COINTER PDVGT 2021

V CONGRESSO INTERNACIONAL DE GESTÃO E TECNOLOGIAS

Edição 100% virtual | 01 a 03 de dezembro

ISSN:2596-0857 | PREFIXO DOI:10.31692/2596-0857

ANÁLISE CINEMÁTICA E SIMULAÇÃO DE ROBÔ PARALELO DELTA LINEAR

ANÁLISIS CINEMÁTICO Y SIMULACIÓN DE ROBOT LINEAL DELTA PARALELO

KINEMATIC ANALYSIS AND SIMULATION OF A LINEAR DELTA PARALLEL ROBOT

Apresentação: Comunicação Oral

Acarcio Gomes de Almeida Junior¹; Asafe dos Santos Silva²; Alexander Patrick Chaves de Sena³

DOI: <https://doi.org/10.31692/2596-0857.VCOINTERPDVGT.0046>

RESUMO

Este artigo descreve o desenvolvimento de um modelo matemático de posição, velocidade e aceleração de um protótipo com estrutura cinemática paralela tipo delta linear com três graus de liberdade, com guias angulados (os guias ficam acima das articulações). O modelo proposto foi desenvolvido por meio do método de soma vetorial, onde é realizada uma análise geométrica da estrutura para definir os vetores atuantes. O modelo matemático associa as coordenadas dos atuadores (1, 2, 3) e o efetuador final (X, Y, Z), com base em uma análise de cinemática inversa. Além disso, apresenta um método numérico para solução do modelo, uma vez que o modelo proposto é um sistema não linear. No modelo, quando o dado de entrada é a posição, velocidade e aceleração desejada do efetuador (set-point) o dado de saída será a posição, velocidade e aceleração final dos atuadores. A partir do modelo matemático foi aplicada uma simulação em Matlab[®] objetivando a validação por meio de comportamentos conhecidos do sistema. Os resultados da simulação foram satisfatórios e comprovam a efetividade do modelo proposto, da mesma forma que possibilita a implementação de controladores de posição, velocidade e trajetória.

Palavras-Chave: cinemática inversa, protótipo, robô paralelo, simulação.

RESUMEN

Este artículo describe el desarrollo de un modelo matemático de posición, velocidad y aceleración de un prototipo con estructura cinemática paralela lineal tipo delta con tres grados de libertad, con guías en ángulo (las guías están por encima de las articulaciones). El modelo propuesto se desarrolló utilizando el método de suma vectorial, donde se realiza un análisis geométrico de la estructura para definir los vectores actuantes. El modelo matemático asocia las coordenadas de los actuadores (1, 2, 3) y el efector final (X, Y, Z), basándose en un análisis de cinemática inversa. Además, presenta un método numérico para resolver el modelo, ya que el modelo propuesto es un sistema no lineal. En el modelo, cuando los datos de entrada son la posición, la velocidad y la aceleración deseada del efector (punto de ajuste), los datos de salida serán la posición, la velocidad y la aceleración final de los actuadores. A partir del modelo matemático, se aplicó una simulación en Matlab[®], con el objetivo de

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

² Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Pernambuco Campus Caruaru, asafesilva01@gmail.com

³ Doutor, Instituto Federal de Pernambuco Campus Caruaru, alexander.sena@caruaru.ifpe.edu.br

la validación a través de comportamientos conocidos del sistema. Los resultados de la simulación fueron satisfactorios y demuestran la efectividad del modelo propuesto, además de permitir la implementación de controladores de posición, velocidad y trayectoria.

Palabras Clave: cinemática inversa, prototipo, robot paralelo, simulación.

ABSTRACT

This article describes the development of a mathematical model of position, velocity and acceleration of a prototype with linear delta-type parallel kinematic structure with three degrees of freedom, with angled guides (the guides are above the joints). The proposed model was developed using the vector sum method, where a geometric analysis of the structure is performed to define the acting vectors. The mathematical model associates the coordinates of the actuators (1, 2, 3) and the final effector (X, Y, Z), based on an inverse kinematics analysis. In addition, it presents a numerical method for solving the model, since the proposed model is a non-linear system. In the model, when the input data is the position, speed and desired acceleration of the effector (set-point), the output data will be the position, speed and final acceleration of the actuators. From the mathematical model, a simulation in Matlab® was applied, aiming at the validation through known behaviors of the system. The simulation results were satisfactory and prove the effectiveness of the proposed model, as well as enabling the implementation of position, velocity and trajectory controllers.

Keywords: inverse kinematics, prototype, parallel robot, simulation.

INTRODUÇÃO

Os manipuladores robóticos podem ser classificados em diferentes categorias dependendo de vários critérios, dentre eles, o número de graus de liberdade, estrutura cinemática, geometria do espaço de trabalho e características do movimento (MELLO, 2011). A cinemática dos robôs estuda o movimento com respeito a um sistema de referências. Assim, a cinemática se interessa pela descrição analítica do movimento espacial do robô como uma função do tempo, e em particular pelas relações entre a posição e a orientação do efetuador do robô com os valores que assumem suas coordenadas articulares (FILGUEIRAS, 2019). De acordo com a cadeia cinemática, Tartari Filho (2006) classificou os robôs em cinco tipos: robôs seriais, que são formados por uma cadeia cinemática de malha aberta utilizando uma extremidade fixa e outra móvel no efetuador (cada atuador representa um GDL); robôs paralelos, que são constituídos por várias cadeias de malha fechada utilizando uma combinação de atuadores para executar um movimento de vários graus de liberdade; robôs híbridos formados por cadeias de malha aberta e fechada, onde seus GDL são baseados na arquitetura serial e paralela; robôs arborescentes que compartilham alguns ligamentos assemelham-se a um tronco de árvore e seus galhos; e robôs Hiper-redundantes que são mecanismos seriados de muitos GDL, onde a quantidade de GDL é maior ao número de eixos onde acontecerá o deslocamento.

Os robôs paralelos apresentam boa rigidez associada à exatidão do posicionamento. Por serem constituídos por várias cadeias cinemáticas de malha fechada eles possuem capacidade de carga maior do que os robôs seriais. Estes dispositivos podem operar com

grandes velocidades sem apresentar os mesmos níveis de problemas inerciais que as arquiteturas seriais (CARVALHO e CECCARELLI, 1999).

Este trabalho propõe um modelo matemático de posição, velocidade, e aceleração de um protótipo com estrutura cinemática paralela tipo delta linear de três Graus de Liberdade (GDL) com base na cinemática inversa.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Existem dois problemas fundamentais para resolver a cinemática dos robôs. O primeiro é conhecido como o problema da cinemática direta, que consiste em determinar a posição e a orientação do efetuador do robô de acordo com um sistema de coordenadas que se toma como referência, como consequência, é possível determinar os valores das articulações e dos parâmetros geométricos dos elementos do robô. O segundo, denominado cinemática inversa, resolve a configuração que deve se adotar para uma posição e orientação do efetuador conhecidas (BARRIENTOS et al, 1997). Na Fig.(01) estão representadas as cinemáticas direta e inversa.

Figura 01: a) Representação da Cinemática Direta; b) Representação da Cinemática Inversa.

Fonte: Autoria própria (2021).

Além de encontrar a relação de posicionamento dos robôs, a análise cinemática também trata de encontrar as relações entre as velocidades e acelerações do movimento das articulações e do efetuador.

Dado que um robô pode se considerar com uma cadeia cinemática formada por objetos rígidos (os ligamentos) unidos entre si mediante articulações, é possível estabelecer um sistema de referência situado em um ponto fixo do robô e descrever a localização de cada um dos ligamentos com respeito à referência. Desta forma, os problemas de cinemática direta e inversa se reduzem a encontrar um sistema de equações que relacionam a posição e a orientação do efetuador do robô com respeito ao sistema de referência fixo (BARRIENTOS et al, 1997).

ANÁLISE CINEMÁTICA DE ROBÔ PARALELO DELTA LINEAR

Como os robôs formam cadeias cinemáticas, o sistema de equações pode ser encontrado por meio de uma soma vetorial das cadeias. Vários métodos são encontrados na literatura para solução do problema, tais como em: Almeida (2018), Li e Xu (2005), Almeida Junior et al. (2018).

METODOLOGIA

As técnicas de análise cinemática de manipuladores de robôs seguem diversas metodologias distintas. Neste trabalho a metodologia seguida será de acordo com a metodologia de análise cinemática presente em Norton (2010). A Fig.(02) apresenta o robô, componentes importantes para o modelamento e a representação vetorial de um dos atuadores.

Figura 02: Robô paralelo e alguns componentes utilizados na modelagem.

Fonte: Autoria própria (2021).

A análise cinemática tem como objetivo definir um conjunto de equações que relaciona o deslocamento dos atuadores (C_1 , C_2 e C_3) e o deslocamento do efetuador (X , Y e Z). A Fig.(03) apresenta uma representação vetorial do robô.

Figura 03: Representação Vetorial do Robô Paralelo.

Fonte: Autoria própria (2021).

A cadeia cinemática respectiva a cada atuador do robô está representada pelos subíndices 1, 2 e 3, onde cada atuador está defasado em 120° em relação aos outros. Assim, é possível observar que o robô é composto por três cadeias cinemáticas que compartilham o mesmo vetor posição (A_1). Além disso, é possível observar que a plataforma móvel é formada pelos vetores F_1 , F_2 e F_3 , e a fixa por B_1 , B_2 e B_3 . Os vetores C_1 , C_2 e C_3 representam o deslocamento dos atuadores, os vetores E_1 , E_2 e E_3 representam as hastes de acionamento e os vetores D_1 , D_2 e D_3 representam uma distância fixa da conexão da haste com o elemento de transmissão de movimento do atuador. O vetor A_1 representa o posicionamento do efetuador, e o ponto O é a origem do referencial fixo do sistema.

Ao analisar a cadeia cinemática, pode-se observar que:

$$\vec{A}_1 + \vec{B}_1 + \vec{C}_1 + \vec{D}_1 + \vec{E}_1 + \vec{F}_1 = 0 \quad (1)$$

$$\vec{A}_2 + \vec{B}_2 + \vec{C}_2 + \vec{D}_2 + \vec{E}_2 + \vec{F}_2 = 0 \quad (2)$$

$$\vec{A}_3 + \vec{B}_3 + \vec{C}_3 + \vec{D}_3 + \vec{E}_3 + \vec{F}_3 = 0 \quad (3)$$

Onde $\vec{A}_1, \vec{A}_2$ e $\vec{A}_3$ são iguais e representam o vetor posição, logo:

$$\vec{A}_1 = \vec{A}_2 = \vec{A}_3 = -X \vec{i} - Y \vec{j} - Z \vec{k} \quad (4)$$

A base fixa é representada pelos vetores B e pode ser observada na Fig.(04).

Figura 04: Vetores base fixa.

Fonte: Autoria própria (2021).

O módulo dos vetores B é representado pela distância OE, e o θ é a defasagem angular dos atuadores. Assim:

$$\vec{B}_1 = OE \vec{i} \quad (5)$$

$$\vec{B}_2 = OE * \cos(\theta) \vec{i} + OE * \sin(\theta) \vec{j} \quad (6)$$

$$\vec{B}_3 = OE * \cos(2\theta) \vec{i} + OE * \sin(2\theta) \vec{j} \quad (7)$$

Os vetores C representam o deslocamento dos atuadores. A direção deste vetor é fixa e está numa angulação γ com o plano XY. A Fig.(05) apresenta a representação vetorial da cadeia cinemática pertencente ao atuador 1.

$$\vec{C}_1 = C_1 * \cos(\gamma) \vec{i} + C_1 * \sin(\gamma) \vec{k} \quad (8)$$

$$\vec{C}_2 = C_2 * \cos(\gamma) * \cos(\theta) \vec{i} + C_2 * \cos(\gamma) * \sin(\theta) \vec{j} + C_2 * \sin(\gamma) \vec{k} \quad (9)$$

$$\vec{C}_3 = C_3 * \cos(\gamma) * \cos(2\theta) \vec{i} + C_3 * \cos(\gamma) * \sin(2\theta) \vec{j} + C_3 * \sin(\gamma) \vec{k} \quad (10)$$

Onde C_1, C_2 e C_3 representam as posições de cada atuador.

Figura 05: b) Representação vetorial da cadeia 1.

(a)

Fonte: Autoria própria (2021).

Os vetores D_i das Eq.(11), (12) e (13) representam a conexão entre os elementos de transmissão do acionamento e as hastes, estando fixado a 90° em relação à transmissão, possuindo um comprimento fixo D como podem ser observados na Fig.(06).

Figura 06: Representação do Vetor D na máquina.

Fonte: Autoria própria (2021).

$$\vec{D}_1 = D * \sin(\gamma) \vec{i} - D * \cos(\gamma) \vec{k} \quad (11)$$

$$\vec{D}_2 = D * \sin(\gamma) * \cos(\theta) \vec{i} + D * \sin(\gamma) * \sin(\theta) \vec{j} - D * \cos(\gamma) \vec{k} \quad (12)$$

$$\vec{D}_3 = D * \sin(\gamma) * \cos(2\theta) \vec{i} + D * \sin(\gamma) * \sin(2\theta) \vec{j} - D * \cos(\gamma) \vec{k} \quad (13)$$

Os vetores E_i representam as hastes do robô, e terão movimentos em todas as direções do espaço. O comprimento das hastes é representado por L , assim como as componentes angulares. A representação de um vetor no espaço pode ser observada na Fig.(07).

Figura 07: Representação vetor E.

Fonte: Autoria própria (2021).

$$\vec{E}_1 = L * \cos(\alpha_1) * \cos(\beta_1) \vec{i} + L * \cos(\alpha_1) * \sin(\beta_1) \vec{j} + L * \sin(\alpha_1) \vec{k} \quad (14)$$

$$\vec{E}_2 = L * \cos(\alpha_2) * \cos(\beta_2) \vec{i} + L * \cos(\alpha_2) * \sin(\beta_2) \vec{j} + L * \sin(\alpha_2) \vec{k} \quad (15)$$

$$\vec{E}_3 = L * \cos(\alpha_3) * \cos(\beta_3) \vec{i} + L * \cos(\alpha_3) * \sin(\beta_3) \vec{j} + L * \sin(\alpha_3) \vec{k} \quad (16)$$

Os vetores F_i representam a plataforma móvel (peça conhecida como trizeta), e podem ser observados na Fig.(08) onde OF representa o comprimento fixo do vetor.

Figura 08: Vetor da plataforma móvel.

Fonte: Autoria própria (2021).

$$\vec{F}_1 = -OF \vec{i} \quad (17)$$

$$\vec{F}_2 = -OF * \cos(\theta) \vec{i} - OF * \sin(\theta) \vec{j} \quad (18)$$

$$\vec{F}_3 = -OF * \cos(2\theta) \vec{i} - OF * \sin(2\theta) \vec{j} \quad (19)$$

Substituindo as equações de (4) a (19), em (1), (2) e (3), temos:

Em $\vec{i}$:

$$-X + OE + C_1 * \cos(\gamma) + D * \sin(\gamma) + L * \cos(\alpha_1) * \cos(\beta_1) - OF = 0 \quad (20)$$

$$-X + OE * \cos(\theta) + C_2 * \cos(\gamma) * \cos(\theta) + D * \sin(\gamma) * \cos(\theta) + L * \cos(\alpha_2) * \cos(\beta_2) - OF * \cos(\theta) = 0 \quad (21)$$

$$-X + OE * \cos(2\theta) + C_3 * \cos(\gamma) * \cos(2\theta) + D * \sin(\gamma) * \cos(2\theta) + L * \cos(\alpha_3) * \cos(\beta_3) - OF * \cos(2\theta) = 0 \quad (22)$$

Em $\vec{j}$:

$$-Y + L * \cos(\alpha_1) * \sin(\beta_1) = 0 \quad (23)$$

$$-Y + OE * \sin(\theta) + C_2 * \cos(\gamma) * \sin(\theta) + D * \sin(\gamma) * \sin(\theta) + L * \cos(\alpha_2) * \sin(\beta_2) - OF * \sin(\theta) = 0 \quad (24)$$

$$-Y + OE * \sin(2\theta) + C_3 * \cos(\gamma) * \sin(2\theta) + D * \sin(\gamma) * \sin(2\theta) + L * \cos(\alpha_3) * \sin(\beta_3) - OF * \sin(2\theta) = 0 \quad (25)$$

Em $\vec{k}$:

$$-Z + C_1 * \sin(\gamma) - D * \cos(\gamma) + L * \sin(\alpha_1) = 0 \quad (26)$$

$$-Z + C_2 * \sin(\gamma) - D * \cos(\gamma) + L * \sin(\alpha_2) = 0 \quad (27)$$

$$-Z + C_3 * \sin(\gamma) - D * \cos(\gamma) + L * \sin(\alpha_3) = 0 \quad (28)$$

A solução do sistema formado pelas equações de (20) à (28), irá retornar todas as posições dos elementos do robô, assim ao derivar essas equações em relação ao tempo, teremos um sistema que terá como solução as velocidades de cada elemento, assim derivando em relação ao tempo ($\partial/\partial t$).

$$\left\{ \begin{array}{l} -\dot{X} + \dot{C}_1 * \cos(\gamma) + L * (-\sin(\alpha_1) * \cos(\beta_1) * \dot{\alpha}_1 - \cos(\alpha_1) * \sin(\beta_1) * \dot{\beta}_1) = 0 \\ -\dot{Y} + L * (-\sin(\alpha_1) * \sin(\beta_1) * \dot{\alpha}_1 + \cos(\alpha_1) * \cos(\beta_1) * \dot{\beta}_1) = 0 \\ -\dot{Z} + \dot{C}_1 * \sin(\gamma) + L * \cos(\alpha_1) * \dot{\alpha}_1 = 0 \\ -\dot{X} + \dot{C}_2 * \cos(\gamma) * \cos(\theta) + L * (-\sin(\alpha_2) * \cos(\beta_2) * \dot{\alpha}_2 - \cos(\alpha_2) * \sin(\beta_2) * \dot{\beta}_2) = 0 \\ -\dot{Y} + \dot{C}_2 * \cos(\gamma) * \sin(\theta) + L * (-\sin(\alpha_2) * \sin(\beta_2) * \dot{\alpha}_2 + \cos(\alpha_2) * \cos(\beta_2) * \dot{\beta}_2) = 0 \\ -\dot{Z} + \dot{C}_2 * \sin(\gamma) + L * \cos(\alpha_2) * \dot{\alpha}_2 = 0 \\ -\dot{X} + \dot{C}_3 * \cos(\gamma) * \cos(2\theta) + L * (-\sin(\alpha_3) * \cos(\beta_3) * \dot{\alpha}_3 - \cos(\alpha_3) * \sin(\beta_3) * \dot{\beta}_3) = 0 \\ -\dot{Y} + \dot{C}_3 * \cos(\gamma) * \sin(2\theta) + L * (-\sin(\alpha_3) * \sin(\beta_3) * \dot{\alpha}_3 + \cos(\alpha_3) * \cos(\beta_3) * \dot{\beta}_3) = 0 \\ -\dot{Z} + \dot{C}_3 * \sin(\gamma) + L * \cos(\alpha_3) * \dot{\alpha}_3 = 0 \end{array} \right. \quad (29)$$

Uma vez que a análise de velocidade tenha sido feita, o próximo passo é determinar a aceleração dos pontos de interesse do robô. Sabe-se que a aceleração é a derivada de 2ª ordem da posição, e neste sentido, ao aplicar a 2ª derivada em relação ao tempo no sistema que determina as posições, tem-se:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\ddot{X} + \ddot{C}_1 * \cos(\gamma) + L * \left(-\cos(\alpha_1) * \cos(\beta_1) * \dot{\alpha}_1^2 + \sin(\alpha_1) * \sin(\beta_1) * \dot{\alpha}_1 * \dot{\beta}_1 - \sin(\alpha_1) * \cos(\beta_1) * \ddot{\alpha}_1 + \sin(\alpha_1) * \sin(\beta_1) * \dot{\alpha}_1 * \dot{\beta}_1 - \cos(\alpha_1) * \cos(\beta_1) * \dot{\beta}_1^2 - \cos(\alpha_1) * \sin(\beta_1) * \ddot{\beta}_1 \right) = 0 \\ -\ddot{Y} + L * \left(-\cos(\alpha_1) * \sin(\beta_1) * \dot{\alpha}_1^2 - \sin(\alpha_1) * \cos(\beta_1) * \dot{\alpha}_1 * \dot{\beta}_1 - \sin(\alpha_1) * \sin(\beta_1) * \ddot{\alpha}_1 - \sin(\alpha_1) * \cos(\beta_1) * \dot{\alpha}_1 * \dot{\beta}_1 - \cos(\alpha_1) * \sin(\beta_1) * \dot{\beta}_1^2 + \cos(\alpha_1) * \cos(\beta_1) * \ddot{\beta}_1 \right) = 0 \\ -\ddot{Z} + \ddot{C}_1 * \sin(\gamma) + L * (-\sin(\alpha_1) * \dot{\alpha}_1^2 + \cos(\alpha_1) * \ddot{\alpha}_1) = 0 \\ -\ddot{X} + \ddot{C}_2 * \cos(\gamma) * \cos(\theta) + L * \left(-\cos(\alpha_2) * \cos(\beta_2) * \dot{\alpha}_2^2 + \sin(\alpha_2) * \sin(\beta_2) * \dot{\alpha}_2 * \dot{\beta}_2 - \sin(\alpha_2) * \cos(\beta_2) * \ddot{\alpha}_2 + \sin(\alpha_2) * \sin(\beta_2) * \dot{\alpha}_2 * \dot{\beta}_2 - \cos(\alpha_2) * \cos(\beta_2) * \dot{\beta}_2^2 - \cos(\alpha_2) * \sin(\beta_2) * \ddot{\beta}_2 \right) = 0 \\ -\ddot{Y} + \ddot{C}_2 * \cos(\gamma) * \sin(\theta) + L * \left(-\cos(\alpha_2) * \sin(\beta_2) * \dot{\alpha}_2^2 - \sin(\alpha_2) * \cos(\beta_2) * \dot{\alpha}_2 * \dot{\beta}_2 - \sin(\alpha_2) * \sin(\beta_2) * \ddot{\alpha}_2 - \sin(\alpha_2) * \cos(\beta_2) * \dot{\alpha}_2 * \dot{\beta}_2 - \cos(\alpha_2) * \sin(\beta_2) * \dot{\beta}_2^2 + \cos(\alpha_2) * \cos(\beta_2) * \ddot{\beta}_2 \right) = 0 \\ -\ddot{Z} + \ddot{C}_2 * \sin(\gamma) + L * (-\sin(\alpha_2) * \dot{\alpha}_2^2 + \cos(\alpha_2) * \ddot{\alpha}_2) = 0 \\ -\ddot{X} + \ddot{C}_3 * \cos(\gamma) * \cos(2\theta) + L * \left(-\cos(\alpha_3) * \cos(\beta_3) * \dot{\alpha}_3^2 + \sin(\alpha_3) * \sin(\beta_3) * \dot{\alpha}_3 * \dot{\beta}_3 - \sin(\alpha_3) * \cos(\beta_3) * \ddot{\alpha}_3 + \sin(\alpha_3) * \sin(\beta_3) * \dot{\alpha}_3 * \dot{\beta}_3 - \cos(\alpha_3) * \cos(\beta_3) * \dot{\beta}_3^2 - \cos(\alpha_3) * \sin(\beta_3) * \ddot{\beta}_3 \right) = 0 \\ -\ddot{Y} + \ddot{C}_3 * \cos(\gamma) * \sin(2\theta) + L * \left(-\cos(\alpha_3) * \sin(\beta_3) * \dot{\alpha}_3^2 - \sin(\alpha_3) * \cos(\beta_3) * \dot{\alpha}_3 * \dot{\beta}_3 - \sin(\alpha_3) * \sin(\beta_3) * \ddot{\alpha}_3 - \sin(\alpha_3) * \cos(\beta_3) * \dot{\alpha}_3 * \dot{\beta}_3 - \cos(\alpha_3) * \sin(\beta_3) * \dot{\beta}_3^2 + \cos(\alpha_3) * \cos(\beta_3) * \ddot{\beta}_3 \right) = 0 \\ -\ddot{Z} + \ddot{C}_3 * \sin(\gamma) + L * (-\sin(\alpha_3) * \dot{\alpha}_3^2 + \cos(\alpha_3) * \ddot{\alpha}_3) = 0 \end{array} \right. \quad (30)$$

Nos sistemas acima os valores de L , OE , D , γ , θ e OF são conhecidos. Dessa forma, existem três sistemas com nove equações e doze incógnitas. No entanto, aplicando os conceitos da cinemática direta e inversa, os três sistemas ficam com nove equações e nove incógnitas, tendo assim uma solução possível. Para cinemática direta, os valores de C_1 , C_2 , C_3 , $\dot{C}_1$, $\dot{C}_2$, $\dot{C}_3$, $\ddot{C}_1$, $\ddot{C}_2$ e $\ddot{C}_3$ são conhecidos, e para cinemática indireta os valores conhecidos são X , Y , Z , $\dot{X}$, $\dot{Y}$, $\dot{Z}$, $\ddot{X}$, $\ddot{Y}$ e $\ddot{Z}$. Para solucionar os sistemas é necessária a utilização de métodos numéricos para sistemas não lineares.

O método mais amplamente estudado e conhecido para resolver sistemas de equações não lineares é o método de Newton. Por meio deste método, dada uma aproximação inicial x_0 da solução, calcula-se a aproximação utilizando a Eq.(31).

$$x_{k+1} = x_k - J(x_k) - F(x_k) \quad (31)$$

Aplicando os conceitos da Eq.(31) na Eq.(29) e Eq.(30), é possível solucionar os sistemas, e obter os valores das velocidades e acelerações dos atuadores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a validação do modelo matemático, foram realizadas simulações deslocando a ferramenta nas posições X , Y , e Z . A Fig.(09) apresenta o esquemático no ambiente Simulink do Matlab utilizado nas simulações.

Figura 09: Simulação utilizando o ambiente Simulink.

Fonte: Autoria própria (2021).

Foram realizadas duas simulações, com tempo de 5s. A primeira com deslocamento apenas na vertical (eixo Z), partindo do ponto -650 (mm) até -600 (mm) conforme apresentado na Fig.(10). Para o deslocamento realizado apenas no eixo Z, o valor de posição dos atuadores apresentado na Fig.(11) é igual para todos, e neste sentido, observa-se o mesmo comportamento para as velocidades e acelerações. O resultado já era esperado devido à estrutura geométrica do robô. Além disso, pela Fig.(12) é possível observar que o deslocamento se deu em velocidade constante, justificando o valor das acelerações na Fig.(13).

Figura 10: Deslocamento em X, Y e Z na 1ª simulação.

Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 11: Posição dos atuadores na 1ª simulação.

Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 12: Velocidade dos atuadores na 1ª simulação.

Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 13: Aceleração dos atuadores na 1ª simulação.

Fonte: Autoria própria (2021).

Na segunda simulação, o deslocamento ocorreu com X saindo da posição 0 (mm) para -25 (mm), Y saindo de 0 (mm) para 25 (mm) e Z saindo de -650 (mm) para -625 (mm) conforme a Fig.(14).

Figura 14: Deslocamento de X, Y e Z no 2º deslocamento.

Fonte: Autoria própria (2021).

Para esta simulação, o valor de posição do atuador 2 ocasionou a maior variação. O resultado é esperado, pois o deslocamento positivo em Z (que faz com que o deslocamento do atuador 2 seja positivo) é somado com o deslocamento positivo em Y, que também faz o deslocamento do atuador 2 ser positivo. O posicionamento do atuador 1 foi o que menos sofreu variação, o que também é esperado uma vez que o deslocamento positivo em Z (que faz o atuador 1 se deslocar positivamente) se soma com o deslocamento negativo em X, que faz com que o atuador 1 se desloque negativamente, resultando assim em uma menor variação. As Fig.(15), (16) e (17) apresentam a posição, a velocidade e a aceleração dos atuadores para a 2ª simulação.

Figura 15: Posição dos atuadores na 2ª simulação.

Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 16: Velocidade dos atuadores na 2ª simulação.

Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 17: Aceleração dos atuadores na 2ª simulação.

Fonte: Autoria própria (2021).

CONCLUSÕES

Este trabalho descreveu o estudo cinemático de um robô paralelo tido delta linear com 3 Graus de Liberdade pelo método de soma vetorial. Foi deduzido o modelo matemático para associação das coordenadas dos atuadores e do efetuador final baseado em conceitos de cinemática inversa e direta. Foi programado um simulador virtual com o modelo cinemático em ambiente Simulink do Matlab, validando de forma eficiente o modelo proposto. Os resultados deste artigo viabilizam a implementação de controladores de trajetória e velocidade. Como trabalhos futuros pretende-se implementar controladores de trajetória tipo fuzzy.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M.V.G. Estudo da concepção de um robô paralelo de três graus de liberdade. **Dissertação** de mestrado em engenharia. UFRGS, 2018.

ALMEIDA JUNIOR et al. Modelamento matemático e otimização do espaço de trabalho para robô paralelo delta. In: **Anais** do II Congresso Internacional de Gestão e Tecnologias COINTER - PDVGT, João Pessoa, Brasil, 2018.

BARRIENTOS et al. **Fundamentos de Robótica**. 2ª ed. Madrid: McGraw-Hill, 1997.

CARVALHO, J.C.M. e CECCARELLI, M. A Dynamic Analysis for Cassino Parallel Manipulador. In: **10th World congress on the Theory of Mechanisms**, Oulu, Finland, June 20-24, 1202-1207, 1999.

FILGUEIRAS, I.A.G. Simulação e Controle de um Manipulador Robótico. **Monografia**. Departamento de Engenharia elétrica, UFCE, 2019.

LI, Y.; XU, Q. Dynamic Analysis of a Modified DELTA Parallel Robot for Cardiopulmonary Resuscitation, **IEEE/RSJ International Conference on inteligente Robots and systems**, 2005, pp. 233-238.

MELLO, C.B. Controle de trajetória de uma Plataforma Stewart para Simulação de Transferência de Carga fora do Porto. **Dissertação** de Mestrado em Engenharia Mecânica. UFRJ, 2011.

NORTON, R. L. **Cinemática e Dinâmica dos Mecanismos**. 1ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2010.

TARTARI FILHO, S. C. Modelagem e Otimização de um Robô de Arquitetura Paralela para Aplicações Industriais. São Paulo, **Dissertação**. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, USP, 2006.