

ESTUDO DE SISTEMÁTICA DE ANÁLISE DE DESEMPENHO DE ROBÔ MANIPULADOR DIDÁTICO

Marconi Silva Vaz de Mello, marvmello@gmail.com¹
Walter de Britto Vidal Filho, wbritto@unb.br¹

¹Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Depto. de Engenharia Mecânica, Brasília-DF.

Resumo: O emprego de robôs manipuladores didáticos em ensino é muito importante porque os manipuladores industriais apresentam riscos devido as suas inércias e velocidades elevadas. Devido ao custo dos robôs manipuladores didáticos importados, a opção de construí-los nas instituições de ensino se tornou atraente. Uma vantagem adicional do projeto e construção desses manipuladores nas instituições de ensino é a pesquisa em sistemáticas de projeto desses sistemas. Uma dificuldade observada após o projeto e construção do protótipo é quantificar o atendimento do protótipo as especificações iniciais de projeto. Para isso é importante o emprego de sistemáticas normatizadas de avaliação do desempenho de manipuladores. O presente trabalho visa estudar as sistemáticas de avaliação de desempenho de robôs manipuladores e apresentar um procedimento de aplicação da sistemática ao caso de um robô didático.

Palavras-chave: Manipulador, desempenho, metodologia.

1. INTRODUÇÃO

O ensino da robótica de manipuladores vem crescendo devido ao crescimento do uso dos mesmos nas empresas. O emprego de manipuladores industriais apresenta risco devido as suas grandes inércias e velocidades. O choque destes com um ser humano podem causar injúrias severas. Com intuito de evitar esse risco, se faz importante o emprego de robôs didáticos. A arquitetura fechada dos robôs industriais dificulta seu emprego no ensino. O custo também é um limitador do emprego de robôs industriais em atividades de ensino. Um robô didático pode custar 10 vezes menos que um robô industrial típico.



Figura 1. Protótipo do robô didático estudado.

Normas para robôs industriais já foram usadas para analisar desempenho de robôs didáticos (Costa Neto et al., 2012). Algumas normas estabelecem que os parâmetros de avaliação dependam da atividade principal do manipulador desta forma, deve-se analisar seu desempenho segundo características necessárias a uma atividade. Geralmente as sistemáticas são adaptadas aos robôs didáticos. Em Costa Neto et al.(2012) considerou-se que um robô didático teria os mesmo requisitos de um robô industrial para movimentação de peças. Na fig.1 pode ser observado o protótipo do robô didático desenvolvido em Reis et al.(2016) que é estudado neste artigo. O presente trabalho visa estudar as sistemáticas de avaliação de desempenho de robôs e apresentar um procedimento de aplicação das sistemáticas ao caso de um robô didático.

2. SISTEMÁTICAS DE ANÁLISE DE DESEMPENHO

As sistemáticas para avaliar o desempenho de robôs manipuladores devem seguir uma referência para gerar valores que sirvam de parâmetros de comparação entre diferentes manipuladores. Alguns fabricantes desenvolveram condições de teste próprias, enquanto outros adotam testes definidos em normas como as estabelecidas pelo American National Standard Institute (ANSI) ou definidas na International Standard Organization (ISO). A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) não publicou uma norma específica para análise de desempenho de manipuladores, adotando as normas da ISO nessa área, segundo Rosário (2010). Em busca no site da ABNT também constatou-se a falta de norma nacional sobre robôs industriais. As principais normas ANSI para robôs segundo Costa Neto et al. (2012) e Rosário (2010) são: American National Standards for Industrial Robots and Robot Systems – Point-to-point and Static Performance Characteristics – Evaluation (ANSI R15.05-1, 1990) e a American National Standards for Industrial Robots and Robot Systems – path-related and dynamic performance characteristics – evaluation (ANSI R15.05-2, 1992). A primeira mede os parâmetros do efetuator terminal em posições estáticas, enquanto a segunda mede características dinâmicas, ou seja, durante a trajetória.

As principais normas ISO segundo Costa Neto et al. (2012) são: Manipulating Industrial Robots – Performance Criteria and Related Test Methods (ISO 9283, 1998) e a ISO TR 13309, Manipulating Industrial Robots – Informative Guide on Test Equipment and Metrology Methods of Operation for Robot Performance Evaluation in Accordance with ISO (ISO TR 13309, 1995).

O resultado da análise de desempenho pode variar quando calculado por uma norma ou por outra. Segundo Rosário (2010), a metodologia de cálculo da precisão segundo a ANSI indica uma precisão maior do que quando calculada pela metodologia ISO. Enquanto o cálculo da repetibilidade segundo ANSI apresenta um valor menor do que quando calculada pela norma ISO (Rosário, 2010). Isso mostra a dificuldade de padronizar uma avaliação de desempenho. Para este trabalho foi escolhida a norma ISO como referência porque é adotada pela ABNT (Rosário, 2010).

A norma ISO 9283:1998 estabelece condições a serem utilizadas nos testes. O ponto de partida é um cubo virtual de teste inscrito no espaço de trabalho do robô (fig.2), este é a referência para as posturas e percursos a serem utilizados no teste. Esse cubo com lados paralelos aos eixos do sistema de coordenadas da base do robô deve ser localizado na parte mais utilizada do espaço de trabalho e deve ter o maior volume possível. A incerteza na instrumentação não deve ultrapassar 25% da magnitude da característica que está sendo testada.

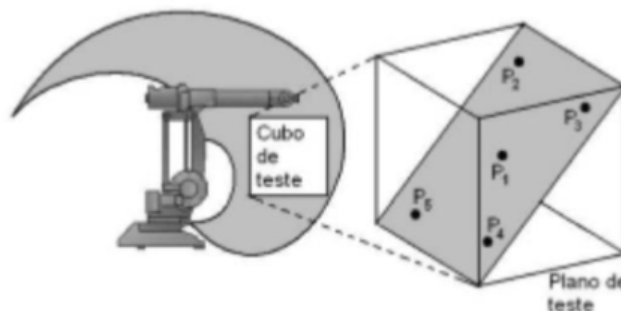


Figura 2. Cubo de teste inscrito no volume de trabalho do robô (Mello, 2016).

A postura é entendida na norma como a posição espacial do efetuator terminal (x,y,z) e sua orientação (roll, pitch, yaw). Entende-se por tendência de postura (AP) a diferença entre a postura comandada e a média das posturas atingidas que pode ser dividida em tendência de posicionamento e de orientação. Cada ciclo corresponde a posicionar um mesmo ponto do efetuator terminal nos pontos do cubo de P5 a P1 (fig.2). A norma recomenda 30 ciclos. A repetibilidade de postura (RP) expressa a proximidade entre as posições alcançadas para a mesma postura comandada após várias repetições ou ciclos. É dada pelo raio da esfera centrada no baricentro do grupo de pontos atingidos e pela faixa de três desvios padrão (3σ) das medidas angulares em torno dos valores médios dos ângulos de orientação. A tendência (AD) e repetibilidade (RD) de distância quantificam, respectivamente, o erro na distância entre posturas comandadas e posturas atingidas, e as flutuações na distância para uma série de movimentos repetidos entre as posturas. Para este teste se usam as posições P2 e P4 no cubo. O tempo mínimo de posicionamento é outra variável que corresponde ao tempo entre a partida de uma postura à chegada a outra postura. O tempo de estabilização se caracteriza pela rapidez com que o robô pode parar em uma postura atingida. O sobrepasso mede a capacidade do robô realizar paradas suaves e precisas nas posturas atingidas, mede o comprimento máximo de oscilação do efetuator quando atinge a postura comandada. A flexibilidade estática corresponde ao deslocamento do efetuator quando submetido a carga de trabalho.

3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

Existem várias técnicas e dispositivos de medição que podem ser empregados para medir desempenho, dependendo dos testes desejados, segundo a norma ISO. Para medições estáticas podem ser usados, além dos dispositivos para medições dinâmicas, os seguintes sistemas:

- Sistema cubo-berço de sensores;
- Sistema laser tracking;
- Sistema laser scanning;
- Sistema teodolitos digitais;
- Sistema por imagem de duas câmeras;
- Sistema inercial;
- Sistema com máquina de medir por coordenadas;
- Sistema com braço de medição.

Observa-se que máquinas de medição por coordenadas, como a apresentada na fig. 3, já foram empregadas para medir o desempenho de manipuladores didáticos (Costa Neto, 2012). O uso desta máquina apresenta dificuldades para alcançar pontos encobertos que só podem ser atingidos contornando objetos.



Figura 3. Máquina de medição por coordenadas (MMC, 2018).

Para realizar as medições espaciais, ou seja, as coordenadas x, y e z do efetuador, foi utilizado um braço articulado de medições da Romer (fig. 4). As características desse braço são incerteza do erro apalpação de $\pm 16 \mu\text{m}$, Incerteza da medição volumétrica de $\pm 60 \mu\text{m}$ e diâmetro do apalpador de 6 mm. Apesar do Laboratório de Metrologia possuir uma máquina de medição de coordenadas, como usada em Costa Neto et al.(2012), observou-se que um braço de medição permite medições em alguns pontos difíceis de serem alcançados por uma máquina cartesiana.



Figura 4. Braço de medição de coordenadas.

Uma ponteira foi montada no efetuador terminal do robô para facilitar a medição, como mostrado na fig.5. Na norma ISO existe uma tabela que indica os principais testes a serem feitos segundo a tarefa principal do robô. Robôs didáticos não são contemplados nesta norma, portanto, procurou-se uma tarefa parecida a que o robô didático iria realizar. O robô se enquadra melhor nas categorias de movimentação de materiais, portanto, conforme a tabela da norma, os testes principais que devem ser realizados são: Tendência/Repetibilidade de Postura, Deslocamento na

tendência/repetibilidade de postura, Tendência/Repetibilidade de distância, Tempo de Estabilização, Sobrepasso, Tempo mínimo de posicionamento e Flexibilidade estática. O Tempo de estabilização e Sobrepasso não foram analisados devido a necessidade de um sistema de medição dinâmico.

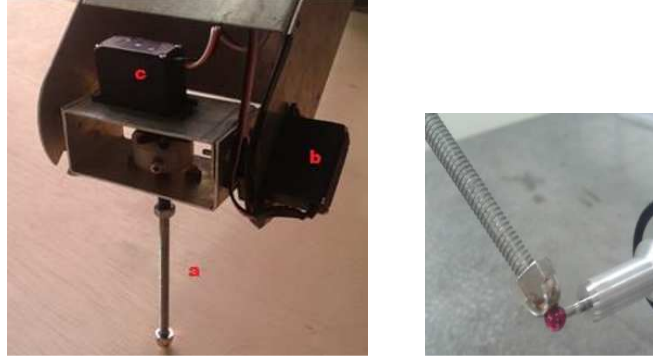


Figura 5. Ponteira no efetuador do robô e apalpador.

Na extremidade da ponteira fixada no efetuador terminal foi usinado uma superfície côncava de diâmetro próximo do apalpador de forma que se consiga tocar a ponteira numa mesma posição.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

No cálculo da tendência e repetibilidade de postura foram utilizadas as equações abaixo segundo a ISO 9283. A norma estabelece que a cada postura adquirida uma medição deve ser realizada.

$$AP_p = \sqrt{(AP_x)^2 + (AP_y)^2 + (AP_z)^2} \quad (1)$$

$$AP_x = \bar{x} - x_c \quad (2)$$

$$AP_y = \bar{y} - y_c \quad (3)$$

$$AP_z = \bar{z} - z_c \quad (4)$$

Onde $\bar{x}$, $\bar{y}$ e $\bar{z}$ são as médias das posições obtidas e x_c , y_c e z_c são as posições comandadas. A repetitividade de posicionamento é calculada como:

$$RP_l = \bar{l} + 3S_l \quad (5)$$

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j \quad (6)$$

$$l_j = \sqrt{(\bar{x} - x_j)^2 + (\bar{y} - y_j)^2 + (\bar{z} - z_j)^2} \quad (7)$$

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n - 1}} \quad (8)$$

A tendência e a repetibilidade de orientação para o ângulo de arfagem (b) pode ser calculada conforme as equações a seguir.

$$AP_b = \sqrt{(\bar{b} - b_{c_i})^2} \quad (9)$$

$$RP_b = \pm 3S_b = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (b_j - \bar{b})^2}{n-1}} \quad (10)$$

A tabela 1 observa-se os valores obtidos na análise experimental do posicionamento e orientação.

Tabela 1. Tendência e repetibilidade de postura.

Postura	Tendência Posicionamento [mm]	Repetibilidade Posicionamento [mm]	Tendência Orientação [°]	Repetibilidade Orientação [°]
P5	$AP_p = 2.2189$ $AP_y = -0.3811$ $AP_x = -1.405$ $AP_z = 2.1858$	RP = 23.7215	$AP_\theta = 1$	$RP_\theta = \pm 2.76$
P4	$AP_p = 3.6637$ $AP_y = -2.323$ $AP_x = 2.3957$ $AP_z = 1.5093$	RP = 33.992	$AP_\theta = 0.14$	$RP_\theta = \pm 4.01$
P3	$AP_p = 7.4497$ $AP_y = 0.7953$ $AP_x = -7.0515$ $AP_z = 2.2679$	RP = 39.9517	$AP_\theta = 3.28$	$RP_\theta = \pm 5.18$
P2	$AP_p = 4.0306$ $AP_y = -1.8179$ $AP_x = -2.7942$ $AP_z = 2.2679$	RP = 43.1565	$AP_\theta = 3.28$	$RP_\theta = \pm 5.18$
P1	$AP_p = 2.5745$ $AP_y = -1.4335$ $AP_x = 3.0591$ $AP_z = -1.7517$	RP = 37.2627	$AP_{\theta_i} = 6.71$	$RP_{\theta_i} = \pm 5.18$

A tendência e a repetibilidade de distâncias são calculadas, respectivamente, como:

$$AD_p = \bar{D} - D_c \quad (9)$$

$$RD_p = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_j - \bar{D})^2}{n-1}} \quad (10)$$

Onde $\bar{D}$ é a média das distâncias obtidas, D_c a distância comandada e D_j a j-ésima distância obtida. Similarente é calculada a tendência e a repetibilidade de orientação:

$$AD_b = \bar{b} - \theta_b \quad (11)$$

$$RD_b = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (b_{bj} - \bar{D}_b)^2}{n-1}} \quad (12)$$

Tabela 2 Resultados dos testes de tendência e repetibilidade de distância

AD_p [mm]	RD_p [mm]	AD_b [°]	RD_b [°]
19.5804	28.1406	2	0.82

Também foram medidos o tempo mínimo de posicionamento e a flexibilidade estática.

Tabela 3. Flexibilidade estática

	+x	-x	+y	-y	+z	-z
Distância [mm]	8,413951	8,344464	7,080973	7,888557	8,690022	10,38052

Para obter os deslocamentos devido à flexibilidade, empregou-se uma força equivalente a carga de trabalho nas três coordenadas (x,y,z). Observa-se que a rigidez do robô é baixa pela tabela 3, o que resulta em um deslocamento alto devido a flexibilidade mediante carga. Esta rigidez não é só devido à estrutura, mas também devido aos elementos de transmissão e atuadores.

5. CONCLUSÃO

Dificuldades em aplicar a norma para avaliar o desempenho de um robô foram observadas. Uma dificuldade está na utilização do sistema de medição para medir os parâmetros de acordo com a norma adotada. Observou-se que o manipulador desenvolvido em Reis e Vidal Filho (2016) apresentou um desempenho abaixo do esperado. O robô possui uma acurácia satisfatória para aplicações didáticas nas posições de teste, entre 2 e 7 mm, contudo a sua repetibilidade representa uma dispersão das medidas em um raio muito grande, entre 23 e 43 mm. Uma boa acurácia indica que a modelagem cinemática e o sistema de controle foram feitos corretamente, porém a baixa repetibilidade aponta erros principalmente em sua estrutura. Uma análise da estrutura e elementos de transmissão será feita em trabalhos futuros. Para aplicações didática é importante utilizar técnica e dispositivos de medição com custos menores. Um trabalho futuro a ser realizado é o desenvolvimento de uma sistemática que empregue um dispositivo de medição de baixo custo que atenda ao grau de precisão que se deseja medir.

6. AGRADECIMENTOS

Ao laboratório de metrologia do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB pelo apoio na realização das medições.

7. REFERÊNCIAS

- Cosa Neto, E. F.; Rolim, T. L., 2012, Almeida Pinto, A. M. “Sistemática para Avaliação de Desempenho do Manipulador Robótico Educacional de 5 graus de Liberdade Utilizando Máquina de Medição por Coordenada para Aplicação em Movimentação de Peças”, CONEM - VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, São Luís, MA.
- Rosário, J. M., 2010, “Robótica Industrial I: Modelagem, Utilização e Programação”. Ed. Barauna, São Paulo.
- Reis, W. F.; Vidal Filho, W. B., 2016, “Projeto e Construção de Robô Manipulador Articulado de 5GDL para Aplicações de Ensino”. IX CONEM - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Fortaleza.
- Vidal Filho, W. B., Mello, O. P. M.; Rocha, E. S. A.; Vidal, L. F. C. S., 2017, “Design, Analysis and Software Correction for the Performance of a SCARA Robot”, COBEM- 24th International Congress of Mechanical Engineering, Curitiba.
- Mello, M. S. V., 2016 “Análise de Desempenho e Melhorias em Robô Manipulador”, Trabalho de Graduação, Universidade de Brasília.
- ISO TR 13309, “Manipulating industrial robots - Informative guide on test equipment and metrology methods of operation for robot performance evaluation in accordance with ISO 9283”, International Organization for Standardization, Switzerland, 1995.
- MMC, 2018. “Máquina de medição tridimensional”. Acessado em 20 março. 2018 site: <<http://www.abcm.org.br/journal/index.shtml>>.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

SYSTEMATIC STUDY OF DIDACTIC ROBOT PERFORMANCE ANALYSIS

Marconi Silva Vaz de Mello¹, marvmello@gmail.com
Walter de Britto Vidal Filho¹, wbritto@unb.br

¹Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Depto de Engenharia Mecânica, Brasília -DF.

Abstract. *The use of didactic manipulator robots is very important in teaching activities because industrial manipulators have a great risky due to their inertia and high speeds. The cost of imported didactic robot manipulators is expensive, so the option of building them in educational institutions became thriving. An additional advantage of the design and construction of these manipulators in educational institutions is the systematic design research of these systems. The present work aims to study the performance evaluation systematics of manipulator robots and present a procedure to apply the systematics to the case of a didactic robot. Considering the difficulties above mentioned, a prototype was designed and constructed. It was difficult to quantify the attendance of the prototype to the initial design specifications. To solve this problem, it is important to use standardized systematics to evaluate the performance of manipulators. Therefore, an evaluation system was developed and tested.*

Keywords: *Manipulator, performance, methodology.*