

Revisión y Estudio de Técnicas de Inteligencia Artificial para la Compensación de la Fricción en Sistemas Electromecánicos

Rodolfo Haber ^a, Agustín Gajate ^{a,*}, Marcelino Novo ^b, Carlos R. de Yurre ^b, Julio Zurbitu ^b

^a Centro de Automática y Robótica (CSIC-UPM), Ctra. Campo Real Km. 0.200, 28500, Arganda del Rey (Madrid), España.

^b Fagor Aotek S. Coop., Bº San Andrés, nº 19, 20500, Arrasate-Mondragón (Guipuzkoa), España.

Resumen

El nivel de competitividad en el campo de la fabricación impone el desarrollo de controles numéricos con mejores prestaciones, mayores precisiones, más flexibles y con mayor valor añadido como vía para la diferenciación en el mercado. La mejora en la precisión de los servomecanismos pasa indisolublemente por una mejor compensación de las no linealidades inherentes a estos sistemas. Gana importancia por tanto, el modelado de no linealidades duras como la fricción, como base para el desarrollo ulterior de sistemas de compensación que se traduzcan en un mejor comportamiento del sistema de control. En este trabajo, fruto de la colaboración con FagorAutomation, se hace una revisión del estado del arte en este campo, específicamente centrado en los sistemas de compensación de fricción basados en técnicas de Inteligencia Artificial. Además, se analizan y valoran las mejores soluciones científico-técnicas con vistas al desarrollo e implementación de una estrategia de compensación inteligente que garantice mejores prestaciones del servosistema.

Palabras Clave:

Fricción, Inteligencia Artificial, Estrategias de Compensación, Servomecanismos.

1. Introducción

En la actualidad, a pesar de los grandes progresos en áreas como las Ciencias de los Materiales, la mecánica de precisión y la electrónica, las no linealidades siguen afectando a más del 60% del par motor, y no linealidades duras debido a Fricción de Coulomb y la fricción estática degradan seriamente el rendimiento del sistema de control, ya que afectan casi el 30% del par motor en una amplia gama de sistemas electromecánicos en la industria. Las tres no-linealidades básicas que predominan en la observación empírica del comportamiento de los sistemas electromecánicos son la fricción, la holgura y la elasticidad. El término fricción es usado en términos generales para indicar las distintas relaciones existentes entre la velocidad y/o la fuerza con las disipaciones de energía en un dispositivo. La holgura denota la histéresis mecánica, así como determinados impactos en los cuerpos mecánicos. La elasticidad es el término contrario a la rigidez y se refiere a la deformación en los elementos de transmisión de la máquina. La literatura examina estos efectos individualmente o como resultado de la combinación de dos de

ellos, aunque, ciertamente, todos ellos están inherentemente relacionados. Este trabajo se centra fundamentalmente en el fenómeno de la fricción ya que, desde el punto de vista de los sistemas de control, es sobre el que se pueden alcanzar mejoras más notables en las prestaciones de los servosistemas fruto de las compensaciones. Además, si la máquina dispone de reglas de medición, el fenómeno de la holgura se reduce sustancialmente y, por otra parte, la elasticidad se ve notablemente reducida con una buena compensación de la fricción.

Así, en el análisis y el control de los sistemas mecánicos es de suma importancia el fenómeno de fricción, su modelado y compensación eficiente. El fenómeno de la fricción se manifiesta cuando existe un movimiento relativo entre dos superficies en contacto y, según el enfoque clásico, es una fuerza que se opone al movimiento [1]. Sin embargo, los datos recogidos experimentalmente demuestran que es mucho más complejo que una simple oposición al movimiento. La fricción tiene un efecto negativo en los sistemas controlados al degradar el comportamiento a lazo cerrado, causando errores de seguimiento, movimientos intermitentes y, en algunos casos, la generación de ciclos límites.

* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: rodolfo.haber@car.upm-csic.es (R. Haber), agustin.gajate@car.upm-csic.es (A. Gajate), mnovo@aotek.es (M. Novo), yurre@aotek.es (J.C.R. Yurre), jzurbitu@fagorautomation.es (J. Zurbitu), alazkano@aotek.es (A. Lazkano)

URL: <http://gamhe.car.upm-csic.es> (R. Haber)

Desde hace varias décadas, la ingeniería de control ha permitido un análisis y ha propiciado el desarrollo de técnicas para compensar la fricción. Sin embargo, la formalización matemática exacta con un enfoque físico completo no es trivial y en algunas ocasiones el modelado de la fricción es parcial o incompleto. Influyen además de la información incompleta el comportamiento de las redes de comunicaciones en las arquitecturas de monitorización y control [2-4]. De este modo, una posible solución al tema está basada en la utilización de diferentes modelos para representar de forma aproximada la fricción, con dos enfoques diferentes, a saber: los modelos estáticos y dinámicos.

Los modelos de fricción estática se basan principalmente en analizar exclusivamente la relación que existe entre la velocidad y la fricción de dos superficies en contacto. Por su parte, los modelos dinámicos describen las principales dinámicas internas de comportamiento de la fricción, cuando dos superficies se encuentran en contacto. Algunas de las diferentes dinámicas internas que se muestran en este tipo de modelos son: movimientos no deseados denominados deslizamiento-pegado (*slip-stick*), retardo por fricción (histéresis), efecto *Stribeck*, ciclos límite, etc.

Si bien los trabajos pioneros relacionados con la compensación de la fricción a través de modelos (estáticos y/o dinámicos) se remontan a los preliminares de la II Guerra Mundial, y posteriormente se perfeccionan con los fundamentos proporcionados por la Teoría de Control Moderna, en este trabajo se analizarán únicamente las estrategias más contemporáneas basadas en la utilización de técnicas de Inteligencia Artificial.

2. Modelos de Fricción

Tal y como se mencionó anteriormente existen en la literatura una serie de modelos comúnmente aceptados por la comunidad científica que pasamos a sucintamente a revisar a continuación.

2.1. Modelos Estáticos

Para eliminar o disminuir todo lo posible los errores de posicionamiento y de seguimiento de trayectorias, es imprescindible compensar la fuerza de fricción, para lo cual se hace necesario modelarla. Varios autores parten de un concepto básico que sirve como punto de partida, enfocando inicialmente el problema desde el punto de vista estático.

El modelo de fricción más elemental es el llamado modelo de Coulomb en el que la fricción se opone al movimiento, pero se asume que la magnitud de la fricción es constante como se muestra en:

$$F = F_C \operatorname{sgn}(v) \quad (1)$$

donde F representa la fuerza de fricción, F_C representa el nivel de fricción de Coulomb, $v = \dot{x} = dx/dt$ representa la velocidad relativa entre las dos superficies y $\operatorname{sgn}()$ representa la función signo. Este modelo permitió mejorar el desempeño de un sistema, pero no resolvió todas las dificultades ocasionadas por la fuerza de fricción. Por ello, se introdujo un modelo que considerara la fricción viscosa, dado por:

$$F = F_C \operatorname{sgn}(v) + F_v \cdot v \quad (2)$$

donde F_v representa el coeficiente de fricción viscosa. Posteriormente, este modelo se completa teniendo en cuenta que existe una fuerza de fricción en reposo, denominada fuerza de fricción estática (*stiction*) o fuerza de desprendimiento (F_s). Se establece que una fuerza de fricción en reposo es mayor en magnitud a la fuerza de fricción de Coulomb. Sin embargo, las fuerzas externas contrarrestan a la fricción estática bajo un cierto nivel para poder así mantener un objeto en movimiento. Por tanto, la fricción en reposo no puede ser descrita como una fuerza en función de la velocidad, sino que debe ser modelada usando fuerzas externas (F_e). Este fenómeno se puede apreciar en el modelo representado en la Figura 1 (c).

$$F = \begin{cases} F_e & \text{si } v=0 \text{ y } |F_e| < F_s \\ F_s \operatorname{sgn}(F_e) & \text{si } v=0 \text{ y } |F_e| \geq F_s \end{cases} \quad (3)$$

Todas estas aproximaciones contienen componentes que son lineales en velocidad. Sin embargo, Richard Stribeck observó que la fuerza de fricción no se comporta como se observa en la Figura 1 (a)-(c), sino que demuestra que la fuerza depende de la velocidad. El fenómeno anterior es el llamado efecto *Stribeck*.

$$F = \begin{cases} F(v) & \text{si } v \neq 0 \\ F_e & \text{si } v=0 \text{ y } |F_e| < F_s \\ F_s \operatorname{sgn}(F_e) & \text{si } v=0 \text{ y } |F_e| \geq F_s \end{cases} \quad (4)$$

donde $F(v)$ es una función arbitraria como, por ejemplo, la que se muestra en la Figura 1 (d). Aunque esta función ha sido parametrizada por varios autores, una forma bastante extendida de representar esta no linealidad es la propuesta en (5):

$$F(v) = F_C + (F_s - F_C) e^{-(v/v_s)^2} + F_v v \quad (5)$$

donde F_C es el nivel de Fricción de Coulomb, F_s es el nivel de fuerza de desprendimiento y v_s es la velocidad de *Stribeck*.

El efecto *Stribeck* es un fenómeno que se presenta a muy bajas velocidades y que presenta una pendiente negativa, lo que en el sistema mecánico se manifiesta como que la fuerza de fricción favorece el movimiento en lugar de frenarlo. Este último efecto en específico puede producir inestabilidad o movimientos no deseados de pegado y deslizamiento (*stick-slip*).

La principal desventaja cuando se usa un modelo como el de la ecuación (4) para simulaciones o propósitos de compensación está en que posee una discontinuidad en $v = 0$ (creando considerables problemas de cálculo) y, por tanto, resulta demasiado idealista. Se ha comprobado que el modelo de fricción discontinua es una simplificación no-física, en el sentido de que el contacto mecánico entre la masa distribuida y la superficie de contacto no puede exhibir un cambio instantáneo en la fuerza [5]. A partir de ahí, se han desarrollado numerosos modelos de fricción sin discontinuidad, entre los cuales se destaca el modelo de Karnopp. En él, la discontinuidad se elimina mediante la introducción de una región muy pequeña (finita) en la zona de velocidad cero, en la que la fuerza de fricción se supone linealmente proporcional a la velocidad hasta un determinado umbral de velocidad (v_{th}). Se ha demostrado experimentalmente que si el umbral de velocidad se encuentra en un intervalo entre 10^{-4} y 10^{-6} m/s, representa un buen compromiso entre la precisión, eficacia y solidez computacional del modelo. La curva característica de fuerza de fricción-velocidad de esta aproximación se muestra en la Figura 1 (e).

Tratando también de reproducir alguna de las dinámicas complejas de la fricción, se desarrolló el conocido como modelo de Armstrong. Este modelo introduce dependencias temporales para la fricción estática y para el efecto *Stribeck*, pero no trata los efectos que aparecen en el pre-deslizamiento. Se ha demostrado experimentalmente que en esta región la fricción tiene un comportamiento casi elástico antes de producirse el deslizamiento. Por ello, se ha observado que cuando se liberan las fuerzas externas aplicadas, se obtiene un desplazamiento permanente (desplazamiento en el pre-deslizamiento). Se podría describir el comportamiento en este estado a través de otra ecuación, pero sería necesario establecer un mecanismo de conmutación entre el modelo del pre-deslizamiento y el modelo de deslizamiento.

Existen en la literatura otra serie de modelos de fricción estáticos como son el modelo de Tustin o el modelo de Lorentzian, entre otros, que no serán tratados en este informe bien porque no son utilizados para la compensación de la fricción debido a su complejidad computacional y ajuste experimental, o bien porque son casos particulares del efecto *Stribeck*.

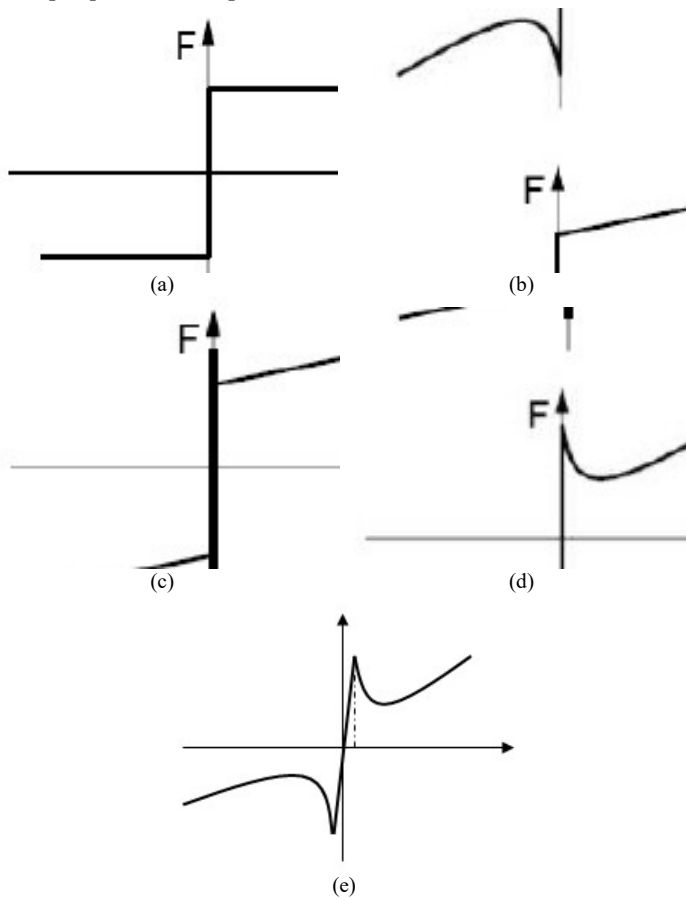


Figura 1: Modelos estáticos de fricción (a) Modelo de Coulomb, (b) Coulomb + Fricción Viscosa, (c) Coulomb + Fricción Viscosa + Fricción Estática, (d) Coulomb + Fricción Viscosa + Fricción Estática + Efecto Stribeck, (e) Modelo de Karnopp (modificación de efecto Stribeck).

Aunque todos los modelos anteriores contribuyeron al diseño de controladores que lograron disminuir los efectos de la fricción, no pudieron eliminarlos por completo al no representar ciertos comportamientos dinámicos. Esto condujo a la aparición de nuevos modelos (dinámicos) con la finalidad de reproducir los

efectos más complejos de la fricción y enfrentar los nuevos retos que a su vez trajo consigo la reducción de los efectos más notorios de la fricción y el efecto de otras no linealidades de menor amplitud. No obstante, estos modelos estáticos siguen siendo ampliamente utilizados para el diseño de sistemas de compensación.

2.2. Modelos Dinámicos

Uno de los modelos utilizados para representar las dinámicas de los efectos más complejos de la fricción es el modelo de Dahl [6]. Este modelo dinámico de fricción es uno de los más sencillos y se basa en la deformación de las asperezas de las superficies de los cuerpos en contacto. Es capaz de considerar el pre-deslizamiento y su desplazamiento permanente. Para la región de deslizamiento el modelo tiende a la fricción de Coulomb, por tanto, no contempla algunos fenómenos que ocurren a bajas velocidades (no capta el efecto *Stribeck* ni, por tanto, el fenómeno *stick-slip*). Debido a ello, una vez que el par aplicado supera la fricción de Coulomb, el deslizamiento se inicia con una aceleración constante y se presentan errores en el control de movimiento y posicionamiento.

Dahl hace la analogía con dos cepillos entrelazados: supongamos que se tienen dos cepillos de dientes entrelazados por las cerdas; cuando uno de ellos tiene movimiento, las cerdas presentan una deflexión promedio que manifiestan la deformación de las asperezas de las superficies en contacto. Para simbolizar la deformación promedio de las cerdas, Dahl utiliza la variable de estados z . El modelo de Dahl en conjunto con la fricción viscosa es el siguiente:

$$\dot{z} = -\sigma_o \frac{|v|}{F_C} z + v \quad (6)$$

$$F = \sigma_o z + F_v v$$

donde F es la fricción, σ_o es el coeficiente de rigidez de las cerdas, v es la velocidad, F_v es el coeficiente de fricción viscosa y F_C es la fricción de Coulomb.

Como puede observarse, el modelo sólo contiene tres parámetros: F_C , F_v y σ_o . Cada uno tiene propios procedimientos para su identificación. Para F_C y F_v , uno de los más utilizados es el basado en la respuesta rampa. El método comienza por aplicar al motor un par tipo rampa, empleando la respuesta de velocidad del mismo. A partir de ella se consideran dos características importantes: la primera es la pendiente que tiene la respuesta de velocidad del motor, y la segunda es el punto de intersección entre la pendiente que forma la respuesta del sistema y el eje del tiempo.

Una modificación del modelo anterior es el Modelo de LuGre [1], que es uno de los modelos más difundidos en la actualidad. El modelo de LuGre está basado en la suposición de que, a nivel microscópico, las imperfecciones de las superficies de contacto presentan hebras elásticas que causan los efectos de fricción.

El modelo de LuGre esta definido por la siguiente ecuación:

$$\dot{z} = \frac{dz}{dt} = v - \frac{|v|}{g(v)} z \quad (7)$$

$$F = \sigma_o z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v$$

donde z es el estado interno y no medible del modelo que representa la deflexión media de las hebras, σ_0 es el coeficiente de rigidez, σ_1 es el coeficiente de amortiguamiento, σ_2 es el coeficiente de fricción viscosa y $g(v)$ representa la función que describe el efecto *Stribeck*. La idea básica en este modelo es que la interacción entre las dos hebras genera los comportamientos de fricción. El valor de la función $g(v)$ en (7) puede ser determinado midiendo la fuerza de fricción en estado estable, cuando $dv/dt = 0$.

Tal y como se ha visto en la parte de modelos estáticos, la parametrización propuesta en (5), es la comúnmente utilizada.

Este modelo captura muy bien los comportamientos de fricción modelados por Dahl y otros comportamientos como el de histéresis y el efecto *Stribeck*. Por tanto, una de las razones por las cuales el modelo de Lugré goza de un alto grado de aceptación es porque logra representar los principales efectos que se han observado experimentalmente: los ciclos límites, el movimiento intermitente, el movimiento retardado y la histéresis.

En los últimos años también se ha trabajado con el modelo dinámico GMS (*Generalized Maxwell slip*), que representa una nueva formulación aproximada del modelo de deslizamiento de Maxwell con variables de estado. La idea básica es combinar en paralelo diferentes masas con sus respectivos desplazamientos. En vez de aplicar leyes de Coulomb simples a cada uno de los bloques, se representa el sistema en su conjunto a través de variables de estado. Así, se obtiene la fuerza de fricción como la sumatoria de las salidas de N elementos en espacio de estados. En resumen, está basado en el modelo de Lugré en combinación con un modelo denominado de Leuven, y está fuera del ámbito de este trabajo una descripción más detallada. En la literatura hay reportados más modelos dinámicos como el modelo de cerdas (*Bristle model*), el modelo integrador de reajuste (*Reset Integrator model*) o el modelo de Bliman y Sorine [1]. Sin embargo, no se detallarán en este artículo ya que no son muy utilizados para el diseño de sistemas de compensación, principalmente por su dependencia de múltiples estados internos, por un ajuste experimental muy tedioso y/o por la falta de disponibilidad de sistemas sensoriales de muy alta resolución.

Los modelos dinámicos hasta aquí descritos son muy útiles para reproducir el comportamiento de la fricción, pero resultan poco prácticos para el diseño de compensadores ya que, o no representan todos los efectos a la perfección, o si lo hacen requerirían de múltiples estimaciones para compensar una fuerza. De ahí que muchos autores compensen la fricción con un modelo simplificado como el modelo de Coulomb o el de Karnopp. Lógicamente, la idea no es compensar únicamente el componente estático, sino tomar este componente como base para un compensador adaptivo que pueda hacer frente a los efectos complejos de la fricción.

3. Técnicas de IA en la Compensación de la Fricción

Son muchos los investigadores que están trabajando en la actualidad en aplicar diversas técnicas borrosas, neuronales, neuro-borrosas, algoritmos genéticos y demás técnicas de AI en el control de servosistemas [3, 7-11]. Aparte de la comprensible reticencia de la industria a introducir técnicas nuevas y no suficientemente sustentadas metodológicamente, existen otros problemas propios según la técnica a utilizar. Por ejemplo, en el caso concreto de las redes neuronales, podrían aparecer problemas relacionados con tiempo de entrenamiento, la obtención y el almacenamiento de datos que representen todo el

rango de operación [12], o la estabilidad de la red neuronal en cuanto a su funcionamiento en rangos distintos al de entrenamiento, por solo mencionar algunos de los más importantes.

Sin embargo, y pese a alguno de los problemas anteriormente mencionados, las técnicas de IA han demostrado ser apropiadas para el control de determinados procesos por su buen comportamiento en presencia de incertidumbre, imprecisión, variación en el tiempo, no-linealidades, etc [13, 14]. En el caso particular de las redes neuronales, las capacidades principales de las redes neuronales que se aprovechan en la ingeniería de control son:

- *Capacidad de modelado*: por su capacidad de ser entrenadas usando conjuntos de datos, se facilita el desarrollo de un modelo del sistema.
- *No linealidad*: las redes tienen la propiedad de “aprender” relaciones no lineales con relativamente poco conocimiento de la naturaleza del proceso.
- *Carácter multivariable*: por su propia estructura y topología, tienen una capacidad de manejar muchas entradas y salidas, por lo que se aplican a sistemas multivariados.
- *Estructura paralela*: la estructura de las redes neuronales es altamente paralela y por ende ofrecen rapidez en el procesamiento paralelo.

Del mismo modo se podrían analizar todas las características de cada una de las técnicas de IA que se han aplicado profusamente en el control de sistemas electromecánicos. Sin entrar explícitamente en este análisis, se muestran a continuación en este artículo algunos de los trabajos más relevantes en cuanto al uso de estas técnicas para la compensación de la fricción estudiando cómo se han aprovechado sus características en tareas de control.

En un interesante trabajo, [15] aprovecharon la propiedad inherente a las redes neuronales de ser aproximadores universales para tomar como base la aproximación de una función parcialmente continua y aplicándola con posterioridad a la compensación de la fricción $F(\dot{q})$. Según los autores, la fricción a compensar sería la suma de la fricción de Coulomb, la viscosa (tanto la positiva como la negativa) y la estática (8).

$$F(\dot{q}) = \left[\alpha_0 + \alpha_1 e^{-\beta_1 |\dot{q}|} + \alpha_2 (1 - e^{-\beta_2 |\dot{q}|}) \right] \text{sgn}(\dot{q}) \quad (8)$$

El modelo de red neuronal que proponen los autores esta compuesto por dos tipos de neuronas, unas que tienen la clásica función de activación sigmoideal y otras que utilizan la llamada “función de aproximación basada en saltos”. Esta función de aproximación basada en saltos (que puede ser del tipo de polinomio o del tipo sigmoide) logra que el modelo de red sea capaz de aproximar cualquier función parcialmente continua con un número predeterminado y finito de discontinuidades. De ahí el hecho de que la estructura neuronal propuesta describa con exactitud el comportamiento de la fricción en el movimiento del brazo de un robot y pueda ser utilizado para compensar la misma utilizando el esquema que se presenta en la Figura 2.

Por otra parte, [16] aplicaron un algoritmo adaptativo dinámico basado en lógica borrosa para reducir el efecto del pegado-deslizamiento y la compensación de la holgura en un sistema masa resorte y en un robot manipulador con una sola articulación. Los autores utilizaron un esquema de control

indirecto adaptativo sustentado en la identificación y ajuste en línea de la señal de control para compensar las no linealidades.

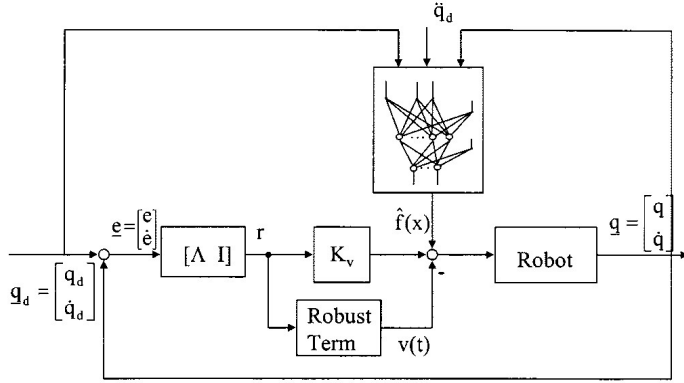


Figura 2: Controlador neuronal según Selmic and Lewis (extraída de [15]).

En una investigación similar, [17] desarrollaron modelos de fricción adaptativos basados en lógica borrosa mediante la utilización de la minería de datos y la teoría de sistemas. En líneas generales, el trabajo hace dos contribuciones importantes: por una parte, extraen reglas borrosas consiguiendo formular un modelo de fricción estática borroso; por otra parte, consiguen adaptar el modelo el modelo borroso a través del uso de la Teoría de estabilidad de Lyapunov (asociada generalmente al control con compensación de dinámicas de servomecanismos). Los autores aplican el sistema de control propuesto en simulación a un sistema mecánico de un solo grado de libertad. Sin embargo, los resultados del modelo de fricción son bastante alentadores en cuanto a que consiguen diseñar un sistema de control para un sistema mecánico con incertidumbres.

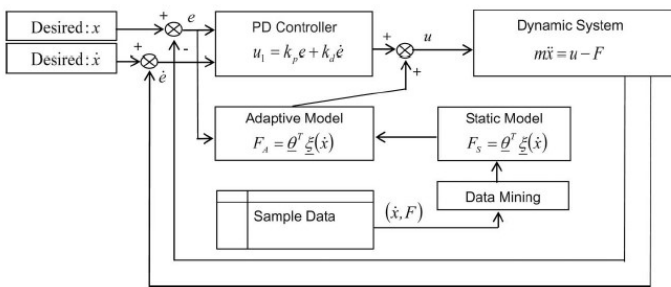


Figura 3: Compensación mediante modelo de fricción borroso adaptativo (extraída de [17]).

Entre los trabajos analizados considerados como relevantes también se encuentra el de [18] que propusieron un sistema para el ajuste simultáneo de los parámetros del control del movimiento de una máquina de CNC con cinco ejes basándose en un algoritmo genético. El ajuste de los parámetros del control (ganancia del control de posición, la ganancia del control anticipativo para la velocidad, las invariantes de la respuesta dinámica en el tiempo y la compensación de la fricción) para cada uno de los ejes se realiza con relación a cada plano de trabajo utilizando un algoritmo genético inteligente. La compensación de la fricción es analizada por los autores al determinar la duración y la magnitud del impulso o torque que es necesario aplicar en el momento en que los ejes tienen que cambiar de dirección y poder contrarrestar el efecto negativo de la fricción.

Relacionado también con el modelado de la fricción mediante redes neuronales se encuentra el trabajo de [19]. Los autores sugieren que las mayores degradaciones en los servomecanismos se producen por el fenómeno de fricción no-lineal y por ello hacen una extensa revisión de métodos de compensación basados en modelo. Finalmente proponen un modelo híbrido basado en redes neuronales para compensar la fricción que han probado experimentalmente en un brazo robótico con accionamiento directo. El modelo de compensación global está basado en una identificación adaptativa (en línea) de un modelo de predicción que consiste en un modelo paramétrico junto con un modelo basado en red neuronal. La predicción del modelo de fricción se usa entonces en un término anticipativo para compensar las incertidumbres en la fricción. El modelo de predicción para la identificación se puede diseñar de diferentes formas, dependiendo del conocimiento previo que se posea sobre la dinámica general del sistema.

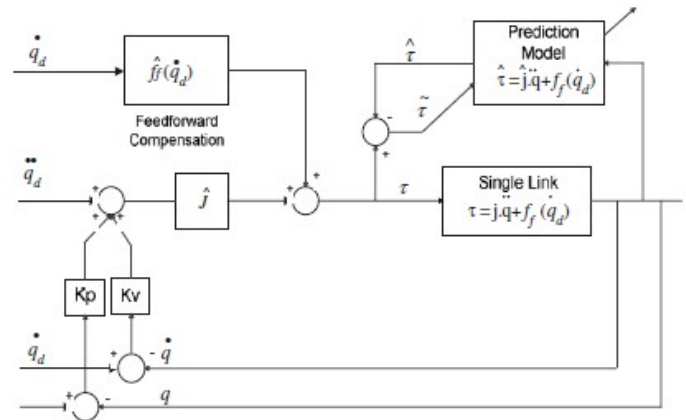


Figura 4: Compensación de fricción mediante modelo predictivo de fricción y control anticipativo (extraído de [19]).

Otra de las técnicas de AI utilizadas para compensar la fricción son las redes o máquinas de soporte vectorial. En este sentido, [20] proponen como la regresión por soporte vectorial y la parametrización por aprendizaje adaptativo, técnicas usadas normalmente por separado, pueden usarse de manera conjunta para mejorar los controles neuronales adaptativos. Así, en el contexto de la compensación de fricción para el control de servomecanismos, presentan el concepto de redes de soporte vectorial, para a través de la hibridación de la regresión SVR y las redes neuronales adaptativas, estimar la fricción en un brazo robótico de un grado de libertad. También los mismos autores en [21] hicieron uso de máquinas de soporte vectorial para compensar la fricción de un brazo de teleoperación háptico, aprendiendo los parámetros del modelo de fricción off-line mediante SVM, para luego utilizar ese modelo en un control anticipativo.

Finalmente, resulta interesante el trabajo de [22] en el que utiliza un modelo neuro-borroso ANFIS para modelar la fricción a través de datos entrada salida offline. Gracias a la hibridación de la lógica borrosa con la red neuronal se consigue hacer frente a la no-linealidad e incertidumbres del fenómeno de la fricción. Después hace una compensación con dicho modelo ya ajustado gracias a una estimación de la velocidad tal y como se muestra en la Figura 5.

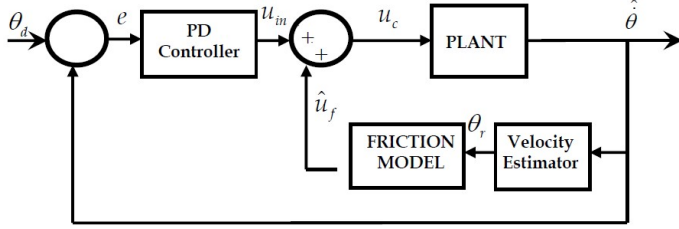


Figura 5: Compensación de fricción mediante modelo de fricción neuroborroso (extraído de [22]).

4. Conclusión

En este artículo se ha realizado una breve revisión del estado del arte en modelos de fricción utilizados en el control de servomecanismos y en la posterior aplicación de técnicas de compensación basadas en técnicas de Inteligencia Artificial. La revisión bibliográfica realizada en cuanto a modelos de fricción se refiere, nos permite afirmar que los mejores resultados se obtienen utilizando el modelo de LuGre ya que logra representar los principales efectos que se han observado experimentalmente. No obstante, ya que su implementación no resulta sencilla y en ocasiones tiene un elevado coste computacional, la utilización de ciertos modelos estáticos puede resultar igualmente útil y eficaz. Por ejemplo, la utilización del modelo de Karnopp podría resultar adecuada puesto que este modelo ofrece un buen compromiso entre precisión, eficacia y solidez computacional. Además, su implementación resulta factible y sencilla utilizando herramientas como *Matlab-Simulink*.

Pese a que el modelo de Karnopp es un modelo estático, la idea no es compensar únicamente el componente estático de la fricción, sino utilizar este componente como base para un compensador adaptivo que pueda hacer frente a otros efectos complejos de la fricción. En esta parte resulta ya clave el empleo de técnicas de inteligencia artificial.

Por los resultados vistos en el estudio, la utilización de un compensador vía “observador-modelo”, como el que aparece en la Figura 6, proporciona muy buenos resultados sin un alto coste computacional. Otra posible solución a estudiar y corroborar en simulación en el futuro pasa por la implementación de un control adaptativo o utilizar estrategias de auto-sintonía sencillas en las que, partiendo de algún modelo de fricción y de alguna técnica de Inteligencia Artificial, se establece un mecanismo de ajuste de las ganancias del controlador. Nuevamente, todo apunta a que las técnicas de inteligencia artificial son susceptibles de ser aplicadas fundamentalmente las técnicas borrosas y neuro-borrosas.

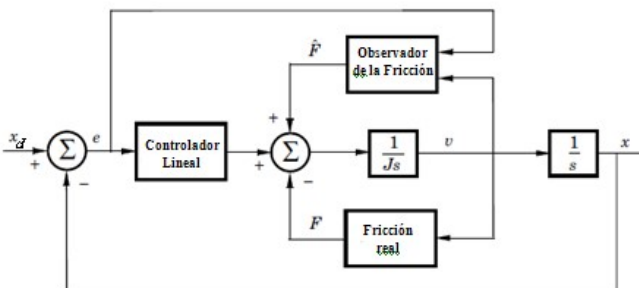


Figura 6. Diagrama de bloques del compensador de fricción basado en el “Observador”.

Sin embargo, en la actualidad la principal restricción para la incorporación de estrategias de compensación basadas en modelos continúa siendo las restricciones (temporal, frecuencial) en el marco de los lazos de control de posición, de velocidad y de trayectoria ya disponibles. Así como la complejidad inherente a la obtención experimental de los parámetros de los modelos y su ajuste. De este modo, la posible utilización de estrategias borrosas y/o neuro-borrosas estará condicionada a que la solución sea computacionalmente eficiente y el ajuste sea lo más sencillo posible y bien fundamentado metodológicamente.

English Summary

Review and Study of Artificial Intelligence Techniques for Friction Compensation in Electromechanical Systems.

Abstract

The level of competitiveness in machine tools industry requires the development of computerized numerical control with better performance, higher precisions, higher quality, more flexible and higher value-added as a means of differentiation in the market. Seeking to obtain higher precision, it is necessary to model nonlinear phenomena in electromechanical systems such as friction, to a further developing of compensation systems that transform into a higher performance control system. Therefore, as a first step in a future further research, this article presents a brief review of friction compensation systems based on Artificial Intelligence techniques. This study serves us to analyze the best available solutions for trying to develop in future works intelligent compensation strategies in industrial-commercial context.

Keywords:

Friction, Artificial Intelligence, Compensation Strategies, Servomechanisms.

Referencias

- [1] H. Olsson, K. J. Åström, C. Canudas De Wit, M. Gäfvert, and P. Lischinsky, "Friction Models and Friction Compensation," *European Journal of Control*, vol. 4, no. 3, pp. 176-195, 1998.
- [2] R. E. Haber, K. Cantillo, and J. E. Jiménez, "Networked sensing for high-speed machining processes based on CORBA," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 119, no. 2, pp. 418-426, 2005.
- [3] R. E. Haber-Guerra, R. Haber-Haber, D. M. Andr  s, and A. A. Palomar, "Networked fuzzy control system for a high-performance drilling process," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 130, no. 3, p. 031009, 2008.
- [4] R. M. del Toro, M. C. Schmittiel, R. E. Haber-Guerra, and R. Haber-Haber, "System identification of the high performance drilling process for network-based control," in *ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers*

- and Information in Engineering Conference, 2007, pp. 827-834: American Society of Mechanical Engineers.
- [5] B. Armstrong-Hélouvry, P. Dupont, and C. C. De Wit, "A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction," *Automatica*, vol. 30, no. 7, pp. 1083-1138, 1994.
- [6] R. Kelly and V. Santibañez, "Control de Movimiento de Robots Manipuladores," *Pearson Education*, 2003.
- [7] R. Haber, J. Alique, S. Ros, and C. R. Peres, "Fuzzy supervisory control of end milling process," *Information sciences*, vol. 89, no. 1-2, pp. 95-106, 1996.
- [8] R. E. Haber, J. R. Alique, A. Alique, and R. Haber, "Controlling a complex electromechanical process on the basis of a neurofuzzy approach," *Future Generation Computer Systems*, vol. 21, no. 7, pp. 1083-1095, 2005.
- [9] R. Haber-Guerra, S. Y. Liang, J. R. Alique, and R. Haber-Haber, "Fuzzy control of spindle torque in high-speed milling processes," *Journal of manufacturing science and engineering*, vol. 128, no. 4, pp. 1014-1018, 2006.
- [10] A. G. Martin and R. E. H. Guerra, "Internal model control based on a neurofuzzy system for network applications. A case study on the high-performance drilling process," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 367-372, 2009.
- [11] D. Martin, R. del Toro, R. Haber, and J. Dorronsoro, "Optimal tuning of a networked linear controller using a multi-objective genetic algorithm and its application to one complex electromechanical process," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 5, no. 10, pp. 3405-3414, 2009.
- [12] A. Alique, R. E. Haber, R. H. Haber, S. Ros, and C. Gonzalez, "A neural network-based model for the prediction of cutting force in milling process. A progress study on a real case," in *Intelligent Control, 2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on*, 2000, pp. 121-125: IEEE.
- [13] A. Gajate, R. E. Haber, J. R. Alique, and P. I. Vega, "Transductive-weighted neuro-fuzzy inference system for tool wear prediction in a turning process," in *International Conference on Hybrid Artificial Intelligence Systems*, 2009, pp. 113-120: Springer, Berlin, Heidelberg.
- [14] R. E. Haber, A. Alique, S. Ros, and R. Haber, "Application of knowledge-based systems for supervision and control of machining processes," in *Handbook of Software Engineering and Knowledge Engineering: Volume II: Emerging Technologies*, 2002, pp. 673-709.
- [15] R. R. Selmic and F. L. Lewis, "Neural-network approximation of piecewise continuous functions: Application to friction compensation," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 13, no. 3, pp. 745-751, 2002.
- [16] S. Suraneni, I. N. Kar, O. V. Ramana Murthy, and R. K. P. Bhatt, "Adaptive stick-slip friction and backlash compensation using dynamic fuzzy logic system," *Applied Soft Computing Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 26-37, 2005.
- [17] Y. Wang, D. Wang, and T. Chai, "Extraction and adaptation of fuzzy rules for friction modeling and control compensation," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 682-693, 2011.
- [18] L. Y. Kuo and J. Y. Yen, "A genetic algorithm-based parameter-tuning algorithm for multi-dimensional motion control of a computer numerical control machine tool," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 216, no. 3, pp. 429-438, 2002.
- [19] M. Kemal Ciliz and M. Tomizuka, "Friction modelling and compensation for motion control using hybrid neural network models," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 20, no. 7, pp. 898-911, 2007.
- [20] G. L. Wang, Y. F. Li, and D. X. Bi, "Support vector networks in adaptive friction compensation," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 18, no. 4, pp. 1209-1219, 2007.
- [21] D. Bi, Y. F. Li, S. K. Tso, and G. L. Wang, "Friction modeling and compensation for haptic display based on support vector machine," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 2, pp. 491-500, 2004.
- [22] I. B. Tijani, M. Wahyudi, and H. Talib, "Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) for friction modelling and compensation in motion control system," *International Journal of Modelling and Simulation*, vol. 31, no. 1, pp. 32-41, 2011.