

UMA ABORDAGEM GEOMÉTRICA PARA CINEMÁTICA INVERSA DE UMA PERNA COM TRÊS JUNTAS DE UM ROBÔ QUADRÚPEDE

Bruno Costa Feltrin¹

Gean Costa Feltrin²

Duan Paulo Cleypaul Santos³

Agnaldo Cardozo Filho⁴

Dheiver Francisco Santos⁵

Edilson Ponciano de Lima⁶

Engenharia Mecatrônica



ISSN IMPRESSO 1980-1777

ISSN ELETRÔNICO 2316-3135

RESUMO

Este artigo aborda a solução do problema da cinemática inversa aplicada ao movimento de um robô quadrúpede com três graus de liberdade, por meio do método geométrico. Seu desenvolvimento surge a partir da necessidade de se implementar uma locomoção prática, útil e adaptável para um robô quadrúpede. A idealização desta pesquisa é motivada pela proposta de desenvolver um robô quadrúpede capaz de acessar facilmente diferentes superfícies de risco em busca de pessoas. A importância deste artigo é demonstrar passo a passo como resolver as equações da cinemática inversa para um robô quadrúpede. Para isso, foi isolada e analisada uma perna do robô a fim de determinar e desenvolver as equações geométricas, estipular os pontos no espaço cartesiano, calcular os ângulos dos atuadores e verificar os resultados. O diferencial deste trabalho, com base em pesquisas realizadas, é o método utilizado para encontrar o ângulo do atuador 2, localizado entre o fêmur e a tíbia da perna em estudo. Os resultados demonstraram de forma satisfatória a precisão das equações geométricas adotadas no projeto.

PALAVRAS-CHAVE

Cinemática Inversa. Graus de Liberdade. Método Geométrico. Robô Quadrúpede.

ABSTRACT

This article addresses the solution of the inverse kinematics problem applied to the locomotion of a quadruped robot with three degrees of freedom, by the geometric method. Its development arises from the necessity of implementing a practical, useful, and adaptable locomotion for a quadruped robot. This research's idealization is motivated by the proposal of developing a quadruped robot capable of easily accessing different risky surfaces searching for people. The importance of this article is to show step by step how to solve the inverse kinematics equations for a quadruped robot. For this, a leg of the robot was isolated and analyzed in order to determine and develop the geometric equations, stipulate the points in the Cartesian space, calculate the angles of the actuators, and verify the results. The differential of this work, based in the conducted research, is the method used to find the actuator angle 2, located between the the thigh-bone and the tibia of the studied leg. The results have satisfactorily shown the precision of the geometric equations adopted in the project.

KEYWORDS

Inverse kinematics. Degrees of freedom. Geometric method. Quadruped robot.

1 INTRODUÇÃO

O presente artigo foi elaborado com a proposta de futuramente desenvolver um robô quadrúpede capaz de acessar em superfícies de risco à procura de pessoas, como forma de agilizar o resgate. Com isso em mente, foi necessário estudar detalhadamente os movimentos do robô.

Alguns artigos significativos tomados como referência, envolvendo a cinemática inversa para robôs foram: Uma abordagem sistemática para cinemática inversa de robôs com atuações híbridas (ZHIHONG et al., 2012); Uma abordagem geométrica para cinemática inversa de um robô In-Vivo para biopsia com 4-juntas redundantes (SARDANA et al., 2013); Uma solução híbrida para a cinemática inversa de um manipulador robótico com 7 GDL (graus de liberdade) (VESLIN et al., 2014); Robô humanoide de imitação visual do movimento 3D de um indivíduo humano, usando cinemática inversa baseado em redes neurais (CHIH-LYANG et al., 2014); A análise da nova perna paralela tipo delta com 3 GDL para um robô quadrúpede para maximizar a redução de torque de atuação (SANG et al., 2015); Método da cinemática inversa livre de inviabilidade (SULEIMAN et al., 2015); Solução de malha fechada de um algoritmo de cinemática inversa, utilizando o método de Crank-Nicolson (DREXLER, 2016) e o projeto *open source* Spider Robot (REGIS, 2016).

No presente artigo foi desenvolvido um estudo sobre a resolução do problema da cinemática inversa aplicada a uma perna de um robô quadrúpede com três graus de liberdade por meio do método geométrico. Com base nas pesquisas realizadas o diferencial deste projeto foi o método utilizado para encontrar o ângulo do atuador 2, localizado entre o fêmur e a tíbia da perna em estudo. O conteúdo proposto foi abordado de forma mais abrangente na seção 2 e encontra-se organizado como segue: Seção 2.1 aborda o conceito da cinemática inversa. Na seção 2.2.1, encontra-se o detalhamento do método utilizado para resolver o problema da cinemática inversa pelo método geométrico. A seção 3 lista brevemente os materiais e métodos utilizados. Por fim, nas seções 4 e 5, podem-se verificar os resultados obtidos e conclusões, respectivamente.

2 O TRABALHO PROPOSTO

Com a hipótese norteadora de que é possível resolver o problema da cinemática inversa de forma eficiente para um robô quadrúpede por meio das equações geométricas, este artigo consiste em fazer uma análise de uma perna isolada do robô na qual foram desenvolvidas as equações geométricas, estipulados os pontos no espaço cartesiano, calculados os ângulos dos atuadores e verificados os resultados.

2.1 CINEMÁTICA INVERSA

Segundo John Craig em seu livro *Introduction to robotics: Mechanics and Control*, a solução do problema da cinemática inversa consiste em calcular todos os conjuntos possíveis de ângulos de junta que podem ser utilizados para se obter uma dada posição e orientação do efetuador final do manipulador. Existe mais de um método de resolução para este problema, dentre eles os mais conhecidos são o algébrico, o iterativo e o geométrico (SANTOS, 2004). Neste artigo foi utilizado o método geométrico para solução do problema.

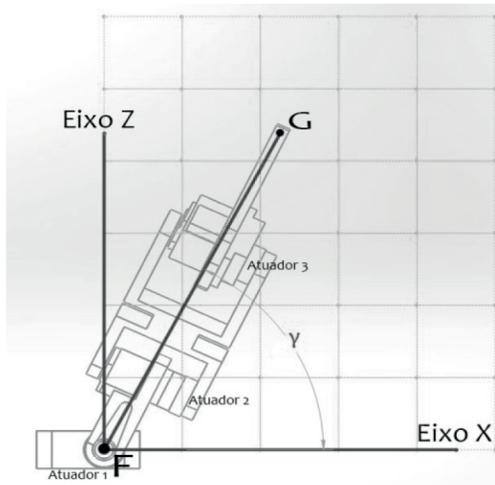
2.1.1 Método Geométrico

É o método que utiliza trigonometria básica para a resolução do problema da cinemática inversa, onde se define um ponto no espaço cartesiano e se obtém os ângulos das juntas. Se o manipulador sob consideração é simples, então o método geométrico apresenta uma melhor abordagem para a obtenção de uma solução de forma fechada (LEE; ZIEGLER, 1984). No artigo proposto a geometria da perna do robô quadrúpede possui três articulações, isto é, três graus de liberdade, em que cada atuador representa uma junta rotativa.

As Figuras 1 e 2 demonstram uma perna do robô quadrúpede em uma posição (x, y, z) , onde estão destacados os pontos e ângulos necessários para a resolução do problema da cinemática inversa.

Na Figura 1, γ , que representa o ângulo entre o segmento \overline{FG} do atuador 1 e o eixo X, é calculado pela equação 1 onde x e z são coordenadas do ponto.

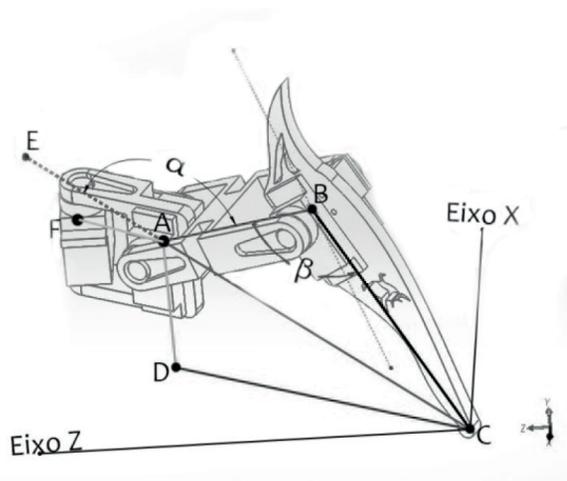
Figura 1 – Visão Superior da perna



Fonte: Autores.

$$\gamma = \text{tg}^{-1} \frac{x}{z} \quad (1)$$

Figura 2 – Visão do plano normal à perna



Fonte: Autores.

Na Figura 2, os segmentos e os ângulos são representados conforme abaixo:

- \overline{AB} o tamanho da tíbia;
- \overline{BC} o tamanho do tarso;
- \overline{AF} o tamanho do fêmur;
- \overline{AC} a hipotenusa;
- \overline{AD} a coordenada y do ponto;
- \overline{CD} é a distância entre o ponto e a origem do sistema medido no plano XZ;
- \overline{AE} é utilizado para calcular o ângulo complementar entre o segmento \overline{AB} e \overline{AC} ;
- α é o ângulo do atuador 2, que está entre o segmento \overline{AE} e \overline{AB} ;
- β é o ângulo do atuador 3, que está entre o segmento \overline{AB} e \overline{BC} ;

Para a solução do ângulo α , o primeiro passo necessário é encontrar o tamanho do segmento \overline{CD} demonstrado na equação 2, e em seguida encontrar o segmento \overline{AC} , como mostra a equação 3.

$$\overline{CD} = \left(\sqrt{(X^2 + Z^2)} \right) - \overline{AF} \quad (2)$$

$$\overline{AC} = \sqrt{(\overline{CD}^2 + Y^2)} \quad (3)$$

Finalmente, para encontrar o ângulo α são aplicadas às equações 4, 5 e 6.

$$\alpha = 90 - \left[(\alpha_1 + \alpha_2) * \left(\frac{180}{\pi} \right) \right] \quad (4)$$

$$\alpha_1 = \text{tg}^{-1} \left(\frac{Y}{\overline{CD}} \right) \quad (5)$$

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \left(\frac{\overline{AB}^2 - \overline{BC}^2 + \overline{CD}^2 + Y^2}{2 * \overline{AB} * \overline{AC}} \right) \quad (6)$$

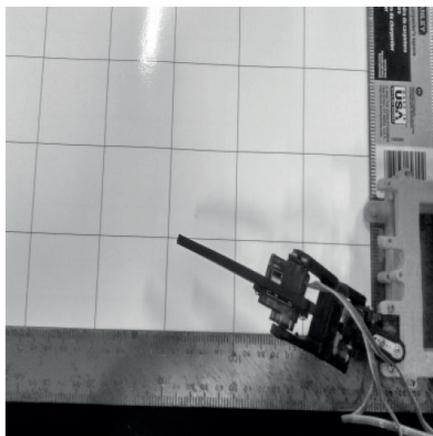
Para encontrar o ângulo β utiliza-se a equação 7.

$$\beta = \left(\cos^{-1} \left(\frac{\overline{AB}^2 + \overline{BC}^2 - \overline{CD}^2 - Y^2}{2 * \overline{AB} * \overline{AC}} \right) \right) * \left(\frac{180}{\pi} \right) \quad (7)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente artigo foram analisadas a veracidade das equações e a precisão dos atuadores. Nos laboratórios de Engenharia Mecatrônica do Centro Universitário Tiradentes-AL (UNIT), foram realizados os testes para a validação da hipótese, que consistiu em desenvolver um código em linguagem C++ para a plataforma Arduino, utilizando as equações geométricas para resolução do problema da cinemática inversa. Também, foram determinados quatro pontos no espaço cartesiano, para então calcular os devidos ângulos dos três atuadores de uma das pernas do robô quadrúpede e analisar a exatidão dos pontos finais obtidos com uma régua de precisão de 2mm e papel milimetrado. Todos os resultados extraídos foram organizados em tabelas.

Figura 3 – Teste dos cálculos cinemáticos



Fonte: Autores.

A Figura 3 mostra a perna do protótipo em um determinado ponto do espaço cartesiano, do qual foram extraídos os dados correlacionando os ângulos dos atuadores e a precisão dos pontos obtidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados mostrados a seguir se referem aos testes de validação dos cálculos da cinemática inversa.

A Tabela 1 apresenta os quatro pontos, em centímetros, determinados no espaço cartesiano representado por $P\phi(x, y, z)$, os ângulos γ , α , β dos atuadores 1, 2 e 3 respectivamente calculados por meio das equações cinemáticas e os pontos $P\omega(x, y, z)$ obtidos como resultado dos ângulos dos atuadores para validação da abordagem.

Tabela 1 – Resultados obtidos do teste

I	$P\varphi(x, y, z)$	γ	α	β	$P\omega(x, y, z)$
1	(0.125,-1.67,12.5)	89,4°	47,6°	94,0°	(0.2, -1.2, 12.2)
2	(7.44, -2.61, 7.41)	44,8°	43,0°	73,2°	(6.4,- 2.6, 7.9)
3	(7.58, -0.1, 12.61)	58,9°	58,7°	126,5°	(7.0, -0.2 , 13)
4	(10, -0.2 ,5.02)	26,6°	26,9°	76,2°	(6.24, -0.5, 8.05)

Fonte: Autores.

Tabela 2 – Variação dos pontos

I	$\Delta P(x, y, z)$
1	(0.075, 0.47, 0.30)
2	(1.04, 0.01, 0.49)
3	(0.58, 0.10 , 0.39)
4	(3.76, 0.30 , 3.03)

Fonte: Autores.

A Tabela 3 apresenta a variação $\Delta P(x, y, z)$ entre $P\varphi(x, y, z)$ e $P\omega(x, y, z)$, demonstrando que houve um erro de no máximo 1 cm, considerado tolerável para este protótipo, nos pontos 1, 2 e 3. Este erro se deve à baixa precisão dos atuadores modelo SG90 que foram utilizados no teste. No ponto 4 observou-se um erro maior devido à limitação da perna do robô que não suportava que o ângulo γ fosse menor que 30°.

5 CONCLUSÕES

Os testes realizados utilizaram um modelo que descreve com rigor a cinemática inversa da perna de um robô quadrúpede composta de três atuadores. Os resultados mostraram de forma satisfatória a precisão das equações geométricas adotadas no projeto para a resolução do problema da cinemática inversa do robô quadrúpede, que inicialmente foram aplicadas a uma perna e posteriormente a um protótipo composto de uma plataforma que apresenta quatro pernas com três graus de liberdade cada.

Os erros apresentados durante o desenvolvimento dos testes foram referentes ao modelo dos atuadores utilizados, que possuem uma baixa resolução devido a sua estrutura de encaixe de $\pm 2^\circ$; havendo a necessidade de um movimento mais preciso, é indicado o uso de um atuador que possua uma resolução maior. Para trabalhos futuros será estudada uma abordagem da dinâmica do mesmo robô quadrúpede, a fim de implementar a capacidade de acesso às superfícies irregulares e de risco em busca de pessoas vitimadas em desastres como nos casos de um desabamento.

REFERÊNCIAS

CHIH-LYANG, H. *et al.* Humanoid Robot's Visual Imitation of 3-D Motion of a Human Subject Using Neural-Network-Based Inverse Kinematics. **IEEE SYSTEMS JOURNAL**, p.1-12, 2014.

DREXLER, D.A. Solution of the closed-loop inverse kinematics algorithm using the Crank-Nicolson method. **IEEE 14th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics**, p.351-356, 2016.

LEE, C.S.G; ZIEGLER, M. Geometric Approach in solving inverse kinematics of PUMA robot. **IEEE Transactions on aerospace and electronic systems**, v.AES-20, n.6, p.695-706, 1984.

REGIS, H. (2016). [DIY] **Spider robot**. Disponível em: <<http://www.instructables.com/id/DIY-Spider-RobotQuad-robot-Quadruped>>. Acesso em: 2 jul. 2016.

SANG, K.H. *et al.* The analysis of new 3 DOF parallel delta type leg for a quadruped robot to maximize actuation torque reduction. **IEEE Conference on Robotics and Biomimetics**, p.994-999, 2015.

SANTOS,V.M.F. **Robótica industrial**. Aveiro – Portugal, 2004.

CRAIG, J.J. **Introduction to robotics: mechanics and Control**. 3.ed. Pearson/Prentice Hall, 2005. 400p.

SARDANA, L; SUTAR, M.K; PATHAK, P.M. A geometric approach for inverse kinematics of a 4-link redundant In-Vivo robot for biopsy. **Robotics and Autonomous Systems**, v.61, p.1306-1313, 2013.

SULEIMAN, W; KANEHIRO, F; YOSHIDA, E. Infeasibility-free Inverse Kinematics Method. **IEEE/SICE International Symposium on System Integration**, p.307-312, 2015.

VESLIN, E. Y. *et al.* A Hybrid Solution for the Inverse Kinematic on a Seven DOF Robotic Manipulator. **IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS**, v.12, n.2, p.212-218, 2014.

ZHIHONG, Sun; DONG, He; ZHANG, W.J. A systematic approach to inverse kinematics of hybrid actuation robots. **IEEE Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)**, p.300-305, 2012.

Data do recebimento: 25 de dezembro de 2016

Data da avaliação: 22 de janeiro de 2017

Data de aceite: 10 de fevereiro de 2017

-
1. Discente do Curso de Engenharia Mecatrônica do Centro Universitário Tiradentes – UNIT. E-mail: bruninho-feltrin@hotmail.com
 2. Discente do Curso de Engenharia Mecatrônica do Centro Universitário Tiradentes – UNIT. E-mail: gean_costa@hotmail.com
 3. Discente do Curso de Engenharia Mecatrônica do Centro Universitário Tiradentes – UNIT. E-mail: duancleypaul@hotmail.com
 4. Docente Professor do Curso de Engenharia Mecatrônica do Centro Universitário Tiradentes - UNIT. E-mail: eng.agnaldofilho@gmail.com
 5. Docente do Curso de Engenharia Mecatrônica do Centro Universitário Tiradentes – UNIT. E-mail: Dheiver.santos@gmail.com
 6. Docente do Curso de Engenharia Mecatrônica do Centro Universitário Tiradentes – UNIT. E-mail: prof.ponciano@gmail.com