

Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics

Modelagem Matemática da Relação Cinemática do Acionamento Pneumático de uma Bancada Robotizada para Reabilitação Física

Roberta Goergen¹

Marcia Regina Maboni Hoppen Porsch²

Luiz Antonio Rasia³

Antonio Carlos Valdiero⁴

Depto de Ciências Exatas e Engenharias, UNIJUI, Panambi, RS

Maurício Oberdörfer⁵

Jocarly Patrocínio de Souza⁶

Universidade de Passo Fundo, UPF, Passo Fundo, RS

Resumo. Este artigo apresenta a formulação matemática da relação de transmissão cinemática entre o movimento linear de um atuador pneumático e o movimento angular de juntas robóticas de uma bancada para reabilitação física de pacientes com problemas em membros inferiores e superiores. O objetivo é deduzir uma formulação generalizada para quaisquer localizações relativas entre um atuador de deslocamento linear e sua junta rotativa acionada, de simples implementação computacional, e a partir da convenção de uma sequência de etapas e da definição de parâmetros geométricos. A equação da relação de transmissão cinemática é fundamental na dedução do modelo dinâmico utilizado para simulação e controle de uma estrutura robótica. O resultado obtido mostra a validade da proposta metodológica para facilitar a dedução de relações matemáticas não lineares em mecanismos robóticos com conversão de movimentos de translação e rotação, além da relação matemática que descreve a transformação das forças no atuador para os torques nas juntas do robô.

Palavras-chave. Reabilitação, Atuadores Pneumáticos, Modelagem Matemática, Modelagem Cinemática

1 Introdução

A medicina física e de reabilitação pretende tratar ou atenuar as incapacidades causadas por doenças crônicas, sequelas neurológicas ou lesões derivadas da gestação e do parto, acidentes de trânsito e de trabalho. A reabilitação é um processo global e dinâmico

¹betinhamtm@gmail.com

²marcia_porsch@hotmail.com

³rasia@unijui.edu.br

⁴valdiero@unijui.edu.br

⁵mauriciooberdorfer@hotmail.com

⁶jocarly@upf.br

orientado para a recuperação física e psicológica da pessoa portadora de deficiência, tendo em vista a sua reintegração social [1].

Na literatura científica recente [2, 3, 5, 6, 10] pode-se encontrar diversos trabalhos que tratam da importância da reabilitação de membros superiores e inferiores através de estratégias orientadas por robôs. O uso da manipulação robótica tem a finalidade de maior interação com humanos para compensar os efeitos de incapacidades permanentes ou temporais de pacientes. Os manipuladores robóticos possibilitam a realização de tarefas repetidas vezes de forma controlada e confiável, o que tem sido demonstrado na literatura como fator determinante para o aumento da habilidade motora e melhora no desempenho de atividades funcionais. Assim o paciente é estimulado a treinar seus músculos e seus movimentos de forma gradativa. Para que ocorra a interação do robô com o humano são utilizados atuadores com rigidez controlável, para evitar lesões ao paciente e danos ao equipamento.

Hernandez et al. [4] apresentam um projeto otimizado de um manipulador paralelo acionado por cabo que se destina a reabilitação ou exercício de pacientes com problemas no ombro, como doença, eventos traumáticos ou para os idosos que precisam exercitar seus membros. Um modelo de otimização é apresentado para preencher simultaneamente o espaço de trabalho prescrito e melhorar a destreza selecionando cabos de comprimento adequados e outros parâmetros estruturais. Também Plitea et al. [7] propõem uma solução simples, mas eficaz, para a reabilitação do ombro. É baseado no projeto de um novo robô paralelo esférico, cujo nome é ASPIRE.

Em todos estes trabalhos de aplicações de robótica para reabilitação, nota-se a importância da modelagem matemática para fins de otimização do projeto do mecanismo robótico, de implementação de simulações computacionais e de projeto das estratégias de controle de movimentos e/ou forças. Entretanto, pode-se observar que as matrizes de transformação cinemática e os Jacobianos são obtidos através de relações geométricas construídas especificadamente para uma certa localização do atuador em relação ao elo e válidas apenas para certas configurações particulares. Isto resulta num trabalho repetitivo de nova dedução das equações mediante qualquer alteração significativa na localização do atuador e dificulta a implementação de um algoritmo computacional simples e versátil. Dentro deste contexto, o presente trabalho trata de uma proposta metodológica para formulação da modelagem matemática da relação de transmissão cinemática entre o movimento linear de um atuador pneumático e o movimento angular de juntas robóticas do estudo de caso de uma bancada para reabilitação física de pacientes com problemas em membros inferiores e superiores.

2 Descrição do protótipo da bancada robótica para reabilitação

Nesta seção apresenta-se a descrição do protótipo em desenvolvimento, o robô estacionário com acionamento pneumático que é utilizado como aplicação na reabilitação de membros inferiores e superiores, conforme Figura 1.

Pode-se observar pelas Figuras 1 e 2 que desenvolveu-se um simples e estacionário robô

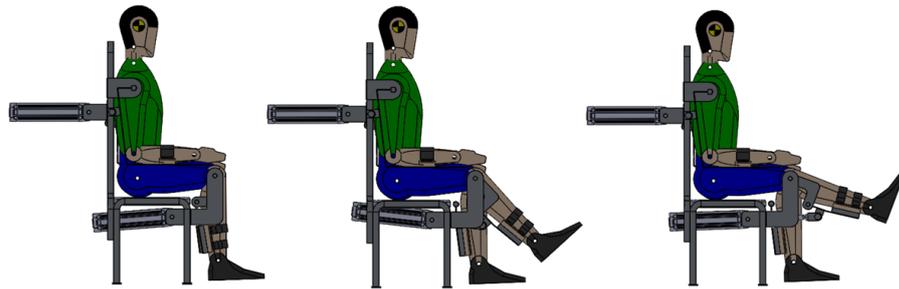


Figura 1: Desenho do protótipo do robô com acionamento pneumático para reabilitação do membro inferior.

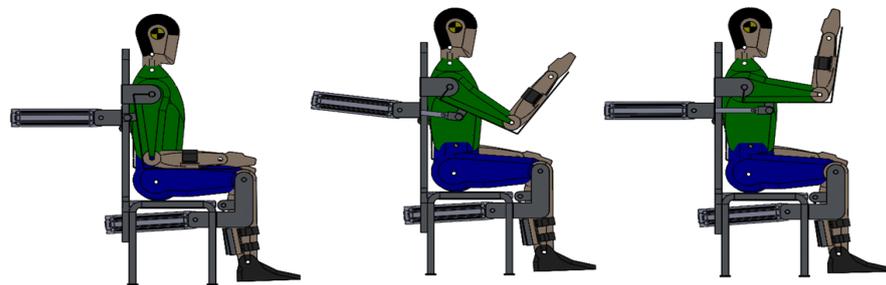


Figura 2: Desenho do protótipo do robô com acionamento pneumático para reabilitação do membro superior.

que tem o propósito da reabilitação do membro superior e inferior. O protótipo é conectado a uma bancada de instrumentalização, composto de uma placa eletrônica dSPACE DS 1104 e a integração dos softwares MatLab/Simulink e ControlDesk como meio de programação e está sendo construído no Núcleo de Inovação em Máquinas Automáticas e Servo Sistemas (NIMASS/ UNIJUÍ Campus Panambi), que possui infraestrutura computacional e experimental adequada para a construção de uma bancada de testes para verificar/validar o desempenho da modelagem e do controle de força em atuadores pneumáticos.

3 Modelagem Matemática

Nesta seção descreve-se o modelo matemático da cinemática para determinação da relação de transmissão de movimento de um robô de juntas rotativas acionadas por atuadores pneumáticos. Neste trabalho apresenta-se a dedução para o caso da junta do robô para reabilitação de membro inferior. Para o caso do membro superior segue-se os mesmos passos descritos a seguir. Considere o desenho esquemático de um robô para reabilitação mostrado na Figura 3, cujo mecanismo é composto do elo 0 (cadeira fixa) e do elo 1 (responsável pelo movimento do membro inferior) ligados por juntas rotativas e acionados por atuadores lineares.

Tendo por premissas [9] que

Hipótese 1: O robô para reabilitação é totalmente acionado por atuadores lineares, ou seja, cada elo móvel i é acionado por um atuador i .

Hipótese 2: Cada atuador linear i pode ser perfeitamente localizado através dos pontos A e B; onde o ponto A é solidário e fixo ao elo anterior e pode ser descrito pelas coordenadas (x_A, y_A) no sistema de referência do elo anterior; e analogamente o ponto B é fixo ao elo movido e pode ser descrito pelas coordenadas (x_B, y_B) no sistema de referência do elo móvel.

A partir destas premissas, convencionam-se os seguintes passos

1º Passo: Determina-se os sistemas de referência dos elos de acordo com a convenção de Denavit-Hartenberg [8] utilizada na modelagem cinemática de robôs.

2º Passo: Uma vez definidos os sistemas de referência dos elos 0 e 1, de acordo com o 1º passo, os pontos A e B do atuador 1 são localizados nos primeiros quadrantes dos respectivos sistemas de referência, conforme a Figura 3, apenas para efeito da dedução das relações geométricas.

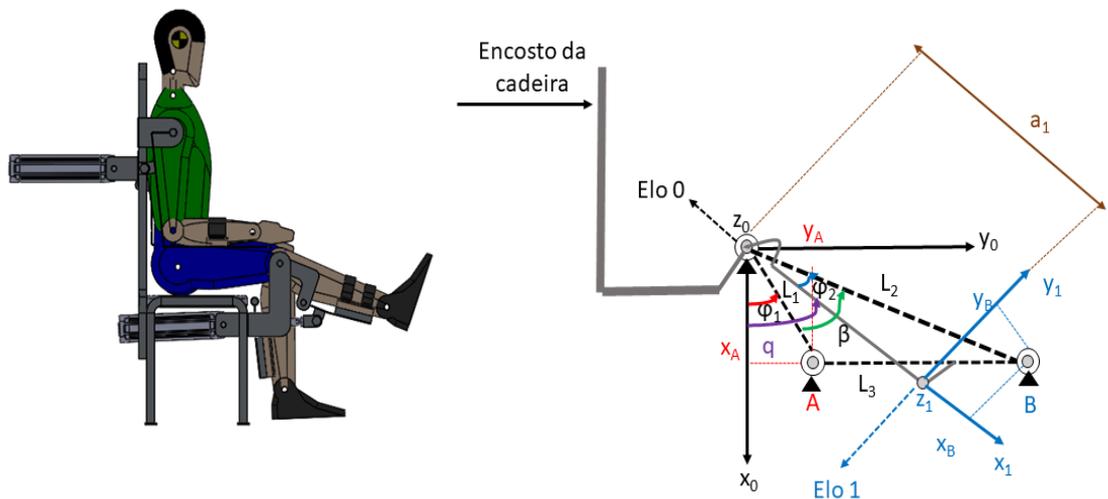


Figura 3: Desenho esquemático da bancada experimental com representação dos sistemas coordenados de referência

3º Passo: Seguindo o 2º passo, é possível deduzir expressões gerais válidas para quaisquer quadrantes. Observa-se pela Figura 3 que os ângulos φ_1 e φ_2 são características geométricas constantes para o dado robô. O ângulo φ_1 é formado entre o eixo x e o segmento \overline{OA} e é calculado pela equação (1). Já o ângulo φ_2 é formado entre o eixo x e o segmento \overline{OB} e é calculado pela equação (2).

$$\varphi_1 = \arctan\left(\frac{y_A}{x_A}\right) \quad (1)$$

$$\varphi_2 = \arctan\left(\frac{y_B}{(a + x_B)}\right) \quad (2)$$

Onde (x_A, y_A) e (x_B, y_B) são coordenadas que definem o atuador 1 e são facilmente determinadas para quaisquer localizações no robô e a é a distância normal comum entre os eixos das juntas.

Observando-se ainda a Figura 3, pode-se escrever a seguinte equação

$$\beta = q + \varphi_2 - \varphi_1 = q - (\varphi_1 - \varphi_2) = q - \Delta\varphi. \quad (3)$$

Onde β é o ângulo formado pelos segmentos \overline{OA} e \overline{OB} , q é a variável de junta (convenção de Denavit-Hartenberg) e $\Delta\varphi$ é um parâmetro construtivo calculado por meio da subtração das equações (1) e (2).

4º Passo: Os pontos O, A e B da Figura 3 formam um triângulo, utilizado na dedução de uma relação geométrica generalizada entre o deslocamento linear y do atuador e o respectivo deslocamento angular q do elo 1. Considera-se triângulo formado pelos pontos O, A e B (ver Figura 3) e aplicando-se a Lei dos Cossenos, obtém-se a relação cinemática entre o movimento linear y da haste do atuador pneumático e o movimento angular q , é dada pela equação (4).

$$y(q) = \sqrt{L_1^2 + L_2^2 - 2|L_1||L_2|\cos(q - \Delta\varphi)} - L_3 \quad (4)$$

Onde os parâmetros construtivos L_1 , L_2 e $\Delta\varphi$ são dados pelas expressões

$$L_1 = \overline{OA} = \sqrt{x_A^2 + y_A^2}, \quad (5)$$

$$L_2 = \overline{OB} = \sqrt{(a + x_B)^2 + y_B^2} \quad (6)$$

e

$$\Delta\varphi_1 - \varphi_2. \quad (7)$$

No qual L_3 é o comprimento do atuador, ou seja, é o segmento \overline{OA} , para uma dada posição do atuador linear onde o deslocamento y é convencionalmente ser nulo. Considera-se que $y=0$ para a metade do curso do atuador.

Pode-se notar pela equação (4) que obtemos uma relação que pode ser facilmente obtida por meio dos dados da localização dos pontos A e B do atuador 1.

A partir da equação (4), pode-se deduzir a relação entre a variação do comprimento do atuador e a respectiva variação do deslocamento da junta, dada pela equação (8).

$$\frac{\partial y}{\partial q} = \bar{J} = \frac{L_1 L_2 \sin(q - \Delta\varphi)}{\sqrt{L_1^2 + L_2^2 - 2L_1 L_2 \cos(q - \Delta\varphi)}} \quad (8)$$

Onde \bar{J} é uma função que relaciona a velocidade \dot{y} do êmbolo do atuador i à taxa variação das variáveis de junta, \dot{q} , mediante os parâmetros construtivos e a coordenada de junta.

Pelo Princípio do Trabalho Virtual [8], o vetor de torques de acionamento das juntas (τ) pode ser expresso em função do vetor de força de carga nos atuadores lineares (f_L) através da seguinte equação matricial apresentado pela equação (9)

$$\tau = \bar{J}^T f_L. \tag{9}$$

Portanto, mostrou-se neste trabalho a dedução da modelagem matemática da relação cinemática do acionamento pneumático de uma bancada robotizada como estratégia de pesquisa empregada em uma potencial aplicação na reabilitação de membros inferiores e superiores, tornando-se assim uma importante ferramenta para fins de simulações computacionais utilizadas em análises de comportamento das variáveis do sistema.

Os resultados da metodologia proposta para modelagem matemática das relações cinemáticas não lineares entre o movimento linear de um atuador pneumático, y , e o movimento angular da junta robótica, q , assim as relações deduzidas para velocidade e força, tem também aplicações no projeto de estratégias do controle para o sistema, tal como ilustrado no diagrama esquemática do sistema de controle proposto para o robô pneumático para reabilitação mostrado na Figura 4.

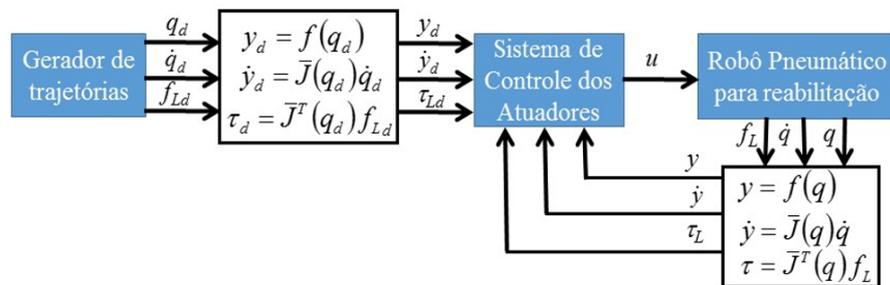


Figura 4: Diagrama esquemático do sistema de controle do robô pneumático para reabilitação com utilização das relações cinemáticas não lineares.

Sendo assim, pode-se utilizar uma estratégia para um sistema de controle apresentado em [2, 5].

4 Conclusões

Apresentou-se uma proposta metodológica para facilitar a dedução de relações matemáticas não lineares em mecanismos robóticos com conversão de movimentos de translação e rotação, além da relação matemática que descreve a transformação das forças no atuador para os torques nas juntas do robô, resultando em um modelo não linear. Os resultados obtidos contribuirão na elaboração de estratégias de controle e também para a realização de melhorias e modificações em protótipos experimentais de inovações em robôs para reabilitação de membros superiores e inferiores.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico Brasil. Os autores também são agradecidos à FINEP,

SEBRAE, FAPERGS e à UNIJUÍ pelo apoio e incentivo na realização da pesquisa.

Referências

- [1] J. C. M. Carvalho, R. S. Gonçalves, Desenvolvimento de uma estrutura robótica paralela atuada por cabos para reabilitação dos movimentos do ombro. In: VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande, PB. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2010.
- [2] C. T. Freeman, Robust ILC design with application to stroke rehabilitation, *Automatica*, 81:270–278, 2017, DOI/10.1016/j.automatica.2017.04.016.
- [3] R. S. Gonçalves, F. S. Lobato, J. C. M. Carvalho. Design of a robotic device actuated by cables for human lower limb rehabilitation using self-adaptive differential evolution and robust optimization. *Bioscience Journal (Online)*, 32:1689–1702, 2016.
- [4] E. Hernandez, S. I. Valdez, G. Carbone, M. Ceccarelli, (2018) Design Optimization of a Cable-Driven Parallel Robot in Upper Arm Training-Rehabilitation Processes. In: Carvalho J., Martins D., Simoni R., Simas H. (eds) *Multibody Mechatronic Systems. MuSMe 2017*.
- [5] X. Li, Y. Liu, H. Yu, Iterative learning impedance control for rehabilitation robots driven by series elastic actuators, *Automatica*, 90:1–7, 2018, DOI:/10.1016/j.automatica.2017.12.031.
- [6] A. Lioulemes, M. Theofanidis, V. Kanal, K. Tsiakas, M. Abujelala, C. Collander, W. B. Townsend, A. Boisselle, F. Makedon, MAGNI Dynamics: A Vision-Based Kinematic and Dynamic Upper-Limb Model for Intelligent Robotic Rehabilitation, *International Journal of Biomedical and Biological Engineering, World Academy of Science, Engineering and Technology*, 11:158–167, 2017.
- [7] N. Plitea, C. Vaida, G. Carbone, A. Pisla, I. Ulinici, D. Pisla (2018) On the Kinematics of an Innovative Spherical Parallel Robot for Shoulder Rehabilitation. In: Carvalho J., Martins D., Simoni R., Simas H. (eds) *Multibody Mechatronic Systems. MuSMe 2017*.
- [8] L. Sciavicco e B. Siciliano. *Modeling and control of robot manipulators*. McGraw-Hill, Naples, Italy, 1996.
- [9] A. C. Valdiero. *Modelagem matemática de robôs hidráulicos*, Ijuí: UNIJUI, 1:200, 2012.
- [10] J. Wu, J. Gao, R. Song, R. Li, Y. Li, L. Jiang, The design and control of a 3DOF lower limb rehabilitation robot, *Mechatronics*, 33:13–22, 2016, DOI/10.1016/j.mechatronics.2015.11.010.