

Memorias del Encuentro Argentino y Latinoamericano de Ingeniería - 2021

Tomo II. Compilación.

- | Biotecnología, nanotecnología, bioingeniería y materiales
- | Historia de la Ingeniería (150ING)
- | Mujeres en ingeniería y cambio social
- | Ingeniería sostenible. Energía, eficiencia energética, gestión ambiental y cambio climático



Editores: Luis Fernández Luco | Cristina Vázquez | Alejandra Acuña Villalobos | Guillermo Lombera | Roberto Giordano Lerena

Memorias del Encuentro Argentino y Latinoamericano de Ingeniería

Memorias del Encuentro Argentino y Latinoamericano de Ingeniería : 2021 : tomo II / compilación de Luis Fernandez Luco ... [et al.]. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Luis Fernandez Luco, 2022.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga.

ISBN 978-987-88-7245-2

Obra Completa 978-987-88-7180-6

1. Ingeniería. I. Fernandez Luco, Luis, comp. II. Título.

CDD 620.00982

ISBN 978-987-88-7245-2



9 789878 872452

Función de estado del sistema dinámico de accionamiento de servosistemas utilizados en prótesis mioeléctricas

Alvarez Picaza, C.^a; Veglia, J.I.^a; Ferrari, C.R.^b; Chiozza, J.A.^a; Valdez, A. D.^a; Schelisinger, P.L.^a

a. Facultad de Ciencias Exactas – Universidad Nacional del Nordeste

b. Facultad de Medicina – Universidad Nacional del Nordeste

cpicaza@gmail.com

Resumen

La participación de la Ingeniería en las ciencias que afectan la vida de las personas ha generado disciplinas relativamente nuevas. La rehabilitación es el área biomédica de mayor impacto. En este trabajo se busca representar la solución de la ecuación de estado de la dinámica que interviene en cada una de los variables que contribuyen al funcionamiento estable de una planta motora que es utilizada en prótesis mioeléctricas. El aporte de cada una de ellas debe contribuir a la estabilidad global del sistema dinámico. A través de la Teoría de Control Moderno es posible afrontar cualquier situación problemática utilizando ecuaciones de estado sin considerar reglas matemáticas utilizadas a partir de algoritmos recursivos. Al trabajar en el espacio de estados utilizando herramientas del control, es posible acceder a desarrollos y análisis que complementan los realizados en el espacio de los tiempos y en el de las frecuencias. La simplificación de los distintos desarrollos se verá reflejada con nuevos hallazgos, dando valor a nuevos conceptos como la matriz de transición y la controlabilidad. La cuantificación de algunas propiedades para realizar los movimientos requeridos, es necesaria para la manipulación de la función de la señal de control que se deba implementar. Los resultados obtenidos nos permitieron discernir y graficar las trayectorias en el espacio de estados de las variables intervenientes.

Abstract

Engineering's involvement in the sciences that affects people's lives has generated relatively new disciplines. Rehabilitation is the biomedical area with the greatest impact. This work seeks to represent the solution of the equation of state of the dynamics that interfere with each of the variables that contribute to the stable functioning of a motor plant that is used in myoelectric prostheses. The contribution of each one of them must contribute to the global stability of the dynamic system. Through Modern Control Theory, it is possible to face any problematic situation using state equations without considering mathematical rules used for recursive algorithms. When working in the state space using control tools, it is possible access to developments and analyzes that complement those carried out in the space of time and frequency. The simplification of the different developments will be reflected with new findings, giving value to new concepts such as the transition matrix and controllability. The quantization of some properties to perform the required movements is necessary for the manipulation of the control signal function to be implemented. The results obtained allowed us to discern and graph the trajectories in the state space of the intervening variables.

Palabras clave: Modelización, Estados, Control, Matriz de Transición.

INTRODUCCIÓN

La contribución de la ingeniería biomédica al área de rehabilitación consiste en el diseño de dispositivos útiles para automatizar las distintas terapias y dar a los pacientes la autonomía necesaria para un mejor desenvolvimiento a nivel social [1]. Más de mil millones de personas, o sea en torno al 15% de la población mundial, tienen algún tipo de discapacidad. El número de personas con discapacidad está aumentando drásticamente. Ello se debe, entre otras causas, a las tendencias demográficas y al aumento de la prevalencia de enfermedades crónicas.

Es probable que casi todas las personas experimenten alguna forma de discapacidad – temporal o permanente – en algún momento de su vida. Las personas con discapacidad tienen menos acceso a los servicios de asistencia sanitaria, por lo que en muchas ocasiones sus necesidades asistenciales quedan desatendidas.

Si existen servicios de salud para personas con discapacidad, son siempre de calidad deficiente y no tienen recursos suficientes. Hay una necesidad urgente de ampliar los servicios destinados a las personas con discapacidad en la atención primaria de salud, especialmente las intervenciones de rehabilitación [2].

Es esencial para llegar a un modelo útil de aplicación, terminada la prótesis para personas con discapacidad, evaluar casos relacionados con un modelo eficiente del manejo de energía y presentar un regulador óptimo de un servomotor diseñado para generar movimientos de la articulación de un brazo robótico en la rehabilitación de un paciente [3].

El diseño de las extremidades artificiales requiere un conocimiento completo no solo de la mecánica de los mecanismos, sino también una comprensión clara de los dispositivos electromecánicos, entre los cuales los motores de accionamiento juegan un papel clave en el área de las prótesis.

La velocidad máxima, la fuerza y la estabilidad de la extremidad anatómica artificial aún no son comparables con la real (humana).

Estas limitaciones se deben a restricciones físicas de la tecnología actual para lograr las propiedades que exhibe la extremidad natural. Combinar la velocidad y la fuerza muscular con un actuador tecnológico no es una tarea fácil,

principalmente al elegir un motor de accionamiento con la relación adecuada de velocidad-par [4]. La inestabilidad de los motores de accionamiento se suma a la complejidad del diseño adecuado de las prótesis.

La cinemática específica de un brazo mecánico estudia la descripción analítica del desplazamiento espacial del robot como función del tiempo en particular, y las relaciones entre la posición de las variables de articulación y la orientación del brazo del robot.

La cinemática directa trata de determinar las coordenadas de posición a partir del conocimiento de las variables de articulación, es decir, a partir de los ángulos que forman. Las coordenadas cartesianas dependen de las coordenadas articulares.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \vec{f}(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$$

La cinemática inversa busca determinar los ángulos que debe formar cada articulación para llevar el brazo a una posición (o coordenadas) deseada conocida.

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \vec{f}^{-1}(x, y, z)$$

Es posible tratar de elegir algún método que nos permita el control del manipulador. Este control tiende a permitir que el efecto final se ubique en una determinada posición, y con una dada orientación, en forma tal de realizar alguna tarea.

Para alcanzar un punto X cualquiera del espacio accesible del manipulador, significa ubicar los pares cinemáticos, que en este tipo de robot son todos de rotación, en una dada posición angular.

Si se desea pasar a otro punto X_1 del espacio, lo que se debe hacer es calcular cual será el ángulo que deben rotar todas las articulaciones. Dado que la solución del problema no es única, se deberá utilizar algún tipo de estrategia para realizar los movimientos, tanto en su secuencia como en su valor. Es improbable que estos movimientos se hagan todos juntos, sino que conviene que tenga lugar uno por vez. También

se debe controlar la aceleración y la velocidad de los movimientos, a fin de no superar ciertos valores máximos.

En los sistemas que requieren mucha precisión, se utilizan motores de corriente continua, que son de escasa potencia.

El objetivo de este trabajo es encontrar la Función de Estado del servomotor que impulsa los movimientos del brazo manipulador.

MATERIALES Y MÉTODOS

A partir de aquí, se trabajará con el modelo de motor que va a ser el encargado de realizar en forma artificial las acciones musculares de la articulación del codo.

Modelo del Servomotor

Tal como fuera descripto por Alvarez Picaza et al [5], se presenta el siguiente motor de corrientes continua.

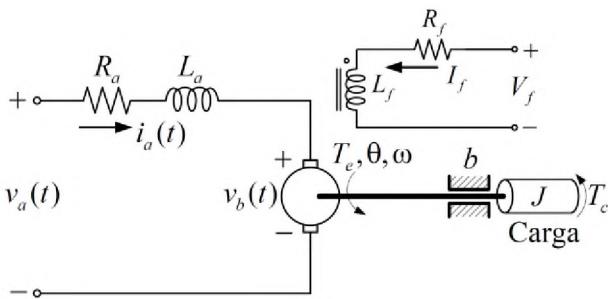


Figura 1: Diagrama eléctrico del servomotor.

El modelo a considerar impulsa una carga a través de un eje rígido. Se tiene en cuenta que la corriente de campo I_f o el flujo de campo son constantes, esta máquina puede ser controlada únicamente por la tensión $v_a(t)$ aplicada a la armadura[6].

Existe una relación entre el par eléctrico de torsión $T_e(t)$ y la corriente en la armadura $i_a(t)$, como se indica en la ecuación (1). Dicha relación es la constante de torque K_t ,

$$T_e(t) = K_t i_a(t) \quad (1)$$

La velocidad angular del eje es directamente proporcional a la tensión en bornes del motor $v_b(t)$,

$$v_b(t) = K_b \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (2)$$

donde K_b es la constante de velocidad del motor. El momento de inercia total de la carga es J y θ el desplazamiento angular, b es el coeficiente de rozamiento viscoso y T_c es el par producido por la carga.

En el circuito de la armadura, se verifica que,

$$v_a(t) = u(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + K_b \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (3)$$

aquí R_a y L_a representan la impedancia del bobinado de la armadura.

Optamos por trabajar en el espacio de estados, cuyas ecuaciones contienen toda la información de la dinámica interna del sistema, permiten incluir fácilmente las condiciones iniciales y en general son de resolución simple. La Figura 2 muestra el modelo del servomotor de en el espacio de estados [7].

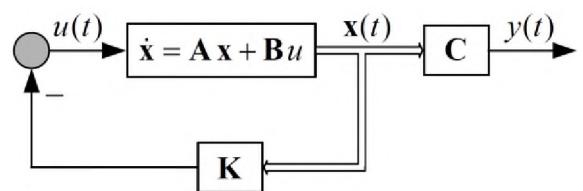


Figura 2: Modelo del servosistema en el espacio de estados.

Elegimos como variables de estado de este sistema a,

$$\begin{aligned} x_1 &= \dot{\theta}(t) = \omega(t) \\ x_2 &= i_a(t) \end{aligned} \quad (4)$$

Siendo x_1 la velocidad angular y x_2 la corriente de armadura.

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}(t) \\ \dot{i}_a(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -b/J & K_t/J \\ -K_b/L_a & -R_a/L_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/L_a \end{bmatrix} u(t) \quad (5)$$

$$y = [I \ 0] \begin{bmatrix} \omega(t) \\ i_a(t) \end{bmatrix}$$

Matriz de Transición

La matriz e^{At} se denomina Matriz Transición de Estados y se la denota por,

$$\Phi(t) = e^{At} = (\mathbf{I} + At + \frac{1}{2!} \mathbf{A}^2 t^2 + \frac{1}{3!} \mathbf{A}^3 t^3 + \dots) \quad (6)$$

La misma gobierna las trayectorias de los estados en un intervalo de tiempo finito t . Es la respuesta natural del sistema.

Función de Estado

Sea un sistema de control,

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ y &= \mathbf{Cx} + Du\end{aligned}\quad (7)$$

Para conocer la respuesta o salida del sistema para una determinada entrada y un conjunto de condiciones iniciales dadas, se debe encontrar la solución de la Ecuación de Estado del sistema.

Se busca la solución $\mathbf{x}(t)$ para un sistema del tipo (7),

$$\dot{\mathbf{x}} - \mathbf{Ax} = \mathbf{Bu} \quad (8)$$

Partimos de la Ecuación de Estado del sistema y la analizamos en el espacio de Laplace.

$$s\mathbf{X}(s) - \mathbf{X}(0) = \mathbf{AX}(s) + \mathbf{BU}(s) \quad (9)$$

Para finalmente,

$$\mathbf{X}(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{X}(0) + (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} \mathbf{U}(s) \quad (10)$$

Antitransformando el sistema obtenemos,

$$\mathbf{x}(t) = e^{\mathbf{At}} \mathbf{x}(0) + \int_0^t e^{\mathbf{A}(t-\tau)} \mathbf{B} \mathbf{u}(\tau) d\tau \quad (11)$$

La solución es la suma de un término formado por la transición del estado inicial (Respuesta Natural) y un término que surge del vector de entradas (Respuesta Forzada).

Controlabilidad

A grandes rasgos, la controlabilidad estudia la posibilidad de guiar o llevar los estados de un sistema hacia una posición deseada mediante la señal de entrada. La ecuación de estado (7) o el par $[\mathbf{A}, \mathbf{B}]$ se dice que es controlable si para cualquier estado inicial $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$ y cualquier estado final \mathbf{x}_1 , existe una entrada \mathbf{u} que transfiera \mathbf{x}_0 a \mathbf{x}_1 en un intervalo de tiempo finito.

Para que el sistema sea controlable se debe cumplir que el determinante de la matriz de Controlabilidad sea distinto de cero,

$$\det(\mathcal{C}) = |\mathbf{B} \quad \mathbf{AB} \quad \mathbf{AB}^2 \quad \dots \quad \mathbf{AB}^{n-1}| \neq 0 \quad (12)$$

o bien,

$$\text{rango}(\mathcal{C}) = n \quad (13)$$

siendo \mathcal{C} la Matriz de Controlabilidad.

RESULTADOS

Los datos para el modelo de simulación de servomotor, se obtuvieron de un motor real (modelo RE Maxon® 40-40 mm) [8] utilizado para conducir prótesis biomecánicas [9]. Los siguientes valores fueron tomados del catálogo del fabricante:

$$R_a = \text{Resistencia de la armadura} = 1,16\Omega.$$

$$L_a = \text{Inductancia de la armadura} = 0,329 \text{ mH}.$$

$$K_t = \text{Constante de torque} = 60,3 \text{ mNm/A}.$$

$$K_b = \text{Constante de velocidad} = 158 \text{ rpm/V}.$$

$$b = \text{Coeficiente de rozamiento} = 3,04 \text{ rpm/mNm}.$$

$$J = \text{Momento de inercia} = 138 \text{ gcm}^2.$$

De (11) obtenemos la solución de la ecuación de estado del sistema,

$$\begin{aligned}\mathbf{x}(t) = & [a/b * \exp(-3*t) * c^{(1/2)} * \sin(1/d * f^{(1/2)} * t) \\ & + \exp(-3*t) * \cos(1/g * h^{(1/2)} * t)] ; \\ & [-j/m * \exp(-3*t) * n^{(1/2)} * \sin(1/q * r^{(1/2)} * t) \\ & + \exp(-3*t) * \cos(1/p * w^{(1/2)} * t)]\end{aligned}$$

Numéricamente,

$$\mathbf{x}(t) = \frac{[1,0188 - 0,0188 * e^{(-1,7739*t)} * \cos(14,3797*t) + 0,0063*t]}{[0,9937 * e^{(-1,7739*t)} * \cos(14,3797*t) + 0,0063]}$$

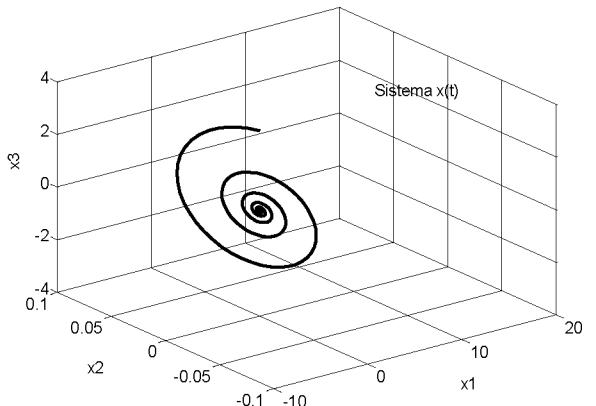


Figura 3: Función del sistema en el espacio de estados.

La Figura 3 muestra la función de estado de accionamiento del servosistema, la cual es convergente lo que significa que para esos parámetros de trabajo, el sistema es controlable.

De igual manera, se pueden encontrar las funciones de estado para cada una de las

variables tal como puede visualizarse en la Figura 4,

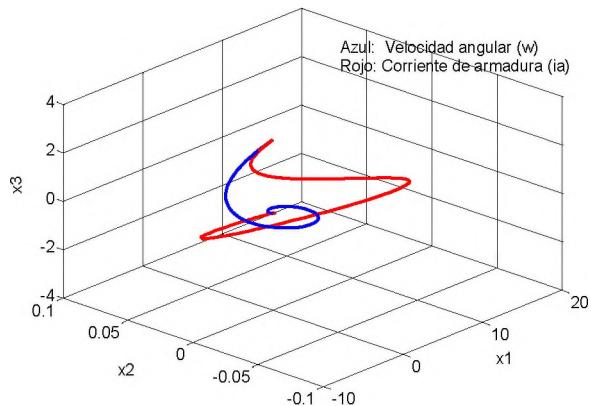


Figura 4: Función de las variables en el espacio de estados.

La transición de estados [10] que gobierna al sistema (Figura 3) viene dada por,

$$\Phi(t) = \begin{bmatrix} -0,0207 & 0,0050 \\ -5,5005 & -0,0608 \end{bmatrix}$$

El correspondiente diagrama de superficie puede observarse en la Figura 5,

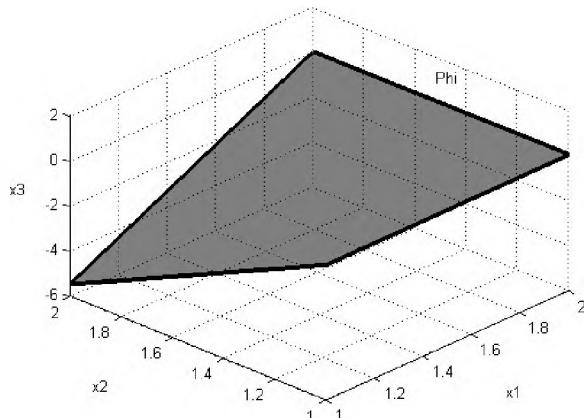


Figura 5: Diagrama de la matriz de transición de estados.

CONCLUSIONES

Trabajar en el espacio de estados haciendo uso de las herramientas de la Teoría de Control Moderno permite hallar nuevos parámetros de accionamiento del servomotor utilizado en

prótesis mioeléctricas, complementando así con los demás datos que asiduamente pueden obtenerse de trabajar en el espacio de los tiempos y de las frecuencias.

Tanto las distintas funciones de estado como la matriz de transición pueden graficarse y realizar un detallado análisis cualitativo del comportamiento intrínseco del sistema dinámico.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado dentro del marco del Proyecto de Investigación 18F011 financiado por la Secretaría General de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional del Nordeste.

REFERENCIAS

- [1] *El libro blanco de la robótica en España. Investigación, tecnologías y formación.* (2011). Ministerio de Ciencia e Innovación. Gobierno de España. CEA comité español de automática. 1ª Edición.
- [2] <https://www.who.int/es/news-room/factsheets/detail/disability-and-health>. May, 2021.
- [3] Cortes Reyes F. (2011). *Robótica, control de robots manipuladores*. Editorial: Alfaomega Grupo EDITOR.
- [4] Weir R. F. (2003). *Design of Artificial Arms and Hands for Prosthetic Applications in Standard Handbook of Biomedical Engineering and Design*. Myer K. Editor, McGraw-Hill Publisher. NY.
- [5] Alvarez Picaza C., Pisarello M.I., Veglia J.I., Monzón J.E. (2017). *Regulador con Control Automático - Observación de la Estabilidad en Prótesis Mioeléctricas*. Revista RADI-Año 5-Vol. 10. ISSN 2314-0925.
- [6] Alvarez Picaza C, Pisarello MI and Monzón JE (2014). *Model of optimal energy regulation for the articulation of a robotic manipulator*. VI Latin American Congress on Biomedical Engineering. CLAIB (Berlin: Springer Berlin Heidelberg) Pp 908-911.
- [7] Alvarez Picaza C., Pisarello M.I., Monzón J.E. (2015). *Análisis teórico de la regulación de energía de servomotores utilizados en manipuladores biomecánicos*. Annals of the XX Congreso Argentino de Bioingeniería. IX Jornada de Ingeniería Clínica.
- [8] RE 40 ?40 mm, Graphite Brushes, 150 Watt. Catálogo.

- [http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/root/8816798990366/15-142-EN.pdf.](http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/root/8816798990366/15-142-EN.pdf)
[On line. Fecha de acceso: 05/2015]
- [9] Alvarez Picaza C., Pisarello MI., Monzón JE. (2016). *Analysis of the stability control of motors used in biomechanical prostheses*. VII Congreso Latinoamericano Ingeniería Biomédica. CLAIB 2016
- [10] Ogata, K. (2007). *Ingeniería de Control Moderna*. 5^{ta} ed., Ed. España: Pearson Prentice Hall.