

NUEVO MODELO DE FRICCIÓN PARA ROBOTS MANIPULADORES

Ernesto Daniel Rodríguez Hernández

Brandon Erick Sánchez García

Fernando Reyes Cortés

Ma. Aurora Vargas Treviño

José Luis Oviedo Barriga

Facultad de Ciencias de la Electrónica, Opción en Automatización

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Maestría en Ciencias de la Electrónica

Dirección: 18 sur y Av. San Claudio. Col San Manuel C. U.

Tel. 2222295500 ext. 7410

e-mail: d_dernesto@hotmail.com

RESUMEN.

La fricción es un fenómeno presente en todos los sistemas robóticos, el cual moldea la respuesta transitoria y produce efectos adversos en el desempeño de los algoritmos de control. Los avances en la tribología han dado paso a nuevos modelos de fricción basados en el comportamiento microscópico del fenómeno, lo que a su vez ha permitido la implementación de dichos modelos en algoritmos de control con compensación de fricción mejorando el desempeño y eliminando los efectos adversos relacionados a este fenómeno. En este artículo se presenta la propuesta de un nuevo modelo de fricción para robots manipuladores basado en el comportamiento característico del modelo de LuGre, así su análisis experimental en un robot manipulador de 3GDL con servomecanismos rotacionales. Palabras Clave: fricción, modelo, LuGre, Stribeck, Coulomb, viscosa, histéresis, robot.

ABSTRACT.

Friction is a phenomenon present in all robotic systems, which molds the transient response and produces adverse effects on the performance of control algorithms. Advances in tribology have given way to new friction models based on the microscopic behavior of the phenomenon, which in turn has allowed the implementation of these models in friction-compensated control algorithms improving performance and eliminating adverse consequences related to this phenomenon. This article presents the proposal for a new friction model for manipulative robots based on the characteristic behavior of the LuGre model, as well as its experimental analysis in a 3GDL manipulating robot with rotational servomechanisms.

Keywords: friction, model, LuGre, Stribeck, Coulomb, viscous, hysteresis, robot.

1. INTRODUCCIÓN

La fricción es un fenómeno presente en todos los sistemas que involucran partes en movimiento. Su descubrimiento se remonta a la época de Leonardo Da Vinci, desde sus trabajos sobre el estudio del movimiento de bloques sobre superficies, y ha sido estudiado ampliamente desde entonces [1], [2].

Los robots manipuladores se han vuelto una parte fundamental en la industria para la realización de diversas tareas de precisión o trabajo pesado, tales como manipulación de objetos, clasificación y transporte de materiales, soldadura, pintura, etc. Para lograr un desempeño adecuado en estas tareas, se requiere de un control robusto y de un conocimiento amplio del modelo dinámico del robot, lo que incluye entre otras cosas la fricción en los actuadores.

El fenómeno de fricción es un efecto disipativo que convierte la energía cinética en térmica, e introduce una componente de amortiguamiento que modela la forma de la respuesta transitoria. A través de los años, la fricción se ha representado a través de los modelos clásicos de la fricción viscosa y fricción de Coulomb. Gracias a los avances logrados en el campo de la tribología, se ha logrado comprender más a fondo cómo es el comportamiento de la fricción a nivel microscópico, por lo que ha sido posible la generación de modelos más completos para la representación de la fricción [3].

Uno de los modelos de fricción más recientes es el modelo de LuGre [4], el cual es un modelo dinámico que representa la fricción como la integración componentes de fricción de Coulomb, fricción viscosa, el efecto Stribeck, así como una región de histéresis. Este modelo, si bien es una representación muy acertada del fenómeno de fricción, posee algunos aspectos negativos cuando se pretende implementarlo en controladores para robots manipuladores, pues al ser un modelo dinámico, introduce una variable de estado adicional al sistema en espacio de estados, incrementando el número de grados de libertad del robot.

Con esto, se propone que es posible diseñar un nuevo modelo de fricción orientado a robots manipuladores de transmisión directa, en el que se consideren todos los elementos incluidos en el modelo de LuGre a modo de una función estática dependiente de la velocidad, generando una mejora en la precisión del modelo dinámico sin incrementar los grados de libertad del robot.

En este artículo se propone un nuevo modelo de fricción formado por la adecuada combinación de funciones hiperbólicas que incluye los efectos del modelo de fricción de LuGre. Además de un análisis experimental del modelo aplicado a un robot manipulador antropomórfico de 3 grados de libertad.

2. DISEÑO Y ANÁLISIS DEL MODELO DE FRICCIÓN

2.1. Modelos de fricción actuales.

Podemos agrupar los modelos de fricción conocidos hasta ahora en 2 grupos: modelos estáticos y dinámicos [4]. En el caso de los modelos estáticos, se considera a la fricción como una función dependiente de la diferencia de velocidad de superficies con deslizamiento y son la manera más simple de representar el fenómeno de fricción. Los modelos estáticos son generalmente variaciones de la ley de fricción de Coulomb, algunos de los más conocidos son los modelos de Karnopp, Quinn, Kikuuwe, entre otros [5]. Por otra parte, los modelos dinámicos son una representación que abordan la fricción como un fenómeno dinámico, y son capaces de reproducir elementos microscópicos de la fricción, tales como la histéresis. Algunos de los modelos dinámicos de fricción más conocidos son los modelos de Dahl y el modelo de LuGre, este último nombrado así por la colaboración entre los grupos de control de Lund y Grenoble.

2.2. Modelo propuesto.

Observando las componentes de los modelos de fricción documentados, tanto dinámicos como estáticos, se propone la siguiente estructura matemática como modelo de fricción:

$$\tau_f = f_c \frac{\sinh^{2s-1}(\delta\dot{q})\cosh(\delta\dot{q})}{1 + \sinh^{2s}(\delta\dot{q})} + b\dot{q} \quad (1)$$

donde:

- τ_f es la fuerza de fricción con dirección contraria al movimiento de los actuadores [Nm],
- \dot{q} es la velocidad articular entre superficies de contacto [grados/s],
- f_c es el coeficiente de fricción de Coulomb,
- δ es el coeficiente de disipatividad,
- s es el coeficiente de efecto Stribeck.
- b es el coeficiente de fricción viscosa.

El modelo mostrado en (1) es claramente un modelo estático, por lo que su implementación en un controlador con compensación de gravedad puede realizarse de manera análoga al modelo de fricción típico para robots manipuladores, que incluye únicamente la ley de fricción de Coulomb y fricción viscosa. Analizando el modelo de fricción propuesto es importante notar que el primer componente corresponde a la fricción de Coulomb y la curva de efecto Stribeck, mientras que el segundo elemento comprende a la fricción viscosa.

El diseño del modelo de fricción permite emplear los coeficientes de fricción viscosa y de Coulomb de la misma manera que se haría en los demás modelos estáticos. El coeficiente de efecto Stribeck, es el encargado de darle forma a la curva característica que existe en la transición de la componente de fricción estática y de Coulomb a la componente de fricción viscosa. La curva de efecto Stribeck se moldea de acuerdo con las necesidades del sistema considerando que esta se encuentra directamente relacionada con la interacción entre las superficies en contacto y la estructura microscópica de sus asperezas. Para usos prácticos, el coeficiente de efecto Stribeck $s \in \mathbb{N}^+$ y su aportación al modelo de fricción propuesto se muestran a continuación:

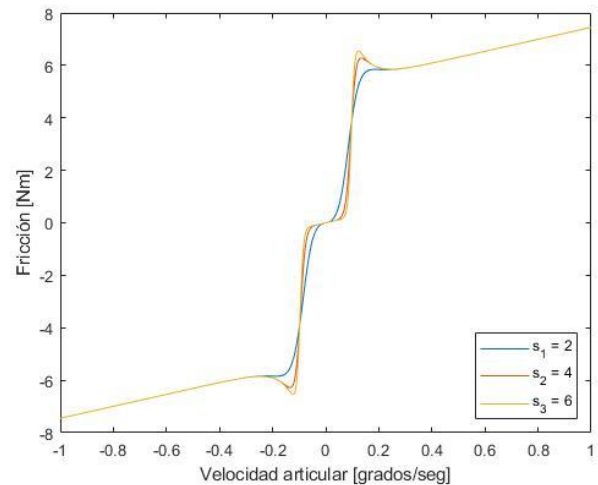


Figura 1. Variaciones en coeficiente de efecto Stribeck.

La figura 1 muestra la curva característica del modelo de fricción propuesto y los efectos que producen las variaciones en el coeficiente de efecto Stribeck, conservando el resto de los parámetros constantes. Los parámetros utilizados en la simulación del modelo de fricción en la figura 1 se muestran a continuación:

Tabla 1. Parámetros de simulación con variaciones en s .

Parámetro	Notación	Valor
Coeficiente de fricción de Coulomb	$fc1$	5.17 Nm
	$fc2$	5.17 Nm
	$fc3$	5.17 Nm
Coeficiente de fricción viscosa	$b1$	2.28 (Nmseg ²)/grad
	$b2$	2.28 (Nmseg ²)/grad
	$b3$	2.28 (Nmseg ²)/grad
Coeficiente de disipatividad	$\delta1$	9
	$\delta2$	9
	$\delta3$	9
Coeficiente de efecto Stribeck	$s1$	2
	$s2$	4
	$s3$	6

El coeficiente de disipatividad $\delta \in \mathbb{R}_+$ empleado en el modelo es un parámetro de diseño que moldea la zona muerta generada en la región vecina al origen. Este comportamiento puede observarse en algunos casos experimentales de fricción generados por el modelo de LuGre [6].

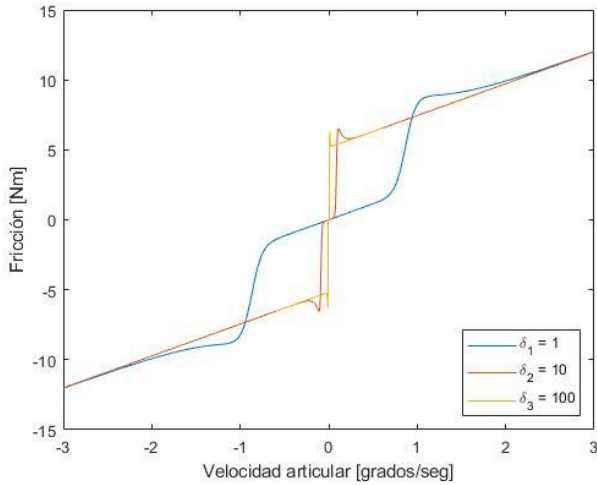


Figura 2. Variaciones en δ .

En la figura 2 se analizan los efectos que producen las variaciones en el parámetro δ en el modelo de fricción propuesto. En esta simulación se utilizaron los siguientes parámetros:

Tabla 2. Parámetros de simulación con variaciones en δ

Parámetro	Notación	Valor
Coeficiente de fricción de Coulomb	$fc1$	5.17 Nm
	$fc2$	5.17 Nm
	$fc3$	5.17 Nm
Coeficiente de fricción viscosa	$b1$	2.28 (Nmseg ²)/grad
	$b2$	2.28 (Nmseg ²)/grad
	$b3$	2.28 (Nmseg ²)/grad
Coeficiente de disipatividad	$\delta1$	1
	$\delta2$	10
	$\delta3$	100
Coeficiente de efecto Stribeck	$s1$	6
	$s2$	6
	$s3$	6

En general, este parámetro es seleccionado de acuerdo con la aplicación del control en el que se implementará el modelo de fricción, pues al igual que ocurre en el modelo de Karnopp, existe una región de transición entre la velocidad de giro positiva a negativa y viceversa, la cual corresponde a la ubicación de la región de histéresis. Al modificar el parámetro

δ , es posible reducir la rapidez en el cambio de dirección de la fricción, lo que podría interpretarse como un cambio en la fricción estática. Una selección adecuada de los parámetros de diseño δ y s proporcionan una respuesta que puede asemejarse a los modelos de fricción antes mencionados, especialmente en el modelo de LuGre.

2.3. Análisis experimental.

Para sustentar la propuesta aquí presentada, ahora se describe el desarrollo del análisis experimental del modelo propuesto. Empleando el robot de investigación del laboratorio de robótica y control de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla; del tipo antropomórfico con 3 grados de libertad (figura 3) y equipado con motores sin escobillas, de transmisión directa sin ningún tipo de reductor en sus articulaciones.



Figura 3. Robot manipulador experimental.

Las características de este robot son favorables para el análisis de fricción, pues este tipo de actuadores no generan fricción adicional debido a la interacción de engranajes o juego mecánico; únicamente se considera el rozamiento de las superficies en las articulaciones. El robot cuenta con encoders en cada una de sus articulaciones de hasta 1024000 p/rev, los cuales permiten recopilar datos importantes para observar el comportamiento de la fricción en el mismo. Los actuadores del robot experimental poseen las siguientes características.

Tabla 3. Servoactuadores del robot experimental

Eslabón	Modelo	Torque [Nm]	Encoder [p/rev]
Base	DM1050A	50	1024000
Hombro	DM1150A	150	1024000
Codo	DM1015B	15	655360

En el experimento realizado se tomaron en cuenta sus parámetros físicos, previamente conocidos para cada una de sus articulaciones, las cuales se muestran en la tabla 4.

Los parámetros experimentales f_{cn} , b_n , δ_n , s_n , que corresponden al coeficiente de fricción de Coulomb, el coeficiente de fricción viscosa, el coeficiente de disipatividad y el coeficiente de efecto Stribeck respectivamente; representan los parámetros empleados en el análisis de fricción en el robot experimental para el eslabón n .

Tabla 4. Parámetros experimentales del modelo de fricción

Parámetro	Notación	Valor
Coeficiente de fricción de Coulomb	$fc1$	5.17 Nm
	$fc2$	1.90 Nm
	$fc3$	1.73 Nm
Coeficiente de fricción viscosa	$b1$	2.28 (Nmseg ²)/grad
	$b2$	1.20 (Nmseg ²)/grad
	$b3$	0.17 (Nmseg ²)/grad
Coeficiente de disipatividad	$\delta1$	9
	$\delta2$	9
	$\delta3$	9
Coeficiente de efecto Stribeck	$s1$	3
	$s2$	3
	$s3$	3

El experimento realizado consistió en la medición de los parámetros de velocidad articular \dot{q} de cada eslabón durante un tiempo de 19.174494 segundos, en los que se recopilieron 7671 datos discretos que fueron empleados en el modelo propuesto para reproducir el fenómeno de fricción.

2.4. Resultados experimentales.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis de los datos generados por el robot (fig. 3) durante el experimento. Empleando el modelo mostrado en la ecuación 1 para cada uno de los motores del robot considerando sus parámetros fijos.

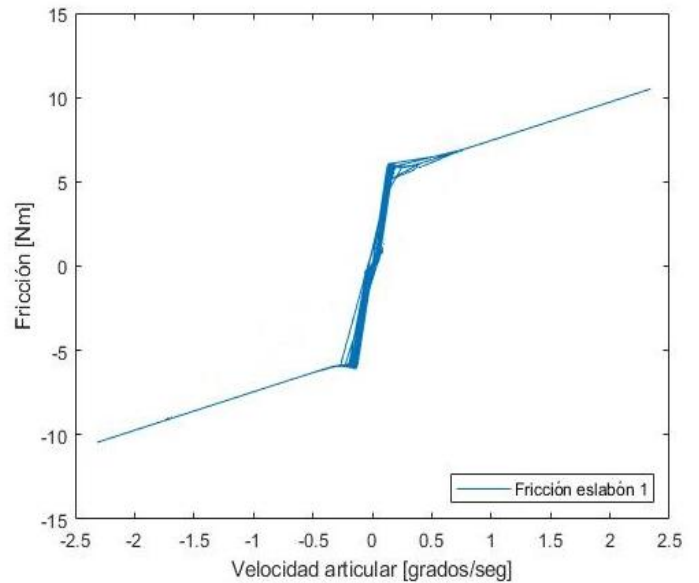


Figura 4. Fricción en eslabón 1 (base).

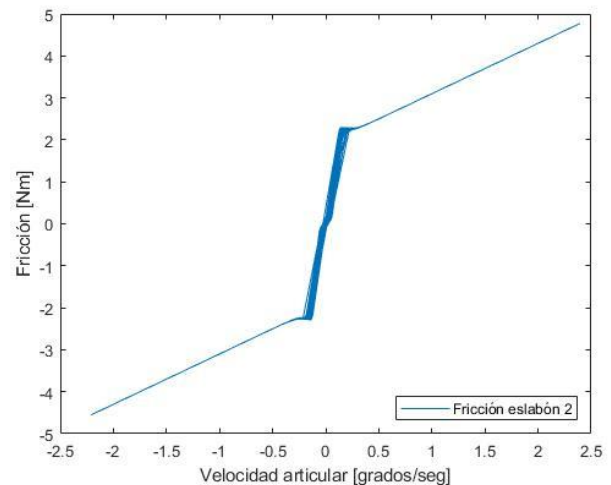


Figura 5. Fricción en eslabón 2 (hombro).

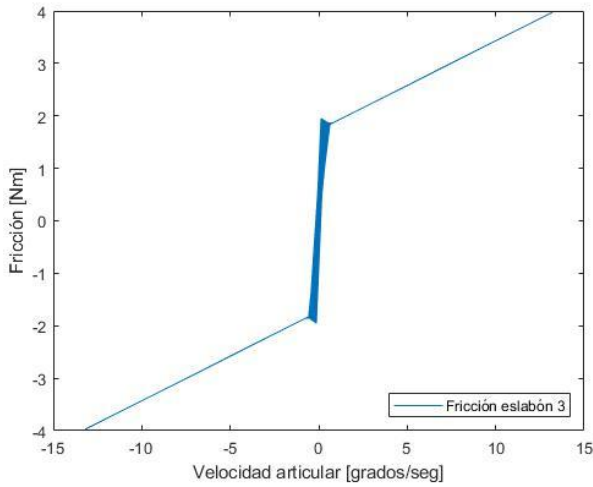


Figura 6. Fricción en eslabón 3 (codo).

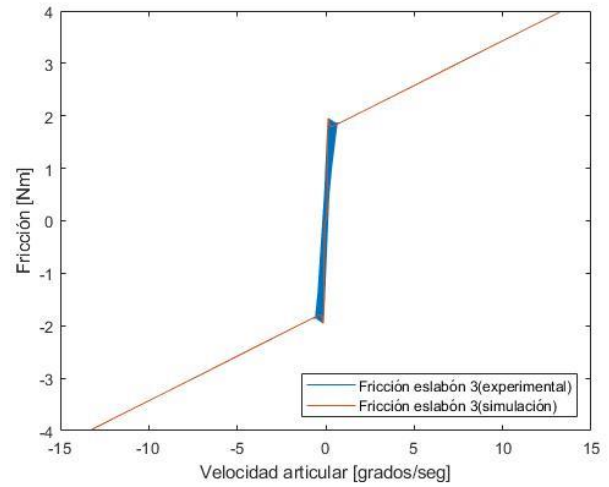


Figura 7. Fricción eslabón 3 (experimental vs simulación)

En las figuras 4 a 6 se muestra la gráfica correspondiente a la fricción en los eslabones base, hombro y codo respectivamente. Es claro que se obtiene una respuesta con la forma característica de la fricción de manera similar a como ocurriría empleando el modelo de LuGre. Los parámetros físicos correspondientes al coeficiente de disipatividad y el coeficiente de efecto Stribeck fueron seleccionados de manera que pudiera apreciarse claramente su influencia en la fricción de los motores.

Es importante notar que las diferencias en el comportamiento de la fricción en cada eslabón son pequeñas y se deben entre otras cosas, al tamaño de la superficie de contacto, la rugosidad de sus asperezas, así como el desgaste natural de los motores. En la figura 4, se observa el mayor coeficiente de fricción de Coulomb debido a su mayor superficie de contacto.

En la figura 5 se observa una comparación directa entre la simulación del modelo de fricción y los resultados del experimento en el eslabón 3 del motor, considerando los mismos parámetros físicos.

Es notable que, en la región correspondiente a la región de histéresis, la recursividad de los datos en la gráfica, generados por los cambios en el sentido de giro resulta en un área de alta vibración que podemos interpretar físicamente como la región de histéresis. Estos cambios repentinos en la región de histéresis se observan frecuentemente cuando se analiza la fricción bajo el modelo propuesto empleando datos experimentales. Con esto, podemos afirmar que en el modelo propuesto se encuentran presentes todos los elementos relevantes del modelo de LuGre (fricción viscosa, fricción de Coulomb, región de histéresis y curva de efecto Stribeck) conservando la naturaleza estática del modelo.

Una ventaja significativa del modelo de fricción propuesto es su naturaleza continua, pues al estar formado por una combinación de funciones hiperbólicas, se evita el uso de funciones discontinuas presentes en la mayoría de los modelos de fricción actuales ya sea estáticos o dinámicos.

3. CONCLUSIONES

El fenómeno de fricción es un aspecto importante en el control de robots manipuladores. Contar con un modelo que represente este fenómeno de forma completa y precisa prepara las condiciones ideales para el diseño de controladores de alto desempeño y sistemas robóticos con compensación de fricción. Se dio validez al modelo de fricción presentado en este trabajo mediante el análisis experimental, comparando los datos obtenidos con modelos documentados. La implementación de los modelos de fricción en robots manipuladores requiere que estos sean flexibles, por lo que la propuesta realizada en este trabajo es una gran alternativa a los modelos clásicos de fricción y los modelos dinámicos existentes. Existen aún muchas posibilidades de investigación y problemas abiertos en el campo de la robótica para la mejora de los modelos de fricción existentes, el modelo de fricción diseñado en este

trabajo es la base de futuro análisis y mejora de modelos de fricción para robots manipuladores.

Referencias.

- [1] Bhushan, B., Author, and Ko, P. L., Reviewer (January 15, 2003). "Introduction to Tribology." ASME. Appl. Mech. Rev. January 2003; 56(1): B6-B7.
- [2] C. Canudas de Wit, H. Olsson, K. J. Astrom and P. Lischinsky, "A new model for control of systems with friction," in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 40, no. 3, pp. 419-425, March 1995, doi: 10.1109/9.376053.
- [3] Sören Andersson, Anders Söderberg, Stefan Björklund, "Friction models for sliding dry, boundary and mixed lubricated contacts", Tribology Intenational 40, April 2007, pp. 580-587.
- [4] Olsson, H 1996, "Control Systems with Friction". Lund Institute of Technology (LTH), Doctoral Thesis (monograph), 1996.
- [5] Piatkowski, Tomasz. "Dahl and LuGre dynamic friction models — The analysis of selected properties. Mechanism and Machine Theory", Mechanism and Machine Theory, 73, March 2014, pp. 91-100.
- [6] K. Johanaström and C. Canudas-de-Wit, "Revisiting the LuGre friction model," in IEEE Control Systems Magazine, vol. 28, no. 6, pp. 101-114, Dec. 2008, doi: 10.1109/MCS.2008.929425.
- [7] R. Kikuuwe, N. Takesue, A. Sano, H. Mochiyama, H. Fujimoto, Fixed-step friction simulation: from classical Coulomb model to modern continuous models, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, 2-6 Aug., Canada, 2005, pp. 3910-3917.
- [8] A. Mehmood, S. Laghrouche, M. El Bagdouri and F. S. Ahmed, "Sensitivity analysis of LuGre friction model for pneumatic actuator control," 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Lille, 2010, pp. 1-6, doi: 10.1109/VPPC.2010.5729116.