

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO EDUCACIONAL FEITO EM MATERIAL COMPÓSITO

Plínio Colen Bustamante, pliniocolen@ufmg.br¹
Antônio Augusto Torres Maia, aamaia@ufmg.br¹
Gilva Altair Rossi de Jesus, gilva@demec.ufmg.br¹
Antonio Ferreira Ávila, avila@demec.ufmg.br¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais – Departamentno de Engenharia Mecânica
Av. Antônio Carlos, nº 6627 – Pampulha - Belo Horizonte - MG – CEP: 31270-901

Resumo: Os manipuladores robóticos são hoje equipamentos de grande importância no setor industrial, sendo muito utilizados para substituir o operador humano em tarefas arriscadas, insalubres ou tediosas. Estes sistemas, dependendo da sua aplicação, são normalmente fabricados em PVC, aço ou alumínio. Um material pouco explorado neste tipo de aplicação é o material compósito. Além de ser mais leve que os materiais anteriormente citados, o material compósito pode ter as suas características mecânicas manipuladas no momento de sua fabricação e pode ser também moldado já na forma final desejada, dispensando muitas vezes a necessidade de usinagem. Neste trabalho é apresentado o projeto e a construção de um manipulador robótico educacional, com cinco graus de liberdade, feito em material compósito. E apresentado também a metodologia empregada no desenvolvimento do hardware e do software de comando do manipulador. Os resultados obtidos até o momento indicam que o material utilizado é adequado para a aplicação proposta.

Palavras-chave: Robótica, Manipulador, Projeto, Material Compósito

1. INTRODUÇÃO

A robótica é um dos campos que mais cresce nos dias de hoje, seja ela móvel ou industrial. No caso dos robôs industriais, os robôs manipuladores ou braços manipuladores já vêm sendo usados há várias décadas em indústrias e laboratórios, com o objetivo de realizar tarefas perigosas para os seres humanos, ou que exigem excelente precisão ou de grande repetibilidade, como, por exemplo, o manuseio de peças a alta temperatura, soldagem, empacotamento, seleção de peças, testes de durabilidade, pintura dentre outras.

Mesmo sendo um campo já bastante estudado, é de grande importância o conhecimento de suas bases teóricas para que seja possível o avanço tecnológico na área. Com essa visão, o objetivo desse projeto foi à criação de um braço robótico articulado com finalidade didática, de pequena dimensão, feito em material compósito, que seja capaz de realizar tarefas pré-programadas. Foi desenvolvido desde todo o projeto mecânico do robô até toda os softwares de comando. Para o acionamento das articulações do braço foram utilizados sete servo-motores, sendo seis para cada um dos cinco graus de liberdade e mais um para o acionamento da garra. Um programa escrito em linguagem G (Labview), a partir de vários pontos alvo no espaço, calcula as configurações de ângulos de cada articulação para uma trajetória gerada pelo programa, o que torna possível a realização de tarefas complexas. Estes dados são transmitidos através de uma conexão serial para um microcontrolador PIC, que envia os sinais de comando para os servomotores.

O material compósito foi escolhido devido sua leveza, propriedades mecânicas satisfatórias, facilidade para manuseio, molde e trabalho, além da possibilidade de quebrar o paradigma da utilização dos mesmos materiais na estrutura de braços manipuladores. Esse artigo tem como objetivo demonstrar as etapas desenvolvidas para o projeto e mostrar os resultados obtidos com nova utilização do material compósito.

2. PROJETO

O braço projetado é classificado como um manipulador do tipo articulado verticalmente, de estrutura cinemática aberta e contém cinco juntas de rotação, cada uma restringindo dois graus de liberdade do par cinemático. As juntas formam os pares com três hastes, com exceção a base móvel conectada diretamente a primeira junta e a base fixa. O robô possui movimentação na junta da base em torno de um eixo vertical Z_1 , a junta que movimenta a haste um tem movimento em torno do eixo Z_2 , assim como as juntas seguintes a ela, Z_3 e Z_4 , até a junta cinco que rotaciona a ferramenta em torno do eixo Z_5 . Dessa maneira, há duas juntas que definem a orientação da ferramenta – juntas quatro e

cinco – e quatro juntas que definem a posição da ferramenta – juntas um, dois, três e quatro. Na Fig.(1) é apresentada a localização de cada junta, seus respectivos eixos de rotação, a direção do movimento realizado por cada uma e todos os componentes principais do manipulador. A haste dois é a maior com 120 mm, a haste um tem 110 mm e da junta quatro até o centro das hastes da garra são 60 mm.

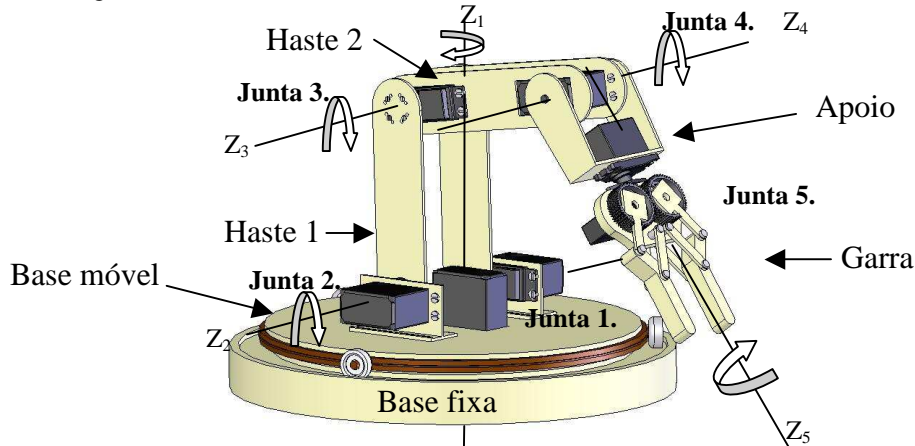


Figura 1. Eixos de rotação, localização, rotação das juntas e nomenclatura.

2.1. Cinemática do Manipulador

Conforme Graig (1989), com os parâmetros das cinco ligações do manipulador (responsáveis por seus cinco graus de liberdade) apresentados na Tab. (1) na notação de Denavit-Hartenberg define-se o arranjo cinemático do manipulador.

Tabela 1. Parâmetros das ligações com a notação DH.

I	α_{i-1} (graus)	a_{i-1} (mm)	d_i (mm)	θ_i (graus)
1	0°	0	0	θ_1
2	90°	0	0	θ_2
3	0°	110	0	θ_3
4	0°	120	0	θ_4
5	90°	0	60	θ_5

O equacionamento da cinemática direta utiliza a matriz de transformação representada pela Eq. (1) para cada ligação. Multiplicando-se as matrizes entre si, consegue-se uma relação entre a referência estática da base fixa e as coordenadas, no espaço X,Y,Z, do atuador, representada pelo conjunto de equações Eq.(2), (3) e (4).

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} d_i \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$P_x = [30\sin(\theta_4+\theta_3-\theta_1+\theta_2)+30\sin(\theta_4+\theta_3+\theta_1+\theta_2)+60\cos(\theta_3-\theta_1+\theta_2) \\ +60\cos(\theta_3+\theta_1+\theta_2)+55\cos(\theta_1-\theta_2)+55\cos(\theta_1+\theta_2)] \quad (2)$$

$$P_y = [-30\cos(\theta_4+\theta_3-\theta_1+\theta_2)+30\cos(\theta_4+\theta_3+\theta_1+\theta_2)+60\sin(\theta_3-\theta_1+\theta_2) \\ -60\sin(\theta_3+\theta_1+\theta_2)+55\sin(\theta_1-\theta_2)+55\sin(\theta_1+\theta_2)] \quad (3)$$

$$P_z = [-60\cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4)+120\sin(\theta_2+\theta_3)+110\sin(\theta_2)] \quad (4)$$

Para resolver o problema inverso, utiliza-se a igualdade dada pela Eq.(5), a partir da qual se chega a Eq.(6) e Eq.(7), na qual: $(\theta_3+\theta_4+\theta_2) = \phi$ e $(\theta_3+\theta_2) = \mu$.

$${}^0_5T = ({}^0_1T)^{-1} {}^0_5T \quad (5)$$

$$\theta_1 = P_y/P_x \quad (6)$$

$$\theta_2 = \text{atan} \left(\frac{P_z + [20\cos(\phi) - 130\sin(\mu)]}{(\sqrt{P_x^2 + P_y^2}) - [20\sin(\phi) + 130\cos(\mu)]} \right) \quad (7)$$

Mesmo conseguindo isolar as variáveis θ_1 e θ_2 , a solução exata fica indisponível, já que os outros θ não são possíveis de serem isolados, e mesmo a função encontrada para θ_2 , é função do próprio θ_2 . Apenas a função encontrada para θ_1 pode ser resolvida diretamente. Sendo assim, existe a necessidade de se utilizar um método numérico iterativo para se chegar às possíveis soluções e a um método ótimo para escolher a melhor entre elas.

2.2. Estática do manipulador

Craig (1989) demonstra que utilizando o princípio do trabalho virtual pode-se relacionar o esforço realizado no espaço cartesiano com aquele realizado no espaço das ligações. Assim, utilizando a Eq.(8) e a Eq.(9) chega-se à relação mostrada pela Eq.(10) que permite calcular os torques necessários em cada ligação para suportar a força estática a qual a mesma está sendo submetida. Assim, pode-se então dimensionar os motores a serem utilizados. A Tab.(2) mostra os valores encontrados para estes motores e o equivalente disponível no mercado.

$$F.d\chi = \tau.d\theta \quad (8)$$

$$d\chi = J.d\theta \quad (9)$$

$$\tau = J^T.F \quad (10)$$

Em que F é a força, $d\chi$ o deslocamento infinitesimal cartesiano, τ o torque e $d\theta$ o deslocamento infinitesimal angular.

Tabela 2. Torques necessários para a movimentação das hastes e apoio da garra do robô e torque dos servomotores da marca FUTABA equivalentes.

Motor	Torque calculado (Kg.cm)	Torque nominal do motor disponível FUTABA (Kg.cm)
Motor haste 1	7,5	8,9
Motor haste 2	7,174	8,9
Motor apoio	2,8146	8,9

2.3. Dinâmica

O equacionamento dinâmico iterativo de Newton-Euler, pode ser aplicado ao manipulador conforme descrito por Craig (1989). Com o auxílio do software MATLAB pode-se chegar às respostas dinâmicas do manipulador. A Tab.(3) apresenta os valores estruturais dos componentes do manipulador necessários para a solução do problema.

Tabela 3. Parâmetros necessários para resolução da dinâmica do manipulador.

Componente mais servomotores	Massa(g)	Momento de Inércia (g.mm ²)	Localização do centro de massa (mm)
Hastes 1	50,11	102747,61	X = -43.58, Y = -31.11, Z = 142.33
Hastes 2	101,76	195637,91	x = -77.69, Y = 28.35, Z = 143.94
Apoio	34,06	21781,33	X = -161.01, Y = 32.05, Z = 126.49
Garra	60,99	22612,66	X = -228.79, Y = 22.01, Z = 107.77
Carga	200	-	-
Total peso	446,92	-	-

Para o motor da base e o motor responsável pelo giro da garra o dimensionamento é feito a partir da Eq.(11) que é provinda das definições de torque, trabalho e energia cinética para um elemento girante. A Tab.(4) apresenta os valores encontrados.

$$\tau = [I.\omega^2 + m.v^2]/2. \Delta\theta \quad (11)$$

Em que τ é o torque, $\Delta\theta$ é a diferença entre ângulos iniciais e finais, m é a massa, v é a velocidade linear, ω é a velocidade angular e I o momento de inércia.

Tabela 4. Torques necessários para a movimentação do da base e da base da garra do robô e torque dos servomotores da marca FUTABA equivalentes.

Motor	Torque calculado (Kg.cm)	Torque nominal do motor disponível FUTABA (Kg.cm)
Motor base	1,5	8,9
Motor giro garra	0,2441	4,88

2.4. Garra

O desenvolvimento da garra foi feito individualmente uma vez que as considerações cinemáticas e estáticas devem ser feitas separadamente dos outros componentes. A garra deve ser considerada uma estrutura cinemática fechada para que velocidades, acelerações e conseqüentemente força e torque sejam calculadas. Partindo deste ponto, utilizando a análise cinemática de mecanismos por vetores unitários, velocidade e aceleração, mostradas nas Eq.(12), determina-se a aceleração da haste que sustenta a carga. Dessa forma pode-se dimensionar dinamicamente o motor correspondente para uma carga de elevação de 200 gramas – FUTABA com torque nominal de 1,37 kg.cm. A Fig.(2) é o desenho do mecanismo da garra.

$$V_p = V_o + V + \omega \times R \quad (12)$$

$$A_p = A_o + A + 2 \cdot \omega \times V + \omega' \times R + \omega \times (\omega \times R) \quad (13)$$

Em que, V_p é a velocidade do ponto desejado, V_o é a velocidade do sistema de coordenadas móvel, V é a velocidade do sistema de coordenadas fixo, ω a velocidade angular do sistema de coordenadas móvel e R é a distância do sistema de coordenadas móvel até o ponto, e Eq.(13), na qual A_p é a aceleração do ponto, A_o é a aceleração do sistema de coordenadas móvel, A é a aceleração do sistema de coordenadas fixo, ω é a velocidade angular do sistema de coordenadas móvel, ω' é a aceleração angular do sistema de coordenadas móvel e R a distância do sistema de coordenadas móvel até o ponto.

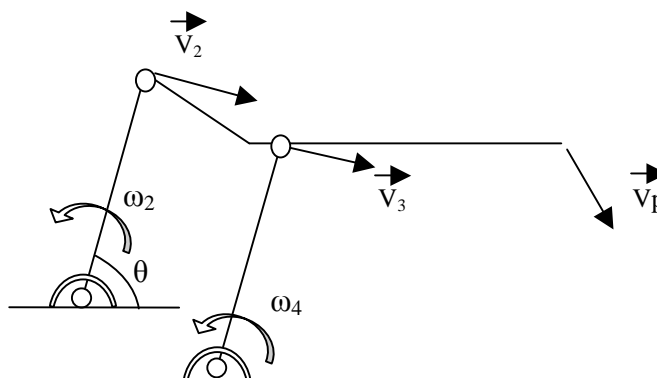


Figura 2. Mecanismo da garra.

3. MATERIAL COMPÓSITO

Os compósitos são materiais constituídos de duas ou mais fases que combinadas resultam em um terceiro material de desempenho mecânico superior se comparado a cada constituinte isoladamente (Daniel & Ishai, 1994). O seu uso tem aumentado graças à necessidade de materiais cada vez mais leves e de alta resistência mecânica.

A estrutura de um compósito é dividida em duas partes. A primeira delas é chamada matriz onde, na maioria das vezes, tem-se um material com ductilidade e tenacidade maiores e resistência mecânica e rigidez menores. A outra é chamada de reforço e é geralmente composta de um material de resistência e rigidez superiores, porém com características pobres de ductilidade e tenacidade.

O processo de fabricação do compósito pode ser dividido em duas etapas. A primeira etapa consiste na laminação do compósito, na qual resina e fibra são misturadas no formato desejado. A segunda etapa consiste no processo de cura, na qual a resina atinge a resistência máxima. Existem vários métodos de fabricação convenientes a cada situação, os principais são: laminação manual, laminação semimanual, autoclavagem, laminação a vácuo, pultrusão, modelagem por transferência de resina (RTM), modelagem por fusão de filme de resina (RFI), enrolamento de fio e enrolamento complexo de fio. Uma desvantagem destes métodos de fabricação é que eles ainda dependem das habilidades do

operador. No caso de materiais convencionais, a fabricação do material e o processo de fabricação são separados, além disso, o processo de fabricação pode envolver operações complexas de fabricação e montagem.

O compósito utilizado neste projeto é o nano compósito S2-vidro/epóxi-nanoargila. O sistema de resina foi escolhido devido a sua baixa viscosidade e longo tempo de gel (60 min.) em temperatura ambiente. A formulação do epóxi é dividida em duas partes: parte A (éter diglicídico de bisphenol A) e parte B – endurecedor amina alifática – (trietilenotetramina). A proporção de peso da mistura sugerido pelo fabricante é 100A:20B, e a viscosidade média é por volta de 1000 cPs. As partículas de nanoargila são montmorilonita modificadas organicamente em forma de plaquetas, i.e. 10 μm de comprimento, 1 μm de largura and 50 ηm espessura, chamado Nanomer I30E da Nanocor Inc., enquanto a fibra de vidro S-2 tem um configuração de tela tecida plana de densidade igual a 200 g/m^2 de acordo com a Texiglass Inc.. O compósito S2-vidro/epoxy-nanoargila é um laminado com dezesseis camadas e 65% de fração do volume da fibra. Os laminados são preparados utilizando a laminação a vácuo assistida o que resultou em uma espessura média de 2.4 mm. A quantidade de nanoargila dispersada dentro do sistema de epóxi, em peso, é 1%, 2%, 5% e 10%, respectivamente. O material tem modulo de elasticidade igual a 25 GPa, densidade de 80 g/m^3 , coeficiente de Poisson igual a 0,25 e limite de escoamento de 250 MPa.

4. SOFTWARES DE COMANDO

Os softwares de comando do manipulador são responsáveis por determinar a trajetória entre uma seqüência de coordenadas por onde o atuador deve passar para realizar uma tarefa. A resposta são os valores dos ângulos que cada servo-motor deve se posicionar. O programa de geração de trajetórias adéqua o ângulo de rotação em função do tempo em polinômios de terceira ordem, assim, garante-se que durante o movimento realizado pela junta haverá uma aceleração decrescente, assim como uma variação da velocidade de maneira que ela comece e termine, nula. Para tanto, é necessário encontrar as condições de contorno corretas para atender o polinômio desejado. Uma vez encontradas pode-se conectar duas ou mais equações de terceiro grau, criando pontos intermediários entre a saída e a chegada do movimento total do manipulador.

Quando o programa gerador de trajetórias esta em execução, ele é alimentado por vários pontos no espaço – estes pontos são os pontos do atuador - e em que tempo se deseja que a movimentação do robô aconteça. O programa de cinemática inversa é acionado e transforma esses pontos em configuração de ângulos, que são utilizados nas equações de terceiro grau supracitadas para gerar a trajetória.

Para posicionar os servomotores é necessário enviar uma seqüência de pulsos de duração variável e freqüência de 50 Hz. A duração de cada pulso é função do ângulo desejado. Desta forma, depois que o programa de trajetória define o ângulo de cada articulação, correlações empíricas obtidas para cada servomotor são utilizadas para calcular a largura de pulso necessário para obter certo ângulo de posicionamento do servomotor. Terminada a conversão de ângulos para largura de pulsos, uma conexão serial é utilizada para transmitir estas informações para uma interface eletrônica projetada e construída dentro do escopo deste trabalho. Esta interface é baseada no microcontrolador PIC 16F877A e é responsável por receber os sinais enviados pela CPU e comandar os servomotores para posição desejada.

Cada vez o que o programa em execução no PIC consegue enviar todas as informações para os servomotores, ele envia para a porta serial um valor lógico, o que permite ao programa de trajetórias enviar outra configuração de ângulos, enquanto o programa do microcontrolador volta ao estado de espera.

5. RESULTADOS

A simulação em computador o programa gerador de trajetórias funciona de forma adequada, o que comprova a funcionalidade dos outros programas que amparam os cálculos que este precisa realizar. Porém, o tempo de resposta não é tão baixo, devido ao grande número de iterações necessárias para execução.

O material compósito usado correspondeu de maneira adequada obtendo uma boa rigidez estrutural e leveza do conjunto, o que é ótimo para uma estrutura de pequeno porte. Além disso, a facilidade de manuseio e molde foi essencial para que as peças pudessem ter uma qualidade excelente. Comparado com outros materiais, com o alumínio, para uma mesma carga o envelope de trabalho seria reduzido devido às menores dimensões necessárias para se alcançar o mesmo valor de carga dimensionada – 200 gramas. Utilizando-se material compósito houve um aumento de 10% no envelope de trabalho do manipulador. Comparando para as mesmas dimensões, o peso do robô (com todos os motores) com o alumínio seria 763,74 gramas, desconsiderando as bases. Já com o material compósito o peso cai para 572,5 gramas, aproximadamente 25% de perda, o que se reflete na carga que o manipulador pode carregar. O projeto mecânico corresponde às expectativas dando a mobilidade correta para o manipulador e um envelope de trabalho satisfatório para fazer as tarefas complexas sem falhas. A Fig.(3) mostra varias fotos do manipulador montado que está no Laboratório de Automação e Controle do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG. Assim, hoje o projeto está em fase de testes para a validação dos programas de comando do robô na estrutura real já fabricada e montada.



Figura 3. Fotos do manipulador.

6. CONCLUSÃO

A utilização do material composto para a estrutura do manipulador é justificada uma vez que para as solicitações a que o robô é submetido o material corresponde de maneira adequada, ganhando em peso, rigidez e facilidade para trabalhar quando comparado com os outros materiais que são utilizados comumente. Uma vez conectados os softwares de comando com a montagem real, o manipulador possuirá funcionalidade similar a de um manipulador industrial disponível no mercado para aplicações envolvendo pequenas cargas e espaço de trabalho reduzidos.

7. REFERÊNCIAS

- Graig, John J., 1989, "Introduction to robotics: mechanics and control", Second Edition., Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Mabie, H.H., Reinholtz, C.F., 1987, "Mechanics and Dynamics of Machinery", Forth Edition., John Wiley.
- Daniel, I. M., Ishai, 1994, "Engineering Mechanics of Composite Materials", New York, Oxford University Press.
- Ávila, A. F., Soares, M. I., Neto, A. S., 2006, "A study on nanostructured laminated plates behavioru under low-velocity impacts loadings", International Journal of Impact Engineering.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

PROJECT AND CONSTRUCTION OF A ROBOTIC MANIPULATOR MANUFACTURED WITH COMPOSITE MATERIAL

Plínio Colen Bustamante, pliniocolen@ufmg.br¹
Antônio Augusto Torres Maia, aamaia@ufmg.br¹
Gilva Altair Rossi de Jesus, gilva@demec.ufmg.br¹
Antonio Ferreira Ávila, avila@demec.ufmg.br¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais – Departametno de Engenharia Mecânica
Av. Antônio Carlos, nº 6627 – Pampulha - Belo Horizonte - MG – CEP: 31270-901

Abstract: Today robotic manipulators are equipments of great importance in the industrial sector, been largely use to replace the human operator in risky, unhealthy or tedious tasks. These systems, depending on its application, normally are manufactured in PVC, steel or aluminum. A material little explored in this type of application is the composite material. Beyond being lighter than the materials previously quoted, the composite material can have its mechanical characteristics manipulated at the moment of its manufacture and also can be molded already to the final form desired, excluding many times the necessity of cutting. In this work presentes the project and construction of educational robotic manipulator, with five degrees of freedom, made in composite material. Also is presented the methodology used in the development of the hardware and the software for commanding the manipulator. The results gotten until the moment indicates that the material used is adjusted for the application proposal.

Keywords: Robotics, Manipulator, Project, Composite material