em coordenadas da base.



Figura 8. Interface para prática de cinemática direta.

Essa interface também é utilizada para a programação de trajetória pelo método de aprendizagem por movimento ponto-a-ponto. As posições e orientações obtidas pela interface de cinemática direta são armazenadas em uma matriz, que pode ser utilizada na prática de cinemática inversa.

No modo de cinemática inversa (Fig. 9), o usuário pode encontrar as variáveis da junta do robô para uma dada posição e orientação fornecida pelo usuário, ou utilizar as posições e orientações identificadas pela interface de cinemática direta. Uma vez encontradas as variáveis de junta do robô, o software envia à plataforma Arduino MEGA 2560 as posições angulares de referência dos servomotores para cada configuração desejada do robô no espaço.



Figura 9. Interface para prática de cinemática inversa.

Uma terceira interface possibilita ao usuário o acionamento de cada junta do robô, bem como configurar a velocidade angular de cada junta do robô (Fig. 10).

A arquitetura do *software* do microcomputador, bem como suas interfaces de comunicação com as plataformas Arduino Nano e Arduino MEGA 2560 está representada na Fig. 11.



Figura 10. Interface para o acionamento das juntas e configuração das velocidades angulares.

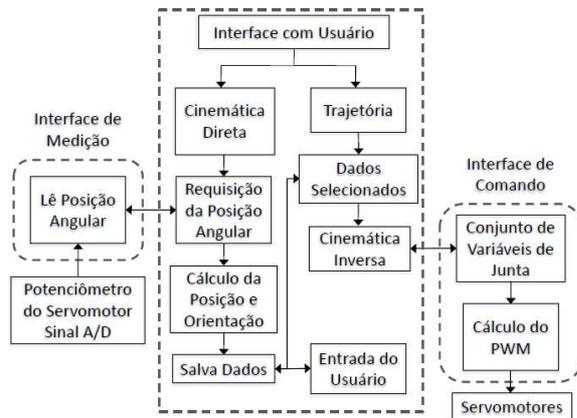


Figura 11. A arquitetura do *software*.

4 Resultados

O principal resultado deste trabalho foi a motivação dos alunos pela prática do projeto, construção e programação de um robô de 6 GDL, auxiliada pelo conteúdo da disciplina de Elementos de Robótica que foi apresentado em sala de aula.

Para a análise do desempenho da plataforma de robótica que foi desenvolvida, foram realizados dez ensaios de posicionamento do robô para o mesmo ponto e orientação no espaço. O robô apresentou boa repetibilidade e moderada precisão (Fig. 12). A precisão do robô foi de 5,1 [cm].

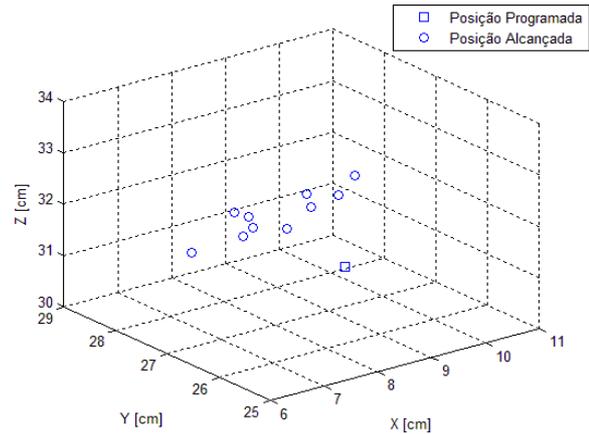


Figura 12. Ensaios para a determinação da repetibilidade e precisão do robô.

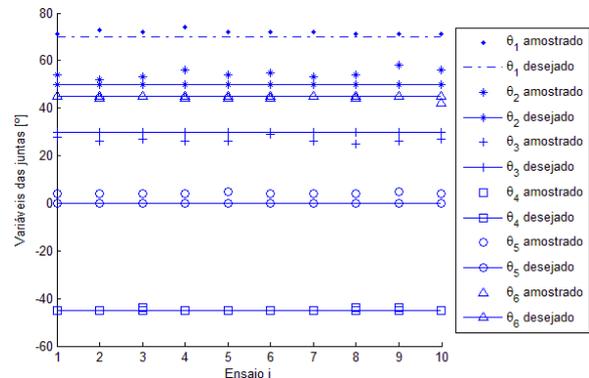


Figura 13. Ensaios para a determinação da repetibilidade e precisão do posicionamento angular das juntas do robô.

Para complementar a análise foi identificada a precisão e repetibilidade do posicionamento angular de cada junta do robô (Fig. 13). Observou-se que o maior erro ocorreu na junta responsável pelo levantamento do braço do robô, que apresentou o erro de 8° no nono ensaio. Para esses ensaios, a velocidade angular de cada servomotor (sem carga) foi fixado em 30^{-1} [°/ms].

5 Conclusões

Neste trabalho relatamos a experiência do emprego da metodologia de aprendizagem baseada em problemas (PBL) para o desenvolvimento de um robô antropomórfico com punho esférico na disciplina de Elementos de Robótica. A execução desse trabalho possibilitou explorar conceitos básicos de robótica com os alunos de graduação, e.g., cinemática direta, cinemática inversa, programação de trajetória por ponto-a-ponto, precisão e repetibilidade de manipulador.

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 posição de cada junta. Todas as fases do desenvolvimento do manipulador e suas relações com a disciplina de Elementos de Robótica foram apresentadas. O custo do robô foi de

aproximadamente R\$ 500 (incluindo as plataformas Arduino).

Em trabalhos futuros, deseja-se melhorar a precisão e repetibilidade do robô, para uma posterior implementação do controle de trajetória do efetuador. Os servomotores que apresentaram maior erro no posicionamento angular, poderão ser substituídos para melhorar o desempenho do robô. As posições angulares amostradas poderão ser realimentadas em um sistema que permita o controle em malha fechada da velocidade angular de cada junta do robô.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a todos os alunos que se dedicaram ao desenvolvimento do projeto, em especial ao aluno Ruggeri Oliveira Sales Azeredo que contribuiu com a elaboração das ilustração do robô, bem como à Fundação Gorceix que apoiou este projeto.

Referências Bibliográficas

- Cocota, J. A. N. J.; Fujita, H. S. and Silva, I. J. (2012). A Low-cost Robot Manipulator for Education. IEEE-TAEE 2012, pp. 164-169.
- Corke, P. (2013) *Robotics Toolbox*. [Online] Available from: www.petercorke.com. [Accessed: 4th Feb 2013]
- Galvan, S.; Botturi, D.; Castellani, A. and Fiotini, P. (2006). Innovative Robotics Teaching Using Lego Sets. IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom., pp. 721–726.
- Quanser Consulting Inc. (2013) *Mechatronics Controls Collection*. [Online] Available from: www.quanser.com. [Accessed: 22th Feb 2013]
- Siavico, L. and Siciliano, B., (2000) Modelling and Control of Robot Manipulators. Great Britain: Springer. DOI: [10.1007/978-1-4471-0449-0](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0449-0)
- Spong, M. W., Hutchinson, S. and Vidyasagar, M., (2005) Robot Modeling and Control. USA: John Wiley & Sons.
- Wood, R. J. (2008). Robotic Manipulation Using an Open-Architecture Industrial Arm: A Pedagogical Overview. IEEE Robot. Autom. Mag., pp. 17–18. DOI: [10.1109/MRA.2008.928281](https://doi.org/10.1109/MRA.2008.928281)