

CONTROL DE ACCIONAMIENTO DE UN MANIPULADOR ROBOTICO (IGDL) MEDIANTE TÉCNICAS DE SUPERFICIES DE DESLIZAMIENTO (SLIDING MODE CONTROL)

Dr. Ing. Sauchelli, Victor Hugo (*1)
Ing. Sergio Laboret (*2)

(*1) Asignatura Sistemas de Control II, Director del Departamento de Electrónica - Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, vsauch@com.uncor.edu

(*2) Asignatura Sistemas de Control II, y Control I – Proyecto de desarrollo SECYT, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, slaboret@yahoo.com

Resumen

Dado un sistema no lineal (brazo robótico) es difícil sintonizar un controlador lineal convencional que funcione satisfactoriamente en todo el rango de operación. Por otra parte los controles de estructura variable (sliding) han demostrado ser eficientes y robustos para dichos sistemas y pueden ser combinados con controladores de otros tipos. El presente trabajo propone la implementación de un control sliding, en base a una función de conmutación de las variables de estado para lograr mantener el sistema sobre una superficie deslizante en el plano de fases en forma suave, a fin de optimizar la respuesta temporal (respuesta rápida sin sobrepasamientos) y mejorar la robustez ante cambios de parámetros y no linealidades no modeladas, combinado con un controlador PI convencional que permite que el sistema alcance dicha superficie desde cualquier condición inicial

Los resultados son validados mediante simulación con Matlab- Simulink.

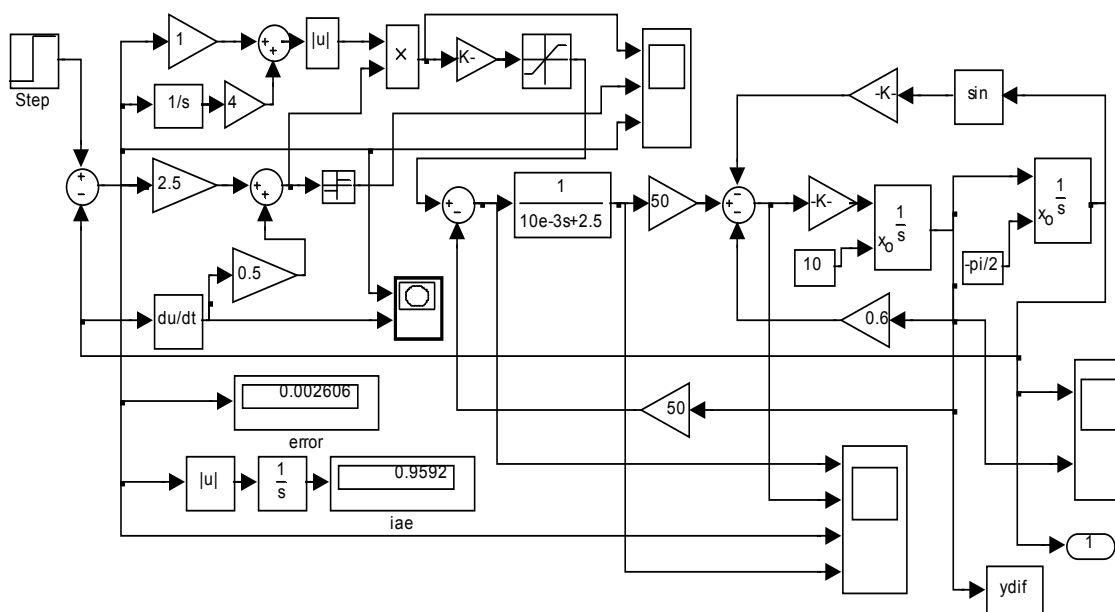


Figura 1
Diagrama de simulación

1. INTRODUCCIÓN

Los motores que son utilizados en las aplicaciones de robótica, presentan efectos indeseables en el momento de buscar una estabilidad sofisticada, como

caso del comportamiento de robot bípedos, cuyo desempeño corresponde al péndulo invertido o a veces a un doble péndulo invertido, con exigencias de actuación rápida y sin sobrepasamientos.

La región de operación de estos motores especialmente en baja velocidad determina efectos de fricción realmente indeseables, que muchas veces se eliminan, en parte con el Dither, presentando además otras alinealidades como histéresis, zonas muertas o juegos, saturación etc.

Muchos trabajos describen y han descrito estos inconvenientes y aportan soluciones a fin de mitigar los efectos mencionados indeseables, especialmente las no linealidades, para lo cual se usan controles adaptativos, lógica fuzzy, redes neuronales etc. todos merecen un tratamiento y estudio específico.

Desde mediados del siglo XX, se han venido desarrollando controladores de estructura variable y hace no mas de treinta años, con la aparición masiva de las PCs, se han desarrollados los controles a modos deslizantes (sliding mode control - SMC) por su sencillez de diseño, posibilidad de utilizar los espacios de estado, permitiendo utilizar motores de CD no tan costosos, con un controlador que compense las deficiencias y así en conjunto abaratar sensiblemente los costos con las mismas prestaciones que motores diseñados con muy baja inercia, mínimos juegos de engranajes y escasa fricción.

La cátedra de Sistemas de Control II, juntamente con el Laboratorio de Animatrónica y Control Dinámico de esta Facultad de C.E.F. y N. de la UNC intenta desde hace unos cinco años desarrollar robots bípedos y las propuestas han sido incursionar con controladores PID fraccionarios (PIDF, año 2005) observando una considerable mejora en la robustez por el uso de estos controladores. Esto se ha realizado mediante simulaciones con Matlab, Simulink y se pretende extender aun más las simulaciones y si es posible las emulaciones.

Los modelos con estructuras variables (variable structure control systems- VSCS) fueron realizados y estudiados en la década del 60 por los rusos, especialmente Cataev, Popov, etc. dando pautas sobre la estabilidad y la inestabilidad en espacios de estados indispensables para el control por deslizamiento. Las reglas de decisión y las leyes de control deben establecerse según sea la trayectoria en el espacio de estado (plano de fases).

Por otra parte el control de orden fraccionario (FOC) que estudiamos y simulamos en el 2005, con aportes de la SCyT de la UNC, nos permitió aumentar la robustez del sistema como esta expresado en las conclusiones del informe respectivo.

Los objetivos de este trabajo, y del grupo en general, es integrar los FOC e introducirlos a un control de deslizamiento (SMC) usando deslizamientos de orden fraccionario, propuesta ésta generada en comunicaciones por mail con el Dr. Blas M. Vinagre Jara y el Dr. Igor Podlubny, ambos especializados en FOC.

La aplicación es sobre robótica, especialmente péndulos invertidos, pretendiendo integrar estas dos técnicas de control a movimientos de traslación y de rotación, tomado como sistema no lineal.

Estimamos en un año, 2006 alcanzar a la simulación y avanzar en la emulación para la concreción en breve de movimientos controlados por FOC-VSCS.

2. DISEÑO DE LA SUPERFICIE DE CONMUTACIÓN

El comportamiento del sistema controlado con SMC depende del diseño de la superficie de deslizamiento. Esta puede establecerse de la siguiente manera:

- Primero determinar el espacio (hiperespacio) de conmutación, esto depende del problema y del tipo de planta a controlar. Se puede describir el comportamiento del sistema y determinar las posibles intersecciones dadas por la propia dinámica del sistema, es importante la zona inestable y las posibles direcciones de los autovectores para una convergencia eficaz.

Las condiciones para la existencia de un modo de deslizamiento que sostenga la estabilidad del sistema es que exista el punto representativo (PR) que pertenece a la superficie de deslizamiento y alrededor del cual se produce la conmutación en un estado de régimen. Este punto representativo es el equivalente al punto de equilibrio si el sistema fuese estable no conmutado.

De esta manera, bajo ciertas condiciones, el PR es el punto de trabajo del sistema.

Para un caso de deslizamiento ideal, la conmutación es justo sobre la línea de deslizamiento, en esta se establece el equilibrio que lo llevaría al sistema al origen, luego: $S(x) = p_1 x_1 + p_2 x_2 = 0$

Además la velocidad de conmutación es también nula, pues no conmuta, luego:

$$S'(x) = p_1 x'_1 + p_2 x'_2 = 0 \quad ; \quad \text{si el sistema es tal que } x'_1 = x_2 \text{ resulta: } x_2 = -\frac{p_1}{p_2} x_1$$

En otras palabras, si los estados x_1 y x_2 controlan eficazmente al sistema llevándolo al equilibrio deben satisfacer que $S(x)=0$ para $t>t_h$.

En la práctica esto no sucede o es muy difícil de lograr, por la presencia de incertidumbres, ruidos, y especialmente inercias del sistema, que establece una zona de conmutación real con tiempos de conmutación reales.

Para una existencia de la condición de estabilidad en el plano de deslizamiento, matemáticamente se debe cumplir que $S(x).S'(x)<0$, o sea si $S(x)$ es positiva, debe ser decreciente y si es negativa debe crecer.

En un sentido real, físico, el modo de deslizamiento existe en una vecindad de la línea de $S(x)=0$, y como consecuencia de esto el punto representativo (PR), ya no es un punto para ser una región (pequeña) alrededor de $S(x)=0$, donde ya sugiere la presencia de una permanente conmutación y por consiguiente la aparición de frecuencias relativamente altas en comparación al sistema (que pueden ser filtradas o mejor, no generadas y esto es una propuesta dentro de los objetivos de este trabajo).

- Como segundo paso, el procedimiento de diseño implica la selección de un control de forma tal que los cambios por deslizamientos permitan alcanzar el PR. Por esta razón el problema de determinar la estructura de control está asociado al proceso y a su comportamiento.

El problema de alcanzabilidad depende del espacio (o hiperespacio) de conmutación y no puede ser determinado sin que el problema del sistema sea conocido. La condición de alcanzabilidad se puede lograr mediante especificaciones, como ser:

a) establecer una función aproximada de conmutación

Esta condición está relacionado con lo visto que $S(x).S'(x)<0$ pero no garantiza un alcance del PR en un tiempo finito (o al menos razonable).

b) establecer una ley aproximada

La ley de conmutación al cruce de la línea de deslizamiento, especificada por la dinámica del sistema, y la función de conmutación está determinada por la ley de alcance:

$$\dot{S}(x) = -Q \cdot \text{sgn}(S) - Kf(S)$$

Donde Q y K constantes positivas o son matrices diagonales con elementos positivos si se trata de un sistema de múltiples entradas.

Distintos valores de Q y de K determinan diferentes velocidades para S y distintas estructuras.

Existen tres posturas para la ley:

a) La ley de alcance es una constante:

$$\dot{S} = -Q \text{sgn}(S)$$

b) La ley de alcance es proporcional a S

$$\dot{S} = -Q \text{sgn}(S) - KS$$

c) La ley de alcance es proporcional a potencias de S

$$\dot{S}_i = -K_i |S_i|^\alpha \text{sgn}(S_i) \quad 0 < \alpha < 1, \quad i = 1, \dots, m$$

En cierto modo realizaremos una comparación entre el comportamiento dado por las dos primeras leyes.

3. CASO DE ESTUDIO

Si partimos de la general:

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = f(x) + g(x) \cdot u$$

aplicado a nuestro caso y con $g(x) \geq g_0 > 0$,

acotada inferiormente y positiva para todo vector x, con además $f(x)$ y $g(x)$ funciones que pueden ser no lineales conocidas. Con una superficie de deslizamiento de la forma: $S(x) = p_1 x_1 + p_2 x_2$ con $p_1, p_2 > 0$; definiendo en este caso una línea de deslizamiento:

$$x_2 = -\frac{p_1}{p_2} x_1 \quad \text{que si se realiza la trayectoria por esta}$$

línea lo hace independientemente de $f(x)$ y de $g(x)$. Un primer problema es el alcance, y segundo mantenerse sobre la línea.

Para satisfacer estos problemas condiciones, es que se recurre a Liapunov, si $V(x) = \frac{1}{2} S^2(x)$ desde ya

positiva y $\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x)$ con S(x) considerado polinomio $S(x) = p_1 x_1 + p_2 x_2$. En caso de ser mayor número de variables conviene la notación matricial)

$$\dot{S}(x) = p_1 \dot{x}_1 + p_2 \dot{x}_2 = p_1 x_2 + p_2 (f(x) + g(x) \cdot u)$$

para que sea estable debe ser: $\dot{V}(x) \leq 0$.

Si consideramos que:

$$\left| \frac{p_1 x_2 + p_2 f(x)}{p_2 g(x)} \right| \leq \rho(x); \quad \forall x \in R^2 \quad \text{tal que } \rho(x) > 0$$

$$\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x) = S(x) [p_1 x_2 + p_2 f(x)] + S(x) p_2 g(x) u \leq S(x) \rho(x) p_2 g(x) + S(x) p_2 g(x) u$$

$$\text{pues: } |p_1 x_2 + p_2 f(x)| \leq \rho(x) \cdot p_2 g(x) \quad (\text{positivo})$$

Tomando como ley de control a:

$$u = -K(x) \text{sig}(S(x))$$

donde $K(x) \geq \rho(x) + K_0$, con $K_0 > 0$

Entonces, reemplazando y considerando el signo de $S(x)$ resulta que siempre es $\dot{V}(x) \leq 0$ lo que significa que es estable, y la ley de control propuesta es válida.

La ley de control propuesta por nuestro modelo es:

$$u(t) = K \left[(e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt) (p_1 e(t) - p_2 \dot{y}(t)) \right]$$

con: $e(t) = r(t) - y(t)$, $p_1, p_2, K, K_I > 0$

$x_1 = e(t) = -y(t)$ pues $r(t)$ es función paso

$x_2 = -\dot{y}(t)$

Pero dijimos que el movimiento de la trayectoria posee dos fases: el alcance a la superficie de deslizamiento y el movimiento restringido a la superficie de deslizamiento, e intentamos estudiar el comportamiento para los casos a) y b) de alcance. Para el caso a) consideramos un signus (sign) sobre $S(x)$ y vemos que aparece un chattering notable:

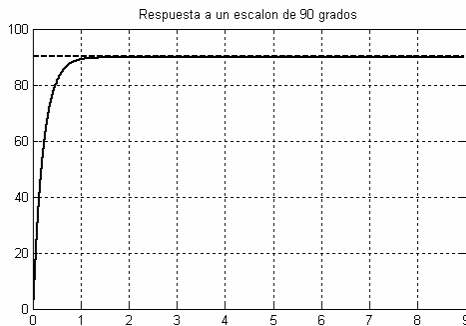


Figura 2: respuesta al escalón con función sign(S)

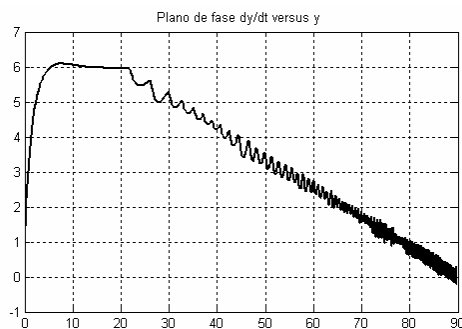


Figura 3: Plano de fase en respuesta al escalón con función sign(S)

En caso de la ley de alcance b) como está el modelo en resumen, el chattering casi desaparece, es en efecto la acción derivativa del controlador que actúa ahora aportando para mejorar el control a altas frecuencias:

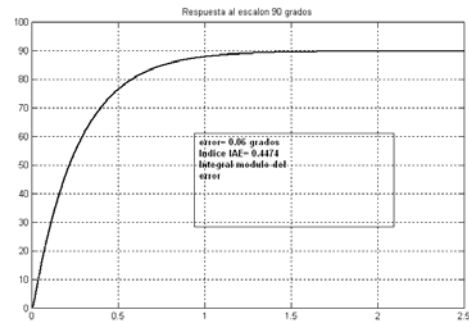


Figura 4: Respuesta con la ley de conmutación propuesta

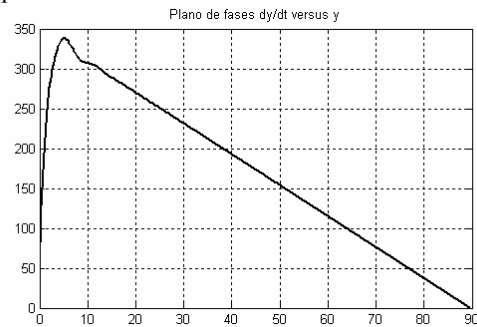


Figura 5: plano de fases

3.1 ENSAYO DE ROBUSTEZ

A fin de estudiar el comportamiento ante variaciones de los parámetros se ensaya ante dos situaciones muy dispares, se consideraba el estudio anterior con un momento de inercia J y una carga gravitacional del brazo K de valores:

$$\begin{cases} J = 1/10Ns^2 / r \\ K = 100Nm \end{cases}$$

se obtiene un error de 0.3 grados (0.33%) y un índice IAE (integral del modulo de error) de 28%

Variando la carga a

$$(a) \begin{cases} J = 1/20Ns^2 / r \\ K = 200Nm \end{cases}, (b) \begin{cases} J = 1/5Ns^2 / r \\ K = 50Nm \end{cases}$$

Resulta:

- a) Error=0.5 grados (0.56%), IAE=30 %
- b) Error=0.1 grados (0.18%), IAE= 27%

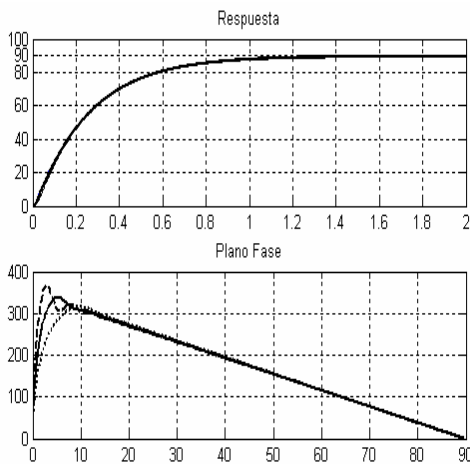


Figura 6: Cambios en la carga al doble y la mitad

También cambiamos la ganancia del conjunto motor reductor a 40 y 60 respectivamente y obtenemos $G=40$ Error=0.4 grados (0.4%), IAE=27 % $G=60$ Error=0.22 grados (0.25%), IAE= 29%

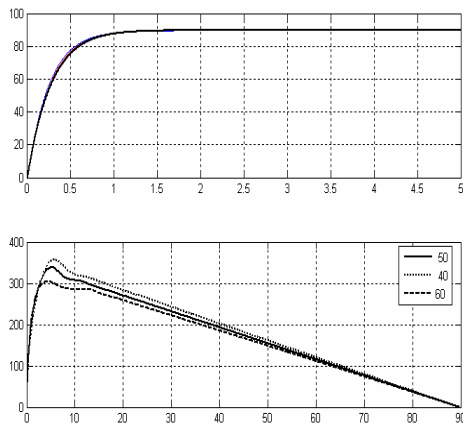


Figura 7: Respuesta y plano de fase ante cambio en la ganancia +/- 20 %

Observamos que en ambos casos la diferencia temporal y en el índice de desempeño es indistinguible, solo hay pequeños cambios en la fase de alcance

3.2 LIMITACIONES PRÁCTICAS

Por razones tecnológicas de costo y consumo las corrientes y tensiones deberán estar acotadas

Saturación: debido a que la tensión es limitada ante errores grandes se producirá un efecto de saturación del comando del motor lo que producirá una zona

extra entre la fase de alcance y deslizamiento de velocidad constante

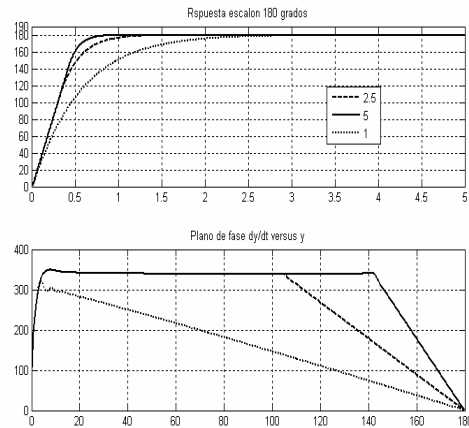


Figura 8 : tiempos de respuesta y planos de fase según varia p_1 con $p_2=0.5$ ante escalón 180 grados (máximo posible)

Sobrecorriente: en el arranque se produce un pico de corriente porque la f_{cem} es muy baja, ello lleva se soluciona limitando la misma mediante un lazo interno de control con saturación de su referencia

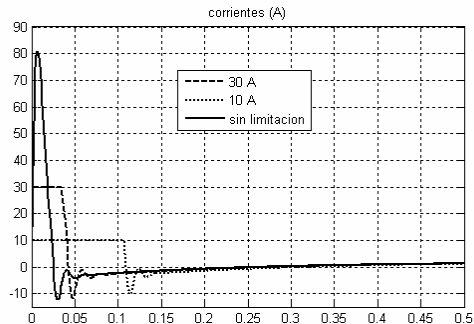


Figura 9 : Sobrecorriente de arranque



Figura 10 : Cambios en la respuesta al escalón con y sin limitación de corriente

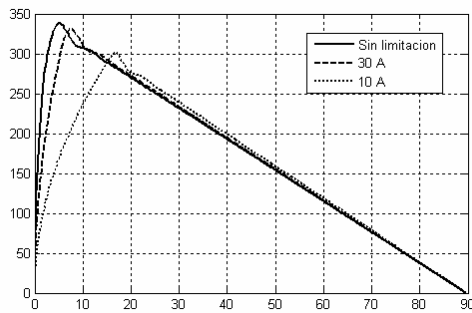


Figura 11: Plano de fases con y sin limitación de corriente

Como vemos en las figuras el comportamiento temporal de la planta no se ve muy afectado por la limitación de corriente, el efecto ocurre solo en tiempos cerca del origen ya que se demora un poco mas en alcanzar la fase de deslizamiento

4. CONCLUSIONES

La ley de conmutación propuesta permite alcanzar y mantenerse sobre la superficie de deslizamiento atenuando visiblemente el efecto indeseado de chattering que caracteriza este modo de control.

El sistema posee un comportamiento excelente en lo que a respuesta y error de régimen se refiere (menos de $0,5^\circ$ en condiciones de máxima 90°).

El método utilizado ha demostrado ser robusto, ante cambios en la carga y en parámetros del motor.

Esta técnica no está limitada a motores de CC sino puede usarse con otros tipos de motores: síncronos y asíncronos con el inversor y lógica de conmutación apropiada para desacoplar las componentes de flujo y cupla (controles vectoriales) sensibles a la variación de los parámetros.

La restricción más importante (que es inherente a todo sistema de potencia), es que es necesario limitar la corriente circulante lo cual degrada un poco la performance cuando esto ocurre (grandes errores)

5. REFERENCIAS

V. Utkin "Variable structure systems with sliding modes" IEEE Transactions on automatic Control- Vol AC-22 n2 pp212-222 – 1977

Bailey, E. and Arapostathis, A., 1987, "Simple Sliding Mode Control Scheme Applied to Robot Manipulators," International journal of Control, Vol. 45, No. 4, pp. 1197-1209.

Chang T. H. and Hurmuzlu Y. (1992), "Trajectory Tracking in Robotic Systems Using Variable Structure Control Without a Reaching Phase" Proceedings of the 1992 American Control Conference, Vol. 2 of 4, pp 1505-1509.

Hurmuzlu, Y., and Moskowitz, G., 1987, "Bipedal Locomotion Stabilized by Impact and Switching: I. Two and Three Dimensional, Three Element Models" International Journal of Dynamics and Stability of Systems, Vol. 2, No. 2, pp. 97-112.

Paden, B. E., and Sastry, S. S., 1987, "A Calculus for Computing Filippov's Differential Inclusion with Application to the Variable Structure Control of Robot Manipulators" IEEE Transactions on Systems and Circuit, Vol. 34, pp. 73-82.

Slotine, J. J., 1985, "The Robust Control of Robot Manipulators" International journal of Robotics Research, Vol. 4, No. 2, pp. 49-64.

Slotine, J. J. E., and Li, W., 1991, "Applied Nonlinear Control", Prentice-Hall, New Jersey.

Utkin, V. I., 1977, "Variable Structure Systems with Sliding Mode" IEEE Transactions on Automatic Control, AC-22, pp. 212-222.

Vukobratovic, M., Borovac, B., Surla, D., and Stokic, D., 1990, Scienti_c "Fundamentals of Robotics 7: Biped Locomotion", Springer-Verlag, New York.