II CONGRESSO INTERNACIONAL DE **GESTÃO E TECNOLOGIAS** COINTER - PDVGT 2018

MODELAMENTO MATEMÁTICO E OTIMIZAÇÃO DO ESPAÇO DE TRABALHO PARA ROBÔ PARALELO DELTA

MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF THE WORKING SPACE FOR THE PARALELO DELTA ROBOT

Apresentação: Comunicação Oral

Acarcio Gomes de A. Junior¹; Miguel B.S. Neto²; Dalton C.G. Valadares³; Alexander P.C. de Sena⁴

DOI: <https://doi.org/10.31692/2596-0857.ICOINTERPDVGT.2018.00003>

Resumo

Este artigo descreve o desenvolvimento de um modelo matemático e a otimização do espaço de trabalho de um protótipo com estrutura cinemática paralela tipo delta com três graus de liberdade, com guias angulados (os guias ficam acima das articulações). O modelo matemático associa as coordenadas dos carros de movimentação (ABC) e o efetuador final (XYZ), com base em uma análise cinemática indireta. No modelo, o dado de entrada é a posição desejada do efetuador (set-point) e o dado de saída é a posição final de cada carro de movimentação. A concepção do modelo é de fundamental importância para uma posterior realização do controle de posição do mecanismo. A partir do modelo matemático, foi aplicada uma simulação em Matlab[®] objetivando a otimização do espaço de trabalho, levando em consideração o tamanho das hastes dos carros de movimentação. O método de discretização considera que o espaço de trabalho possa ser determinado a partir de um reticulado regular de nós, verificando-se para cada um dos nós, a sua relação de pertinência ao espaço de trabalho. Neste sentido, foi possível analisar a influência do tamanho da haste sobre a geometria do espaço de trabalho, fazendo com que o tamanho das hastes influenciasse diretamente no tipo de atividade desempenhada pelo mecanismo, podendo alcançar maiores profundidades ou maiores larguras.

Palavras-Chave: protótipo, otimização, cinemática indireta, robô delta, espaço de trabalho.

Abstract

This article describes the development of a mathematical model and the optimization of the working space of a prototype with a parallel delta kinematic structure with three degrees of freedom, with angled guides (the guides are above the joints). The mathematical model

¹ Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Pernambuco, acarciojunior@gmail.com

² Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Pernambuco, miguelbarreto12@hotmail.com

³ Mestre, Instituto Federal de Pernambuco, dalton.valadares@caruaru.ifpe.edu.br

⁴ Doutor, Instituto Federal de Pernambuco, alexander.sena@caruaru.ifpe.edu.br

associates the coordinates of the moving carts (ABC) and the final effector (XYZ), based on an indirect kinematic analysis. In the model, the input data is the desired position of the effector (set-point) and the output data is the final position of each drive car. The design of the model is of fundamental importance for a later realization of the position control of the mechanism. From the mathematical model, a simulation was applied in Matlab[®] aiming at the optimization of the work space, taking into consideration the size of the stems of the moving cars. The discretization method considers that the workspace can be determined from a regular network of nodes, checking for each of the nodes, their relation of relevance to the workspace. In this sense, it was possible to analyze the influence of the size of the rod on the geometry of the work space, causing the size of the rods to influence directly the type of activity performed by the mechanism, being able to reach greater depths or larger widths.

Keywords: prototype, optimization, indirect kinematics, delta robot, workspace.

Introdução

As arquiteturas paralelas despertam grande interesse por apresentar uma boa rigidez associada à exatidão do posicionamento, possuindo capacidade de carga maior que as tradicionais arquiteturas seriais. Além disso, estes dispositivos podem operar com grandes velocidades sem apresentar os mesmos níveis de problemas inerciais que as arquiteturas seriais (Carvalho e Ceccarelli, 1999). Quando comparadas às estruturas seriais, as paralelas possuem espaço de trabalho menor em relação ao volume total da estrutura, entretanto, ela pode ser instalada sobre o posto de trabalho, não ocupando espaço no chão de fábrica. Recentemente alguns trabalhos foram publicados descrevendo a utilização de arquitetura paralela para concepção de robôs, tais como: Chiang, Lin e Hou (2011); Riaño, Peña e Pardo (2014); Lin, Luo e Lin (2015); Sena, Silva e Silva (2017).

O espaço de trabalho de um robô é a região onde o mecanismo pode se movimentar, sem causar danos à estrutura mecânica. Suas limitações são decorrentes principalmente do curso máximo dos atuadores, da amplitude das juntas, da interferência entre as cadeias cinemáticas, do comprimento das barras das cadeias cinemáticas e das configurações singulares (Malvezzi, 2006). Os robôs paralelos são caracterizados por variáveis de alto desempenho, como velocidade, precisão, capacidade de carga, peso, entre outros. No entanto, seu pequeno espaço de trabalho em comparação com robôs seriais faz com que esse fator esteja em estudo. Por esse motivo, é essencial projetar robôs paralelos para garantir que eles possam alcançar os espaços de trabalho necessários de acordo com diferentes aplicações (Riaño, Peña e Pardo, 2014). Método de discretização, no qual são testados diversos pontos nos limites do volume com a cinemática para testar se os pontos estão dentro do volume de trabalho ou não. Este é um método bastante usado para robôs paralelos, demonstrado pela

quantidade de artigos que definem o volume de trabalho desta maneira, tais como: Cha et al. (2013); Dragos et al. (2012); Mahmoodi, Tabrizi e Alipour (2015) e Lansarin (2017).

A modelagem matemática é uma tarefa essencial para o controle de posição de mecanismos paralelos, e consiste em calcular as coordenadas das articulações correspondentes a uma configuração específica do efetuador (posição e orientação). Para uma arquitetura paralela, a cinemática inversa é uma tarefa simples e pode ser realizada pela observação geométrica. A cinemática de mecanismos paralelos é fundamentalmente diferente da cinemática dos mecanismos seriados. Cada arquitetura paralela possui características cinemáticas particulares dificultando a aplicação de equações generalistas. A obtenção das equações cinemáticas dos mecanismos paralelos requer a análise de cada cadeia, relacionando os ligamentos com a plataforma móvel e a base fixa (Filho, 2006). Algumas pesquisas são dedicadas à análise dinâmica de estruturas paralelas, tais como: Knapp e Cobet (2000); Filho (2006); Stan et. al. (2011); Mahmoodi, Tabrizi e Alipour (2015).

Este trabalho propõe o modelamento cinemático e a otimização do espaço de trabalho, com base no tamanho das hastes, de um protótipo com estrutura cinemática paralela tipo delta linear de 3 Graus de Liberdade (GDL).

Fundamentação Teórica

O espaço de trabalho de uma estrutura robótica de cinemática paralela corresponde a uma região tridimensional que a plataforma móvel é capaz de alcançar. A avaliação do espaço de trabalho de um mecanismo paralelo deve considerar que os seus movimentos estão sujeitos a restrições relacionadas aos limites mecânicos em suas juntas passivas, interferências entre seus membros e limitações de curso inerentes aos atuadores (Merlet, 2000). Há três tipos de abordagens seguidas para a determinação do espaço de trabalho: a geométrica, a baseada na discretização e através de técnicas de otimização (Gojtan, 2009).

O método de discretização considera que o espaço de trabalho seja determinado a partir de um reticulado regular, seja cartesiano ou polar, de nós. Verifica-se para cada um dos nós do reticulado, a sua relação de pertinência ao espaço de trabalho. A fronteira do espaço de trabalho é constituída por um conjunto de nós que tenham pelo menos um vizinho que não pertença a este espaço (Gojtan, 2009). Este método considera que o espaço de trabalho seja determinado a partir de um sólido, que se pressupõe seja maior do que o espaço de trabalho disponível, discretizado por uma malha regular. A seguir, um algoritmo verifica se cada nó da malha viola ou não as restrições físicas e cinemáticas. Consequentemente, as fronteiras do

espaço de trabalho serão formadas por um conjunto de nós que tenha pelo menos um nó vizinho que não pertença ao espaço de trabalho (Gojtan, 2009). As restrições físicas serão representadas pelos cursos das juntas prismáticas (ativas), universais e esféricas (passivas). Stamper et al. (1997) enfatizaram que, na síntese dimensional de um robô paralelo, não se deve buscar apenas a maximização do tamanho do espaço de trabalho. É necessária, sobretudo, uma atenção especial à qualidade do espaço de trabalho.

O estudo da cinemática é de suma importância para se determinar as posições de deslocamento e a realização de movimentos realizados pelos motores. Para isso um sistema de equações precisa ser calculado pelo controlador para que os deslocamentos ocorram corretamente. Devem ser obtidas equações que relacionem a ponta da ferramenta instalada à peça terminal com o deslocamento dos carros transportadores. Essa análise pode ser direta, quando o posicionamento da plataforma móvel é determinado a partir do deslocamento dos motores, ou inversa, quando o deslocamento dos motores é determinado pela localização da plataforma móvel. A análise cinemática, neste caso, pode ser realizada pela observação da geometria da própria estrutura. Neste trabalho, a cinemática inversa será utilizada para obter o volume de trabalho, e implementação do método de discretização.

Metodologia

Para a tipologia estrutural escolhida é visível uma correspondência entre a torre e o carro transportador (sistema de posicionamento) que por sua vez corresponde a um efetuator por meio de uma haste. A vista lateral conforme a Fig. (1), e vista superior conforme Fig. (2) apresentam o “centro” do robô considerando que a ponta da ferramenta esteja posicionada na origem do espaço cartesiano.

Figura 1. Vista lateral com os elementos fundamentais para a análise da estrutura. Fonte: Autoria própria.

Figura 2. Vista superior com os elementos fundamentais para a análise da estrutura. Fonte: Autoria própria.

Cada carro e seus elementos foram representados pelos números 1, 2 e 3. Os Carros (castanhas dos sistemas de posicionamento) estão conectados aos fusos nos pontos D, que por consequência estão ligadas as hastes, de comprimento L, pelos pontos A. Os sistemas de posicionamento estão ligados a trizeta fixa pelos pontos C. As hastes de movimentação estão ligadas ao efetuador nos pontos B. O ponto O está fixado no centro da trizeta fixa, e o ponto F é o centro do efetuado. Por convenção, define-se que o ponto A_1 está localizado no eixo x. Dessa forma, considerando que a ponta da ferramenta esteja posicionada na origem do espaço cartesiano, olhando de cima para o centro do robô, a haste do sistema 1 está sobre o eixo x. Os pontos A_2 , B_2 , C_2 e D_2 estão posicionados a 120° no sentido anti-horário, enquanto que os pontos A_3 , B_3 , C_3 e D_3 estão a 240° , no mesmo sentido. O objetivo desta análise é obter um

conjunto de equações, que convertam as informações das coordenadas da trajetória da ferramenta nos deslocamentos “d” dos carros correspondentes ao longo dos fusos inclinados. O ponto F representa o centro da ferramenta instalada no efetuador.

A distância do centro do efetuador aos pontos B₁, B₂ ou B₃, e do centro da trizeta aos pontos C₁, C₂ ou C₃ é uma constante representada por OE, ou Offset do Efetuador. Definidos todos os pontos de interesse são estabelecidas as relações que determinam as coordenadas dos pontos B₁, B₂, B₃, C₁, C₂ e C₃:

$$b_{1x} = X + OE \quad (1)$$

$$b_{2x} = X + OE.\cos(120^\circ) \quad (2)$$

$$b_{3x} = X + OE.\cos(240^\circ) \quad (3)$$

$$b_{1y} = Y \quad (4)$$

$$b_{2y} = Y + OE.\sen(120^\circ) \quad (5)$$

$$b_{3y} = Y + OE.\sen(240^\circ) \quad (6)$$

$$b_{1z} = Zb_{2z} = Zb_{3z} = Z \quad (7)$$

$$c_{1x} = OE \quad (8)$$

$$c_{2x} = OE.\cos(120^\circ) \quad (9)$$

$$c_{3x} = OE.\cos(240^\circ) \quad (10)$$

$$c_{1y} = 0 \quad (11)$$

$$c_{2y} = OE.\sen(120^\circ) \quad (12)$$

$$c_{3y} = OE.\sen(240^\circ) \quad (13)$$

$$c_{1z} = O_z \quad (14)$$

$$c_{2z} = O_z \quad (15)$$

$$c_{3z} = O_z \quad (16)$$

Para determinar os pontos D₁, D₂ e D₃ serão consideradas as distâncias percorridas pelos carros como um seno, e um vetor unitário na direção dos fusos.

$$d_{1x} = d_1.\cos(s) + OE \quad (17)$$

$$d_{2x} = [d_2.\cos(s) + OE].\cos(120^\circ) \quad (18)$$

$$d_{3x} = [d_3.\cos(s) + OE].\cos(240^\circ) \quad (19)$$

$$d_{1y} = 0 \quad (20)$$

$$d_{2y} = [d_2.\cos(s) + OE].\sin(120^\circ) \quad (21)$$

$$d_{3y} = [d_3.\cos(s) + OE].\sin(240^\circ) \quad (22)$$

$$d_{1z} = d_1.\sin(s) + O_z \quad (23)$$

$$d_{2z} = d_2.\sin(s) + O_z \quad (24)$$

$$d_{3z} = d_3.\sin(s) + O_z \quad (25)$$

Determinadas as coordenadas dos pontos B, C e D é preciso determinar as coordenadas dos pontos A₁, A₂ e A₃. O ponto A está fixo em relação ao referencial D. As coordenadas são as somas das coordenadas em relação ao referencial fixo, e o móvel. Assim, é possível escrever os pontos A em função do ângulo s:

$$a_{1x} = d_{1x} + DA.\sin(s) \quad (26)$$

$$a_{2x} = [d_{2x} + DA.\sin(s)].\cos(120^\circ) \quad (27)$$

$$a_{3x} = [d_{3x} + DA.\sin(s)].\cos(240^\circ) \quad (28)$$

$$a_{1y} = 0 \quad (29)$$

$$a_{2y} = [d_{2y} + DA.\sin(s)].\sin(120^\circ) \quad (30)$$

$$a_{3y} = [d_{3y} + DA.\sin(s)].\sin(240^\circ) \quad (31)$$

$$a_{1z} = d_{1z} - DA.\cos(s) \quad (32)$$

$$a_{2z} = d_{2z} - DA.\cos(s) \quad (33)$$

$$a_{3z} = d_{3z} - DA.\cos(s) \quad (34)$$

Onde o valor de DA é a distancia entre os pontos A e D, e é fornecido de acordo com a fabricação dos carros. Desta forma, ao fornecer as coordenadas do ponto F(X,Y,Z), a única variável desconhecida é a distancia d que cada carro estará do ponto C. Para obter o sistema de equações que irão fornecer os valores de d, calcula-se a distancia entre os pontos A e B, para cada carro. Onde, essa distância corresponde ao comprimento L de cada haste. Assim:

$$L^2 = (a_{1x} - b_{1x})^2 + (a_{1y} - b_{1y})^2 + (a_{1z} - b_{1z})^2 \quad (35)$$

$$L^2 = (a_{2x} - b_{2x})^2 + (a_{2y} - b_{2y})^2 + (a_{2z} - b_{2z})^2 \quad (36)$$

$$L^2 = (a_{3x} - b_{3x})^2 + (a_{3y} - b_{3y})^2 + (a_{3z} - b_{3z})^2 \quad (37)$$

Resultados e Discussão

Na busca por uma otimização do conjunto mecânico, foi desenvolvido um estudo

sobre a influência do comprimento da haste (L) sobre o espaço de trabalho. Para isso, foi elaborado um algoritmo no programa Matlab, utilizando o método da discretização. Esse algoritmo tem como objetivo avaliar o espaço de trabalho de forma qualitativa, permitindo uma visualização dos pontos testados no espaço cartesiano.

Inicialmente, as coordenadas X , Y e Z do ponto F da plataforma móvel, foram discretizadas dentro de um cubo. Em seguida, utilizando-se da cinemática inversa para um determinado comprimento de haste (L), foi calculado o deslocamento linear das castanhas (d_1 , d_2 , d_3), verificado se os deslocamentos atendiam as restrições físicas do problema. A Fig. (3) apresenta o ambiente de simulação do protótipo em Matlab, e a Fig. (4) apresenta o volume de trabalho simulado para as hastes com 700mm.

Figura 3. Ambiente de simulação no Matlab. Fonte: Autoria própria.

Figura 4. Volume de trabalho para as hastes com comprimento de 700mm. Fonte: Autoria própria.

As Fig. (5) e Fig. (6) apresentam o volume de trabalho simulado para as hastes com 1350mm e 1650mm, respectivamente.

Figura 5. Volume de trabalho para as hastes com comprimento de 1350mm. Fonte: Autoria própria.

Figura 6. Volume de trabalho para as hastes com comprimento de 1650mm. Fonte: Autoria própria.

Tomando como referência cada ponto do espaço de trabalho e realizando uma aproximação para um paralelepípedo, como apresenta a Fig. (7), pode-se obter o valor do volume de trabalho, de acordo com a Eq. (38).

Figura 7. (a) passo para x e y, (b) dimensões do paralelepipedo. Fonte: Autoria própria.

$$V = n.\Delta x.\Delta y.\Delta z \quad (38)$$

Onde n é o numero de pontos que formam o espaço de trabalho. Variando o comprimento das hastes, é possível obter vários valores para o volume de trabalho, como apresentado na Fig. (8).

Figura 8. Volume de trabalho x comprimento da haste (L). Fonte: Autoria própria.

A partir da Fig. (8) é possível concluir que o comprimento das hastes em 1300mm, apresentam o maior volume de trabalho para o mecanismo.

Conclusões

Este trabalho descreveu o estudo de um robô paralelo tipo delta, focando na modelagem matemática e na otimização do espaço de trabalho a partir do comprimento das hastes de movimentação. Foi deduzido um modelo matemático para associação das coordenadas dos carros de movimentação e o efetuador final baseado em cinemática inversa, e o tamanho das hastes foram dimensionados a partir do critério do máximo volume de trabalho utilizando o método da discretização. Foi programado um simulador virtual com o modelo cinemático que desenha e otimiza o volume de trabalho em ambiente Matlab[®]. O método de otimização proporcionou um maior volume de trabalho para o mecanismo com um comprimento das hastes em 1300mm. Os resultados deste artigo proporcionaram a construção de um protótipo físico com as dimensões otimizadas, e como trabalhos futuros pretende-se simular controladores de trajetória tipo fuzzy com reconhecimento do volume máximo de trabalho.

Agradecimentos

Agradecimentos à FACEPE (Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de Pernambuco), pelo apoio na realização da pesquisa.

Referências

- CARVALHO, J.C.M. e CECCARELLI, M. (1999). A Dynamic Analysis for Cassino Parallel Manipulador. In: **10th World congresso on the Theory of Mechanisms**, Oulu, Finland, June 20-24, 1202-1207.
- CHA, H.-J. et al. (2013). Workspace Analysis of the DELTA robot according to robot parameters and ball joints.
- CHIANG, M-H.; LIN, H-T. e HOU, C-L. (2011). Development of a Stereo Vision Measurement System for a 3D Three-Axial Pneumatic Parallel Mechanism Robot Arm. In: **Sensors 2011**, vol. 11, pp. 2257-2281.
- DRAGOS, A. et al. (2012). Determining the Workspace Shape of a Robot with Delta 3D of Parallel Structure.
- FILHO, S.C.T. (2006). Modelagem e Otimização de um Robô de Arquitetura Paralela para Aplicações Industriais. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Mecânica), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil.
- GOJTAN, G.E.E. Análise da Precisão de uma Estrutura Robótica com Cinemática Paralela Assimétrica de Topologia 2UPS+PRP, Em Função do Mapeamento dos Erros de Posicionamento da Plataforma Móvel no Espaço Disponível, Durante Operação de Fresamento de Acabamento Aplicando Modelagem Matemática. **Tese** (doutorado em Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. 241 p.
- KNAPP, W. e COBET, M. (2000). **The IWF Hexaglide: A New Concept for High Speed Machining**. IWF, Zurich.
- LANSARIN, R.G. (2017). Análise do volume de trabalho de um robô de arquitetura paralela do tipo Delta. **Monografia** (Engenharia de Controle e Automação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- LIN, J.; LUO, C-H. e LIN, K-H. (2015). Design and Implementation of a New Delta Parallel Robot in Robotics Competitions. In: **International Journal of Advanced Robotic Systems**, Int J Adv Robot Syst, 2015, 12:153 | doi: 10.5772/61744.
- MAHMOODI, M.; TABRIZI, M.G.; ALIPOUR, K. (2015). A New Approach for Kinematics-based Design of 3-RRR Delta Robots with a Specified Workspace.
- MALVEZZI, F. (2006). **Avaliação do comportamento cinemático de um mecanismo paralelo tridimensional**. – ed. rev. – São Paulo, 2006. 135p.
- MERLET, J.P. (2000). **Parallel Robots**. 2 ed. Netherlands, Springer.

RIAÑO, C.; PEÑA, C. e PARDO, A. (2014). Approach in the Optimal Development of Parallel Robot for Educational Applications. In: **Recent Advances in Intelligent Control, Modelling and Simulation**, At held in Cambridge, MA USA, Vol. 14.

SENA, A.P.C.; SILVA, A.V.S. e SILVA, A.S. (2017). Construction and control pid of delta parallel robot. In: **24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering**, 2017, Curitiba. Anais do 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering. v. 1.

STAMPER, R.E.; LUNG-WEN, T. e WALSH, G.C. (1997). **Optimization of a Three DOF Translational Platform for Well-Conditioned Workspace**. Maryland, USA.

STAN, et al. (2011). Performance Analysis of 3 DOF Delta Parallel Robot. **Human System Interactions (HSI), 2011 4th International Conference on**. Yokohama, Japan.