



PROJETO E CONSTRUÇÃO DE MAQUETES DIDÁTICAS PARA ENSINO DE CINEMÁTICA DE MANIPULADORES ROBÓTICOS

Mônica Raquel Alves – www.monicaalves@hotmail.com

Carla Luiza Rannov – carlaluiza96@hotmail.com

Odmartan Odmartan Ribas Maciel – odeijui@hotmail.com

Roberta Goergen – betinhamtm@gmail.com

Antonio Carlos Valdiero – valdiero@unijui.edu.br

Carlos Augusto Valdiero - carlos_valdiero@hotmail.com

Luiz Antonio Rasia – rasia@unijui.edu.br

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUI),

Av. Rudi Franke, 540 – Caixa postal 121

CEP 98280-000 – Panambi – RS

Resumo: Este trabalho apresenta uma proposta metodológica para o processo de ensino-aprendizagem da modelagem cinemática de manipuladores robóticos por meio da construção e uso de maquetes de estruturas robóticas. A modelagem cinemática de robôs trata da relação matemática entre as variáveis das juntas robóticas e a posição e a orientação do efetuador final (garra robótica ou ferramenta), a qual é muito importante para o planejamento da tarefa a ser realizada pelo robô, sua programação e seu controle. Entretanto há uma dificuldade no ensino-aprendizagem da cinemática de robôs devido à complexidade na definição dos sistemas coordenados de referência nos elos do robô e nas formulações de álgebra linear. O objetivo é construir e utilizar um kit modular de maquetes que facilitem a visualização e o entendimento na aprendizagem da cinemática de robôs. Como resultados foram desenvolvidos seis tipos de cadeias cinemáticas de manipuladores robóticos: Gantry, SCARA, Cilíndrico, Esférico, Antropomórfico e Cartesiano, os quais foram utilizados na aplicação da metodologia de modelagem cinemática baseada na convenção de Denavit-Hartenberg. Conclui-se que esta proposta contribui de forma simples, barata e prática para a solução dos problemas enfrentados no ensino da robótica quanto ao entendimento dos graus de liberdade, tipo de movimento, tipos de juntas, definição dos sistemas de referência e verificação do resultado da modelagem, já que muitas vezes o protótipo industrial de um manipulador robótico não está disponível em sala de aula.

Palavras-chave: Manipuladores robóticos, Maquetes didáticas, Ensino da robótica.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos cursos de engenharia é possível perceber a dificuldade das estudantes em contextualizar os estudos de ciências (principalmente matemática, álgebra e física) com a visualização e a compreensão de fenômenos relacionados aos problemas da

Organização



UDESC
UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE
SANTA CATARINA



Promoção





mecânica clássica. Neste contexto, o curso de Engenharia Mecânica da UNIJUÍ tem entre os seus diferenciais de destaque a sua metodologia de ensino e a sua inserção nos desafios da sociedade, considerando a teoria e a prática como um todo único do saber (VALDIERO *et al.*, 2006). E com este intuito, ocorreu a evolução de uma proposta de solução na forma de um kit de maquetes (modelos reduzidos) de estruturas robóticas clássicas (BEHNEN *et al.*, 2016) na forma de um objeto pedagógico que facilite a aprendizagem de cinemática de robôs industriais e o desenvolvimento do raciocínio lógico e criativo.

Segundo Chen *et al.* (2013), os robôs industriais têm várias vantagens sobre os trabalhadores manuais tradicionais, tanto no espaço de trabalho quanto para tarefas altamente repetitivas. A utilização de robôs é numerosa, trazendo com eles o aumento da produtividade, a melhoria e a consciência na qualidade final de um produto, a minimização de operações e a facilidade na programação dos robôs. De acordo com Missiaggia (2014), a estrutura mecânica de um manipulador é constituída de corpos rígidos, conectados a juntas, que conferem movimentos relativos entre elos adjacentes. De acordo com o tipo de junta ligada ao elo, obtêm-se uma diferente estrutura serial, proporcionam diferentes espaços e volumes de trabalho do efetuador final, os manipuladores robóticos podem apresentar diferentes anatomias em relação à cadeia cinemática, as quais variam conforme seus tipos de juntas e o número de elos. Dependendo do número de elos e do tipo das juntas de um manipulador robótico, obtêm-se o espaço de trabalho que é definido como o conjunto de pontos onde se pode posicionar o efetuador final (garra robótica ou ferramenta). Conforme Paatz (2008), o espaço de trabalho depende do tipo, do número e da configuração das juntas do robô. Três graus de liberdade são necessários para o efetuador final alcançar um ponto num espaço tridimensional de trabalho. Existem disponíveis no mercado diferentes tipos de robôs seriais, onde estes podem ser classificados quanto a sua estrutura cinemática em cartesiana, em Gantry, cilíndrica, esférica e articulada (SCARA ou antropomórfica).

O estudo e aprendizagem da cinemática de robôs (SCIAVICCO e SICILIANO, 1996) permite a determinação da relação matemática entre as variáveis das juntas robóticas e a posição e orientação do efetuador final (garra robótica ou ferramenta). Na cinemática estudam-se a velocidade, a aceleração e as demais derivadas de ordem superior das variáveis de posição. Assim, o estudo da cinemática dos manipuladores refere-se a todas as propriedades geométricas e às propriedades do movimento dependentes do tempo. O primeiro passo para a modelagem é a escolha do sistema de referência dos elos, geralmente baseada na convenção de Denavit-Hartenberg (SCIAVICCO e SICILIANO, 1996). Então, podem-se determinar os parâmetros de Denavit-Hartenberg (D-H), o cálculo das matrizes de transformação homogênea, as equações da cinemática e a matriz Jacobiana do robô. Tal modelagem cinemática é muito importante para fins do planejamento da tarefa a ser realizada pelo robô, sua programação e seu controle.

A seção 2 apresenta a metodologia adotada neste trabalho. Na seção 3 são apresentados os resultados. As considerações finais e perspectivas futuras na seção 4 e por fim as referências bibliográficas.

Organização



UDESC
UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE
SANTA CATARINA



Promoção

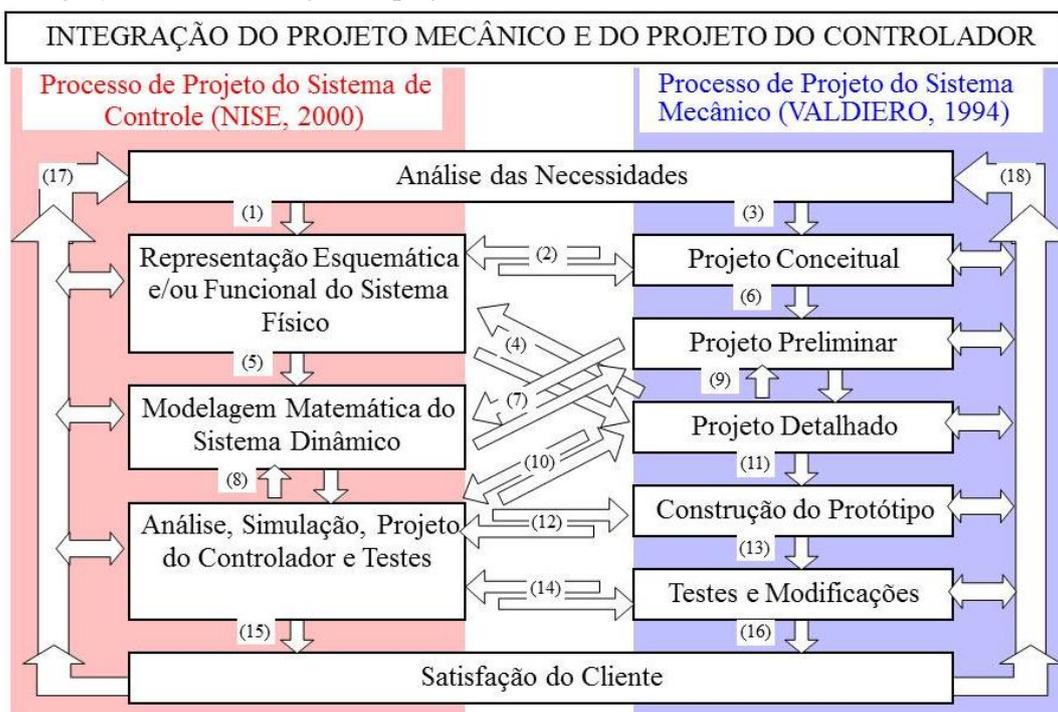




2. METODOLOGIA

O projeto foi desenvolvido no Núcleo de Inovação em Máquinas Automáticas e Servo Sistemas (NIMASS) da UNIJUÍ, Campus Panambi. Partindo de um levantamento de dados e informações a respeito das necessidades e das funcionalidades que o projeto das maquetes exigiria. Foi verificada a necessidade de modelos reduzidos para auxiliar na melhor compreensão da metodologia de modelagem cinemática de manipuladores robóticos, numa interação entre acadêmicos de engenharia na disciplina de “Robótica Industrial” e mestrandos e doutorandos em Modelagem Matemática na disciplina de “Modelagem Cinemática de Robôs Industriais”, ambos da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (ALVES *et al.*, 2016). A metodologia utilizada no projeto e construção de maquetes didáticas para ensino de cinemática de manipuladores robóticos segue as etapas propostas por Valdiero e Rasia (2016), ilustrada na Figura 1, a qual deve ser consultada durante a descrição sucinta de suas fases.

Figura 1. Diagrama esquemático da metodologia de projeto de manipuladores robóticos: integração das metodologias de projeto de sistemas mecânicos e de sistemas de controle.



A partir da fase de Análise das Necessidades, a metodologia de projeto do controlador pode ser dividida nas seguintes fases propostas por NISE (2000):

- **Representação esquemática e/ou funcional do sistema físico:** com base nos requisitos e nas especificações de desempenho (1) requerido do controlador, do projeto conceitual do sistema mecânico (2) e também de informações do detalhamento (4) dos componentes mecânicos, tem-se nesta fase a descrição do sistema físico. Pode-se construir um diagrama de blocos funcional ou uma representação esquemática dos componentes elétricos e/ou mecânicos para melhor visualização. Esta fase resulta no conhecimento do sistema físico.



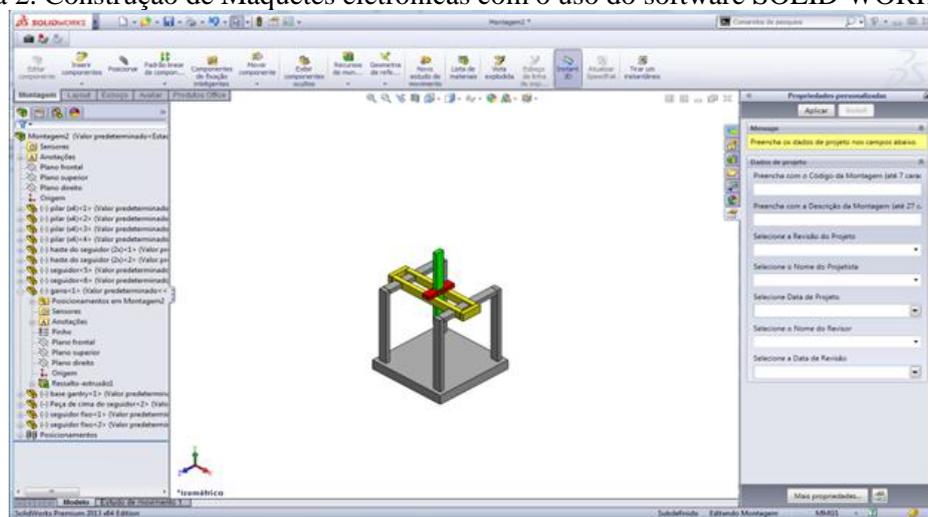
- **Modelagem matemática do sistema dinâmico:** a partir do conhecimento do sistema físico (5), aplicam-se leis físicas (de Newton, balanço de energia, entre outras) e ferramentas de tratamento (linearização, transformada de Laplace, entre outros métodos matemáticos), obtendo-se as representações do sistema na forma de variáveis de estado, de modelos não lineares e lineares, de funções de transferência, entre outras formas de representação do comportamento dinâmico do sistema (diagrama de fluxo-sinal, etc.). Esta fase interage com o projeto preliminar (7) dos elementos de máquina e obtém uma estimativa dos parâmetros nominais do sistema modelado.
- **Análise, simulação, projeto do controlador e testes:** tendo como entrada a modelagem (8) realizada na fase anterior, pode-se utilizar técnicas de controle linear e não linear, análise de sensibilidade, análise de estabilidade, ferramentas de CACSD (*Computer Aided Control System Design* – projeto do sistema de controle auxiliado por computador) e instrumentação de testes com o objetivo de obter um controlador de desempenho satisfatório e seguro. Esta fase possui relações com o projeto detalhado (10), a construção (12) e os testes (14) do protótipo, através dos quais são aferidos os parâmetros do sistema, especificados os sensores e demais componentes físicos do sistema de controle, além dos ajustes dos ganhos do controlador. Ou seja, nesta fase ocorre o desenvolvimento, a implementação e a validação dos controladores propostos.

Se os resultados dos testes são satisfatórios para ambos controlador (15) e sistema mecânico (16), então tem-se a fase de uso e testes pelo usuário em campo, e nesta fase final, os indicadores do grau de satisfação do cliente são importantes informações, as quais devem ser realimentadas em todo processo, (17) e (18), visando melhorias no projeto.

No contexto desta metodologia, o presente trabalho tratou do desenvolvimento de um kit de maquetes didáticas como objeto educacional para ensino da modelagem cinemática de robôs industriais (SCIAVICCO e SICILIANO, 1996).

Desenvolveu-se inicialmente o projeto de maquetes eletrônicas em CAD (MACIEL *et al.*, 2016) com o uso do software SOLID WORKS2013, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2. Construção de Maquetes eletrônicas com o uso do software SOLID WORKS2013.



Organização



Promoção





Neste software foi possível realizar a simulação de movimentos e o projeto de melhorias, e também a estimativa de parâmetros relacionados à estrutura dos robôs, tais como medidas de dimensões e do momento de inércia dos elos.

A segunda etapa do projeto foi construir o protótipo físico das maquetes em escala reduzida até então construídas por meio eletrônico. Madeira e parafusos foram utilizados como matéria-prima padrão. A Figura 3 ilustra a etapa da construção das maquetes.

Figura 3. Execução do projeto de objeto educacional em robótica para interação graduação, mestrado e doutorado.



Posteriormente, com os protótipos já construídos foi executado o desmembramento de cada componente para efetuar a pintura dos mesmos. A pintura foi realizada de acordo com o sentido do movimento de cada componente, o que será explanado mais adiante. A Figura 4 demonstra a etapa de pintura.

Figura 4. Pintura dos componentes de cada robô



A partir das maquetes foi possível facilitar o estudo e o entendimento da cinemática do robô, onde é essencial o entendimento dos sistemas de coordenadas X_i , Y_i e Z_i , em cada o elo i . Com tal propósito, foram adaptados eixos coloridos juntamente setas na ponta, identificando a direção e o sentido de cada eixo do sistema de referência dos elos.

Organização



Promoção





3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como resultados tem-se um conjunto de maquetes eletrônicas e físicas em escala reduzida que facilitaram o entendimento dos graus de liberdade, tipo de movimento, tipos de juntas, definição dos sistemas de referência e verificação do resultado da modelagem dos principais tipos de estruturas cinemáticas de robôs industriais. Entre os manipuladores construídos, estão presentes dois tipos de juntas às prismáticas (P) e as juntas rotativas (R). As juntas prismáticas possuem movimento de translação, já as juntas Rotativas tem o movimento de rotação. Ao todo foram desenvolvidas seis maquetes eletrônicas e físicas de manipuladores: Gantry (3P), Cartesiano (3P), Cilíndrico (1R2P), Esférico (2R2P), SCARA (2R1P) e o Antropomórfico (3R), mostrados respectivamente nas Figuras 5 e 6.

Figura 5. Desenho do kit de maquetes eletrônicas das estruturas típicas dos robôs.

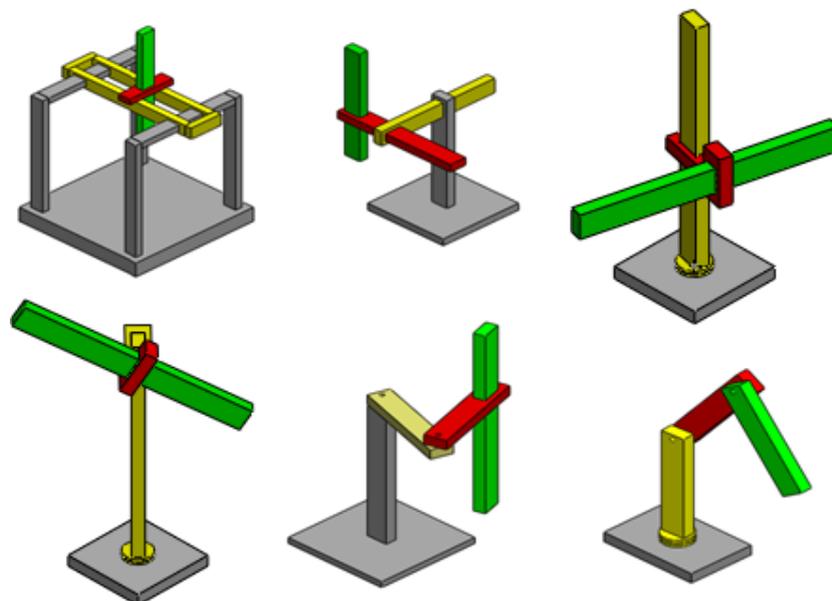
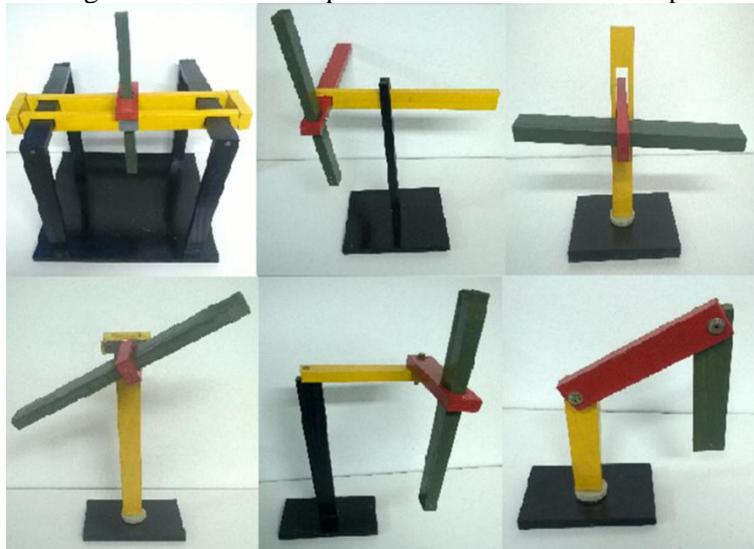


Figura 6. Fotografias do kit de maquetes físicas das estruturas típicas dos robôs.



Organização



UDESC
UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE
SANTA CATARINA



Promoção

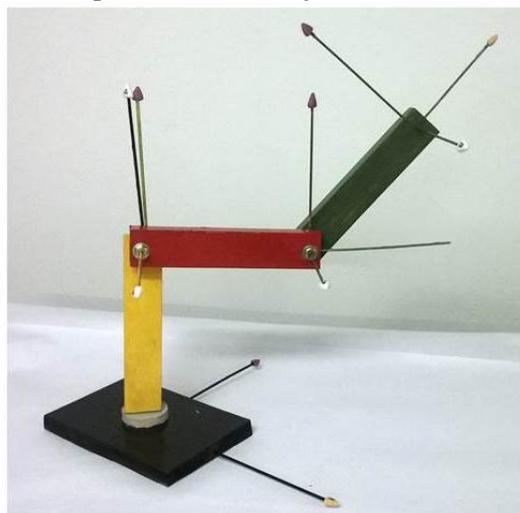
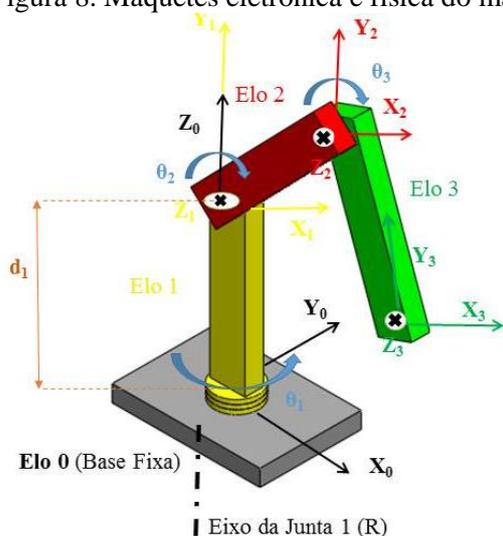


Associação Brasileira de Educação em Engenharia



Foi usada a distinção de cores entre os elos para cada robô (conforme mostrado nas figuras anteriores), uma vez que facilita a compreensão do movimento e a modelagem da de cada elo do manipulador robótico. Como exemplo ilustrativo da utilização do kit de maquetes de manipuladores robóticos para ensino da cinemática, tem-se o manipulador antropomórfico de 3 graus de liberdade, mostrado na Figura 8, com a representação dos eixos coordenados de cada sistema de referência em seu respectivo elo, conforme a convenção de Denavit-Hartenberg (SCIAVICCO e SICILIANO, 1996) utilizada para modelagem cinemática do robô. O Elo 0 é o elo fixo (base) e não possui movimento. Cada elo possui uma cor que corresponde à cor de seu sistema coordenado de referência.

Figura 8. Maquetes eletrônica e física do manipulador Antropomórfico (3R: 3 juntas rotativas).



Primeiramente, deve-se entender o que é um elo e uma junta, e posteriormente define-se o sistema de coordenados de referências dos elos de acordo com a convenção Denavit-Hartenberg (D-H), identificando assim os eixos Z_{i-1} ao longo do eixo da junta i , facilmente visualizado e compreendido com o uso das maquetes. Em seguida estabelece-se o eixo X_i é representado na normal comum entre Z_{i-1} e Z_i , no sentido de Z_{i-1} e Z_i , onde X_0 é livre; X_1 é a perpendicular entre Z_0 e Z_1 ; e X_2 é a perpendicular entre Z_1 e Z_2 , onde o estudante vai montando estes eixos na maquete de seu robô. Por último, para a determinação do eixo Y_i , que completa o sistema tridimensional de referência, deve-se observar a regra da mão direita.

Uma vez que os sistemas de coordenadas dos elos estejam estabelecidos, a posição e a orientação do sistema i com respeito ao sistema $i-1$ são especificadas pelos parâmetros D-H, conforme descritos em Sciavicco e Siciliano (1996), e daí por diante tem-se o cálculo das matrizes de transformação homogênea, as equações da cinemática e a matriz Jacobiana do robô. Note que o entendimento e a correta definição dos sistemas de coordenadas de referência são fundamentais para a sequencia de passos necessários na formulação da modelagem cinemática de um robô, e nesta parte do processo de aprendizagem o uso do kit de maquetes de estruturas de manipuladores robóticos tem sua principal função de facilitar a visualização e a verificação do resultado dos cálculos a partir do teste para dada configuração das variáveis de junta.



4. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

O estudo e desenvolvimento do kit didático de manipuladores robóticos para o uso com fins educacionais auxiliou na compreensão por parte dos mestrandos e doutorandos de Modelagem Matemática e dos acadêmicos de Engenharia Mecânica. Uma vez que os protótipos dos manipuladores robóticos industriais comercializados atualmente possuem custo elevado, sendo muitas vezes indisponíveis para universidades e centros de ensino. Deste modo a construção das maquetes contribuiu de forma significativa no processo de aprendizagem da teoria de robótica industrial e sua modelagem cinemática.

O desenvolvimento dos protótipos possibilitou facilidades para compreensão dos movimentos relativos entre os elos do manipulador robótico, para visualização dos eixos cartesianos nos sistemas de referência dos elos e para determinação dos parâmetros de Denavit-Hartenberg. Por consequência, conclui-se menor chance de erro na formulação das equações da cinemática, as quais são importantes para fins de planejamento de trajetória, simulação computacional e controle de posição do robô. Destas equações também se extraem informações importantes quanto a posição e velocidade dos elos e do efetuador final em relação aos outros elos e em relação à base fixa.

Conclui-se que o presente trabalho traz uma abordagem simples e dinâmica de projeto relacionado a sistemas mecatrônicos e manipuladores robóticos, facilitando desta forma o método didático de aprendizagem para os mestrandos e doutorandos do curso de Modelagem Matemática da UNIJUÍ. Como perspectivas futuras, pretende-se construir uma nova geração de maquetes das estruturas robóticas a partir das facilidades de prototipagem rápida, incluir o acionamento elétrico das juntas com motores de passo e o sistema de controle de baixo custo utilizando placas de Arduino.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil. Os autores também são agradecidos à FAPERGS, CNPq e UNIJUÍ pelas bolsas de iniciação científica e desenvolvimento tecnológico, à UNIJUÍ e ao FINEP pelo apoio na complementação do Núcleo de Inovação em Máquinas Automáticas e Servo Sistemas (NIMASS), por meio da Chamada Pública MCTI/FINEP/CT-INFRA - PROINFRA - 02/2014 - Equipamentos Multiusuários, Ref.: 0141/16 (Protocolo Eletrônico: 124), com a liberação de recursos para compra de equipamentos para construção de protótipos para pesquisas de mestrado e doutorado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M. R.; BEHNEN, V. L.; GOERGEN, R.; RITTER, D.; RASIA, L. A.; VALDIERO, A. C. **Mecatrônica como objeto de interação entre o curso de engenharia mecânica e o mestrado/doutorado em modelagem matemática**. Anais: VI Seminário de Inovação e Tecnologia. Panambi: 2016.

BEHNEN, V. L.; GOERGEN, R.; RITTER, D.; ALVES, M. R.; RASIA, L. A.; VALDIERO, A. C. **Estudo dos tipos de estruturas mecânicas de robôs e suas aplicações**. Anais: IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2016, FORTALEZA. Anais do CONEM 2016.

Organização



Promoção





CHEN, L.; LI, X.; TANG, C.; CHENG, S.; ZANG, J.; CALDWELL, D. G. A **Pneumatically-Actuated Transferring Robot for Industrial Forge Manufacturing using Visual Inspection Technology**. In: International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Shenzhen, China, December 2013.

MACIEL, O. R.; MANTOVANI, I. J.; SILVA, J. P. W.; ALVES, M. R.; VALDIERO, A. C. **Desenvolvimento de módulos robóticos didáticos com auxílio de um sistema CAD/CAM**. Anais: VI Seminário de Inovação e Tecnologia, Panambi: 2016.

MISSIAGGIA, L. **Planejamento Otimizado de Trajetória para um Robô Cilíndrico com Acionado Pneumaticamente**. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

NISE, Norman S. **Control systems engineering**. 3.ed. Pomona: John Wiley & Sons, 2000.

PAATZ, S. **Anatomy of a Robot**. Engineering & Technology, pp. 42-44, 2008.

SCIAVICCO, L; SICILIANO, B; **Modeling and control of robot manipulators**. Naples: McGraw-Hill, 1996.

VALDIERO, A.C.; GILAPA, G.M.M.; BORTOLAIA, L.A. **Ensino de engenharia mecânica orientado aos desafios da sociedade**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 34., Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: UPF – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, 2006.

VALDIERO, A. C.; RASIA, L. A. **Gestão de projetos de pesquisa e desenvolvimento de produtos mecatrônicos**. In: Desafios em engenharia industrial.1 ed.Ijuí : UNIJUÍ, 2016, v.1, p. 89-106.

VALDIERO, A. C. **Inovação e desenvolvimento do projeto de produtos industriais**. Ijuí: UNIJUÍ, 1997. Programa de incentivo à produção docente: Coleção Cadernos Unijuí - Série Tecnologia Mecânica n. 2.

DESIGN AND CONSTRUCTION OF MOCKUPS FOR KINEMATICS TEACHING OF ROBOTIC MANIPULATORS

Abstract: *This paper presents a methodological proposal for the teaching-learning process of kinematic modeling of robotic manipulators through the construction and use of robotic structures mockups. The kinematic modeling of robots deals with the mathematical relationship between the robotic joints variables and the position and orientation of the final effector (robotic gripper or tool), which is very important for the task planning to be performed by the robot, its programming and its control. However,*

Organização



UDESC
UNIVERSIDADE
DO ESTADO DE
SANTA CATARINA



Promoção





there is a difficulty in the teaching-learning of robot kinematics due to the complexity in the definition of the reference coordinate systems in the robot links and in linear algebra formulations. The goal is to build and use a modular model kit that facilitates the visualization and understanding of robot kinematics learning. As results, we were developed six kinematic chains types of robotic manipulators: Gantry, SCARA, Cylindrical, Spherical, Anthropomorphic and Cartesian, that they were used in the application of the kinematic modeling methodology based on the Denavit-Hartenberg convention. It is concluded that this proposal contributes in a simple, inexpensive and practical way to solve the problems faced in robotics teaching regarding the understanding of degrees of freedom, type of movement, types of joints, definition of reference systems and verification of the result of modeling, since often the industrial prototype of a robotic manipulator is not available in the classroom.

Key-words: *Robotic manipulators, Didactic models, Robotics teaching.*

Organização



Promoção

