

REFERENCE TRACKING CONTROL FOR THE CAPSUBOT SYSTEM

CONTROL POR SEGUIMIENTO DE REFERENCIA PARA EL SISTEMA CAPSUBOT

PhD. Anna Patete, Jessica Barrera, PhD. Iñaki Aguirre, Ing. Jormany Quintero

Universidad de Los Andes, Mérida.

Facultad de Ingeniería, Escuela de Sistemas.

Departamento de Sistemas de Control. Mérida, Venezuela.

Tel.: (58)-274-2402986, Fax: (58)-274-2402847.

E-mail: {apatete, iaguirre}@ula.ve, jessi_barrera88@hotmail.com, jormany@gmail.com

Abstract: This paper present a new technique to control, in closed loop, the Capsubot system. The technique combines the generalized minimum variance criterion with the sliding mode control concept in discrete-time. The control objective is to follow the reference signal, through the minimization of the controlled variable. The reference is chosen as the desired velocity dynamic for the internal mass in the Capsubot system. This will produce the appropriate movement for the Capsubot system. The nonlinear Capsubot model is simplified to a linear model, so the proposed control technique may be applied.

Keywords: Capsubot, control, sliding surface, minimum variance.

Resumen: En este documento se presenta una nueva técnica de control, en lazo cerrado, para el sistema Capsubot. La técnica combina el criterio de varianza mínima generalizada con el concepto de control por superficie deslizante en el dominio discreto. El objetivo de control es hacer seguimiento de la señal de referencia a través de la minimización de la varianza de la variable controlada, escogiéndose como señal de referencia una dinámica de velocidad adecuada de la masa interna del Capsubot, generándose así el movimiento adecuado del sistema Capsubot. El modelo no lineal del Capsubot es simplificado a un modelo lineal para poder aplicar la técnica de control propuesta.

Palabras clave: Capsubot, control, superficie deslizante, varianza mínima.

1. INTRODUCCIÓN

Los robots zoomórficos imitan de alguna manera los movimientos de los seres vivos. Estos robots presentan una clasificación respecto al tipo de propulsión que poseen, entre ellos se encuentran los llamados "tipo gusano" y los "robots de propulsión externa".

Los robots "tipo gusano" generan su movimiento debido a la locomoción de partes externas móviles o al cambio de la forma de sus cuerpos.

Debido a su compleja estructura se dificulta el control de los mismos en ambientes complicados. Los denominados robots de propulsión externa, no posee partes externas que impulsen su movimiento ni cambian la estructura externa de sus cuerpos, un ejemplo novedoso de este tipo de robot es la cápsula robot o Capsubot.

El Capsubot está conformado principalmente por una cápsula externa (cilindro hueco) y una masa interna (imán), la cual se mueve dentro de la

cápsula externa, como se muestra en la Fig. 1. El Capsubot fue propuesto por primera vez por Li (Li *et al.*, 2006) en Japón. En su diseño, parte de la cápsula externa está cubierta por una bobina que genera una fuerza magnética en el interior de la cápsula, esta produce el desplazamiento adecuado de la masa interna (imán), originando así el movimiento de la cápsula externa.

El movimiento de la masa interna debe de realizarse de tal manera de que, a causa de las fuerzas de acción y reacción, la cápsula externa rompa con la fricción existente entre la superficie y la cápsula externa para así generar un desplazamiento. Una vez obtenido este movimiento, la masa interna debe de regresar a su posición original evitando generar un desplazamiento en la cápsula externa. El Capsubot realiza su desplazamiento en una sola dirección.

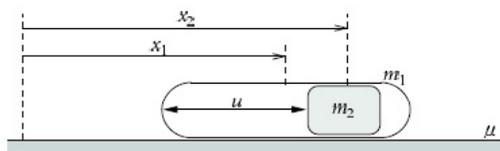


Fig. 1. Modelo de Capsubot.

En este trabajo se propone una ley de control en lazo cerrado para el Capsubot diseñado por (Quintero *et al.*, 2010). Para ello, primeramente se propone una modificación en el modelado del sistema, de tal manera de que el modelo obtenido sea lineal. El objetivo de proponer esta nueva ley de control es conservar la sencillez de la dinámica de velocidad para m_2 (\dot{x}_2) propuesta en (Quintero *et al.*, 2010) y además añadir la característica de robustez que proporciona el control en lazo cerrado con realimentación negativa de la salida.

La ley de control se basa en el criterio de varianza mínima generalizada (Patete *et al.*, 2008a, 2008b). La ley de control obtenida es luego comparada con los resultados previamente obtenidos por (Quintero *et al.*, 2010). El algoritmo de control en lazo cerrado que se propone es mucho más robusto que el propuesto en (Quintero *et al.*, 2010).

El documento se estructura de la siguiente manera: en la sección 2 se explica el movimiento del Capsubot y en la sección 3 se presenta la historia resumida del mismo. En la sección 4 se plantea el modelado del sistema, en la sección 5 se explica el algoritmo de diseño de la ley de control en lazo cerrado propuesta, en la sección 6 se presentan los

resultados simulados obtenidos con la ley de control propuesta y algunas comparaciones de estos con los resultados obtenidos en (Quintero *et al.*, 2010), además se presenta una secuencia de imágenes que muestra la implementación computacional de la ley de control propuesta sobre un mímico del Capsubot. Al final se dan las conclusiones y el trabajo futuro a desarrollarse.

2. MOVIMIENTO DEL CAPSUBOT

Li (Li *et al.*, 2006) propone que el movimiento se puede describir en cuatro pasos como sigue:

1. Un gran movimiento acelerado de la masa interna hacia atrás ($\ddot{x}_2 \ll 0$), origina un movimiento acelerado hacia adelante de la cápsula externa ($\dot{x}_1 > 0$).
2. Un leve movimiento desacelerado hacia atrás de la masa interna ($\ddot{x}_2 > 0$), produce una desaceleración de la cápsula externa ($\dot{x}_1 < 0$).
3. Un pequeño movimiento desacelerado hacia atrás de la masa interna ($\ddot{x}_2 > 0$), provoca que la cápsula externa llegue al estado de reposo ($\dot{x}_1 = 0$).
4. Un movimiento lento y constante hacia adelante de la masa interna ($\dot{x}_2 \leq \epsilon$), mantiene la cápsula externa en estado de reposo ($\dot{x}_1 = 0$). Al finalizar este movimiento el ciclo comienza de nuevo.

El movimiento deseado del Capsubot se define a través de la dinámica de velocidad de la masa interna, \dot{x}_2 , como se muestra en la Fig. 2.

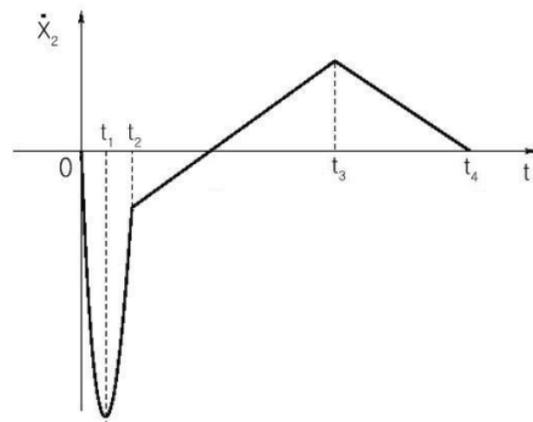


Fig. 2. Dinámica de velocidad para m_2 (\dot{x}_2).

3. HISTORIA DEL CAPSUBOT

En el mundo existían solamente tres prototipos del sistema Capsubot, todos diseñados en *Tokyo Denki University*, Japón. El primero fue diseñado y construido por (Li *et al.*, 2006) el cual cuenta con un solo embobinado, como se muestra en la Fig. 3. Este tipo de diseño dificulta la generación de los cuatro pasos para el movimiento del Capsubot descrito anteriormente. El segundo, diseñado y construido por (Lee *et al.*, 2008), utiliza dos embobinados para generar el movimiento, Fig. 4, siendo este diseño más conveniente y manejable que el anterior. El tercer diseño, que se aprecia en la Fig. 5, es el más pequeño hasta los momentos y consta de tres embobinados para generar el movimiento (Li *et al.*, 2009). En todos estos prototipos diseñados la ley de control que se diseñó para lograr el movimiento del Capsubot es basada en el control óptimo, usando como especificaciones de diseño condiciones de contorno para los tiempos en los 4 pasos descritos anteriormente, lo cual conlleva a una ley de control no trivial.



Fig. 3. Prototipo de Capsubot 1.



Fig. 4. Prototipo de Capsubot 2.



Fig. 5. Prototipo de Capsubot 3.

Además de estos estudios, Quintero (Quintero *et al.*, 2010) realizó un prototipo a bajo costo del Capsubot, Fig. 6, utilizando una ley de control continua a trozos en lazo abierto que consta de escalones de diferentes amplitudes. Uno de los grandes aportes del diseño de esta nueva ley de control es que es una ley mucho más sencilla de implementar que las propuestas por (Li *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2009). El diseño final de este Capsubot consta de dos bobinas de tres capas, una seguida de la otra, que generan el

suficiente campo magnético para producir una aceleración adecuada y romper la fricción de la cápsula externa con la superficie de contacto. Quintero (Quintero *et al.*, 2010) implementó a ley de control a lazo abierto utilizando fuentes de corrientes independientes para cada una de las bobinas.

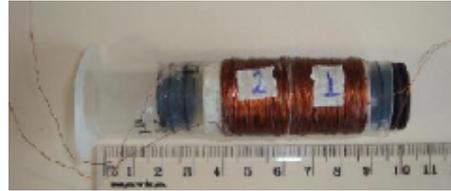


Fig. 6. Prototipo de Capsubot 4.

A causa de la utilización de leyes de control tipo escalón en (Quintero *et al.*, 2010), la velocidad de la masa interna, \dot{x}_2 , presenta la dinámica mostrada en la Fig. 7. Esta dinámica, a pesar de que difiere en los dos primeros tramos con la mostrada en la Fig. 2, de igual manera cumple con los cuatro pasos que describen el movimiento del Capsubot y produce su desplazamiento como fue demostrado en (Quintero *et al.*, 2010).

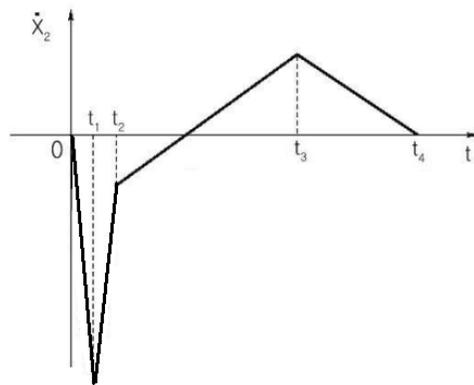


Fig. 7. Dinámica de velocidad para m_2 , propuesta en (Quintero *et al.*, 2010).

4. MODELO DEL SISTEMA

En esta sección se hace un ligero repaso del modelado del sistema Capsubot propuesto en la bibliografía anteriormente mencionada, (Li *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2008; Quintero *et al.*, 2010), para luego proponer una variación a dicho modelo, de tal manera de obtener un modelo lineal, sin afectar las propiedades locales y generales del sistema Capsubot.

Basándose en la Fig. 1 y aplicando las leyes de Newton se puede obtener el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\sum F_1 = m_1 \ddot{x}_1 \quad (1)$$

$$\sum F_2 = m_2 \ddot{x}_2 \quad (2)$$

Donde, es la masa m_1 de la cápsula externa, x_1 es la posición de la cápsula externa, F_1 son las fuerzas que actúan sobre m_1 , m_2 es la masa del cuerpo interno, x_2 es la posición de m_2 y F_2 son las fuerzas que actúan sobre m_2 . Las fuerzas que actúan sobre el sistema son: la fricción externa, definida como $F_r = \mu N$, donde, μ es el coeficiente de rozamiento entre m_1 y la superficie de contacto, y N es la fuerza normal. Una fuerza interna u , es la que genera el movimiento de la masa interna. La fuerza de fricción entre m_2 y la superficie de contacto es despreciable. Por lo tanto, el sistema de ecuaciones que describe la dinámica del Capsubot queda expresado de la siguiente manera:

$$u - \text{sign}(\dot{x}_1) \mu N = m_1 \ddot{x}_1 \quad (3)$$

$$-u = m_2 \ddot{x}_2 \quad (4)$$

Donde, $N = (m_1 + m_2)g$, siendo g la gravedad.

El par de ecuaciones (3) y (4) definen el modelado del Capsubot, como se muestra en (Li *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2008; Quintero *et al.*, 2010), por ejemplo. Sin embargo, debido a que la masa externa, m_1 , se desplaza siempre hacia adelante, la ecuación (3) puede reescribirse en términos de una fricción linealmente proporcional a la velocidad de la misma (\dot{x}_1) que se opone al movimiento de la cápsula externa, así:

$$u - \mu N \dot{x}_1 = m_1 \ddot{x}_1 \quad (5)$$

Reagrupando los términos, (3) se reescribe como:

$$m_1 \ddot{x}_1 - \mu(m_1 + m_2)g \dot{x}_1 = u \quad (6)$$

Basándose en el movimiento relativo de la masa interna con respecto a la masa externa:

$$\bar{x}_2 = x_2 - x_1 \quad (7)$$

Así, (4) queda de la forma siguiente:

$$m_2(\ddot{x}_1 - \ddot{\bar{x}}_2) = -u \quad (8)$$

Despejando \ddot{x}_1 de (5) y sustituyendo en (8), se tiene:

$$m_1 m_2 \ddot{\bar{x}}_2 - m_2 \mu(m_1 + m_2)g \dot{x}_1 = -(m_1 + m_2)u. \quad (9)$$

El sistema de ecuaciones que conforman el modelado lineal del Capsubot, usando (6) y (9), es:

$$\ddot{x}_1 = -\frac{\mu(m_1 + m_2)g}{m_1} \dot{x}_1 + \frac{1}{m_1} u, \quad (10)$$

$$\ddot{\bar{x}}_2 = \frac{m_2 \mu(m_1 + m_2)g}{m_1 m_2} \dot{x}_1 - \frac{(m_1 + m_2)}{m_1 m_2} u. \quad (11)$$

Haciendo un cambio de variable, definido por: $x_{1d} = x_1$ y $x_{3d} = \bar{x}_2$, (10) y (11) se pueden reescribir como ecuaciones diferenciales de primer orden:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{1d} &= x_{2d}, \\ \dot{x}_{2d} &= -\frac{\mu(m_1 + m_2)g}{m_1} x_{2d} + \frac{1}{m_1} u, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{3d} &= x_{4d}, \\ \dot{x}_{4d} &= \frac{m_2 \mu(m_1 + m_2)g}{m_1 m_2} x_{2d} - \frac{(m_1 + m_2)}{m_1 m_2} u. \end{aligned}$$

Para el sistema en lazo cerrado, se cuenta con un sensor que mide la velocidad de la masa interna, es decir, la variable x_{4d} . Así, la función de transferencia asociada al modelo (12), es:

$$G(s) = \frac{x_{4d}(s)}{u(s)} = \frac{(-m_1 - m_2)s - \mu(m_1 + m_2)g}{m_1 m_2 s^2 + (\mu m_1 m_2 g + g m_2^2 \mu)s}. \quad (13)$$

Debido a que el sistema (12) no es completamente controlable ni observable, la función de transferencia (13) no es de cuarto orden. El controlador propuesto se puede aplicar ya que la realimentación se hace de la salida x_{4d} , y no de todos los estados del sistema.

5. CONTROL POR SEGUIMIENTO DE REFERENCIA

Para el diseño de la ley de control por seguimiento de referencia, se propone el criterio de varianza mínima generalizada basada en la teoría de control por superficie deslizante a tiempo discreto propuesto en (Patete *et al.*, 2008a, 2008b).

El sistema en tiempo discreto de una entrada una salida, invariante en el tiempo, con entrada u_k y salida y_k , considerado tiene la estructura:

$$A(z^{-1})y_k = z^{-d}B(z^{-1})u_k. \quad (14)$$

Donde $A(z^{-1})$ y $B(z^{-1})$ no tienen factores comunes y z denota el operador de desplazamiento, esto es $z^{-t}y_k = y_{k-t}$. En la transformación de Laplace, $z = e^{sT_0}$, donde T_0 es el

período de muestreo (por simplicidad, y sin pérdida de generalidad, para las deducciones matemáticas se asume $T_0 = 1$). d es el retardo y se asume conocido. Los polinomios $A(z^{-1})$ y $B(z^{-1})$ son conocidos y representados por:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n},$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}.$$

El objetivo de control es minimizar la varianza de la variable controlada s_{k+d} , la cual se define, en el caso determinístico, como:

$$s_{k+d} = C(z^{-1})(y_{k+d} - r_{k+d}) + Q(z^{-1})u_k. \quad (15)$$

s_{k+d} representa la superficie deslizante en tiempo discreto. Los polinomios:

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_u z^{-u}, \quad (16)$$

$$Q(z^{-1}) = q_0(1 - z^{-1}), \quad (17)$$

Deben ser diseñados, r_k es la señal de referencia, y la señal de error e_k es definida como: $e_k = (y_k - r_k)$. El polinomio $C(z^{-1})$ es Schur (tiene todas sus raíces dentro del círculo unitario), así la señal de error tenderá a cero si s_{k+d} en (15) se mantiene en cero ante entradas constantes. El polinomio $C(z^{-1})$ se diseña asignando todas sus raíces dentro del círculo unitario definido en el plano- z . Esta idea proviene del concepto de control por superficie deslizante en tiempo discreto propuesto en (Furuta, 1993).

La ecuación (15) se puede reescribir como:

$$s_{k+d} = G(z^{-1})u_k + F(z^{-1})y_k - C(z^{-1})r_{k+d}, \quad (18)$$

Donde el polinomio $G(z^{-1})$ se define como:

$$G(z^{-1}) = E(z^{-1})B(z^{-1}) - Q(z^{-1}), \quad (19)$$

Y los polinomios $E(z^{-1})$ y $F(z^{-1})$ satisfacen la ecuación Diofantina:

$$C(z^{-1}) = A(z^{-1})E(z^{-1}) + z^{-d}F(z^{-1}), \quad (20)$$

Así, el control que genera la mínima varianza para la variable que define la superficie deslizante, s_{k+d} en (15), esta dado por:

$$u_k = -G(z^{-1})^{-1}[F(z^{-1})y_k - C(z^{-1})r_{k+d}], \quad (21)$$

Los polinomios $C(z^{-1})$ y $Q(z^{-1})$ son diseñados de tal manera que el sistema de control en lazo cerrado satisfaga el siguiente lema.

Lema 1: La condición necesaria y suficiente para que la ley de control u_k lleve y mantenga estable en cero la superficie deslizante, s_{k+d} , es que todas las raíces del polinomio

$$G_d(z^{-1}) = A(z^{-1})Q(z^{-1}) + B(z^{-1})C(z^{-1}), \quad (22)$$

Pertenezcan al interior del círculo unitario, y que además los polinomios (Q, C) , (A, C) y (Q, B) no tengan ceros comunes fuera del círculo unitario. $G_d(z^{-1})$ es el polinomio característico del sistema en lazo cerrado (Åström y Wittenmark, 1989).

El polinomio diseñado $C(z^{-1})$ y los polinomios $F(z^{-1})$ y $G(z^{-1})$ obtenidos con el algoritmo presentado, conforman la ley de control de varianza mínima generalizada que mantendrá la superficie deslizante estable en cero, lo cual conlleva a que la señal de error tienda a cero en estado estacionario. Debido a que la señal de error está definida como $e_k = (y_k - r_k)$, entonces la señal de salida seguirá a la señal de referencia con error nulo en estado estacionario.

En este trabajo, el movimiento deseado del Capsbot se define a través de la dinámica de la velocidad de la masa interna, x_{4d} , mostrada en la Fig. 7. El objetivo es aplicar el algoritmo de control planteado al modelo lineal (12) para lograr que la señal de salida y_k siga a la señal de referencia r_k , siendo esta última la dinámica de velocidad de la masa interna, Fig. 7.

6. RESULTADOS

En esta sección se muestra la aplicación del algoritmo de control al modelo lineal del Capsbot (12) y los resultados obtenidos a través de simulaciones. Los valores de los parámetros del modelo son mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1: Valores de los parámetros del sistema

m_1	masa de la cápsula	0.0147 Kg
m_2	masa del imán	0.0094 Kg
g	gravedad	9.81 m/s ²
μ	coeficiente de fricción	0.500
a	posición inicial	0.01 m

Para aplicar el algoritmo de control presentado al modelo del Capsubot (12), primeramente se debe discretizar la función de transferencia continua dada por (13), en este caso se usa un retenedor de orden cero (Isermann, 1989). Se escogió un período de muestreo pequeño, que además cumpliera con el Teorema de Shannon (Isermann, 1989), esto es $T_0 = 0.001 \text{ seg}$. Así la función de transferencia discreta que representa el modelo lineal del Capsubot está dada por:

$$G(z) = \frac{x_{4d}(z)}{u(z)} = \frac{-0.1741z^{-1} + 0.1733z^{-2}}{1 - 1.992z^{-1} + 0.992z^{-2}} \quad (23)$$

Reescribiendo (23) en la estructura presentada en (14), se obtiene:

$$(1 - 1.992z^{-1} + 0.992z^{-2})y_k = z^{-1}(-0.1741 + 0.1733z^{-1})u_k \quad (24)$$

Así tenemos que:

$$A(z^{-1}) = 1 - 1.992z^{-1} + 0.992z^{-2},$$

$$B(z^{-1}) = -0.1741 + 0.1733z^{-1},$$

Y $d = 1$.

Para el diseño del controlador, usando el criterio de varianza mínima generalizada, los siguientes polinomios fueron escogidos:

$$C(z^{-1}) = 1 - 0.87z^{-1} + 0.215z^{-2} - 0.015z^{-3},$$

$$Q(z^{-1}) = 0.001(1 - z^{-1}).$$

Con estos polinomios $C(z^{-1})$ y $Q(z^{-1})$ se obtienen, usando (20) y (19), los polinomios:

$$F(z^{-1}) = 1.137 - 0.807z^{-1}$$

$$G(z^{-1}) = -0.173 + 0.17461z^{-1} - 0.002595z^{-2}$$

La señal de referencia, r , (dinámica de x_{4d} , velocidad de la masa interna) se describe a través de las rectas siguientes:

$$R_1 = -86.7368t \quad \in 0 \leq t < 0.019$$

$$R_2 = 101.1683t - 3.5702 \quad \in 0.019 \leq t < 0.03064$$

$$R_3 = 15.2895t - 0.9389 \quad \in 0.03064 \leq t < 0.1094$$

$$R_4 = -15.3194t + 2.4097 \quad \in 0.1094 \leq t \leq 0.1573$$

En la Fig. 8 se muestra la señal de salida (velocidad de la masa interna, $y_k = x_{4dk}$) y la señal de referencia r . Se puede observar como en estado estacionario la señal de salida sigue a la señal de referencia con error nulo. En estado transitorio presenta un error, sin embargo este es relativamente pequeño y aceptable, además se puede notar que en estado transitorio la dinámica de salida es muy rápida. La señal de control u_k se presenta en la Fig. 9, se puede observar como en

estado estacionario la señal de control se comporta como señales tipo escalones. Por último, en la Fig. 10 se muestra la variable controlada s_k que representa la superficie deslizante. Se puede notar que en estado estacionario esta señal se mantiene en cero, como se desea.

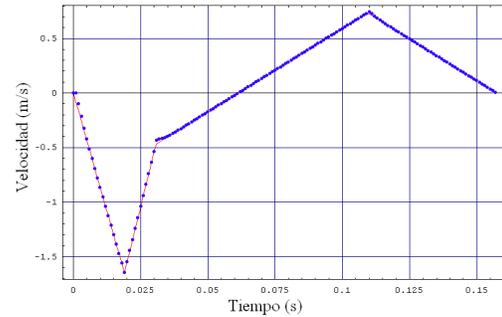


Fig. 8. Señal de salida y_k (velocidad de la masa interna, x_{4dk}) vs. la señal de referencia r .

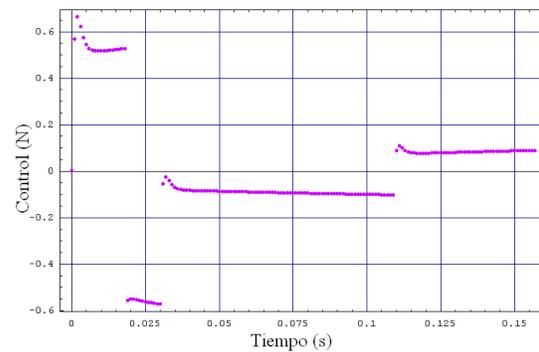


Fig. 9. Señal de control u_k .

Las simulaciones comprueban que efectivamente el algoritmo de control funciona como se esperaba, es decir, la señal de salida sigue a la señal de referencia con error nulo en estado estacionario, y además se conserva la simplicidad de la dinámica de velocidad para la masa interna. Siguiendo esta señal de referencia, se controla la velocidad de la masa interna (imán), la cual genera el movimiento del Capsubot.

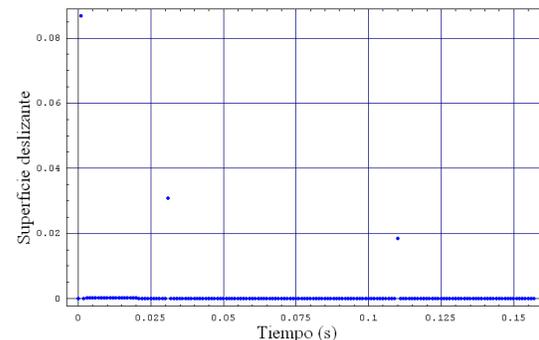


Fig. 10. Superficie deslizante s_k .

Los resultados aquí obtenidos se pueden comparar con los presentados en (Quintero *et al.*, 2010). En la Fig. 11 se muestra la ley de control en lazo abierto diseñada en (Quintero *et al.*, 2010) versus la obtenida por el algoritmo en lazo cerrado presentado en este trabajo. Se puede observar como en estado estacionario, las leyes presentan una dinámica similar; es decir, excepto por los instantes (que son relativamente cortos) que dura el estado transitorio de la ley de control aquí planteada, esta ley se puede aproximar a unos escalones de diferente amplitudes para cada tramo. Así, existe solamente una pequeña diferencia de amplitud en cada tramo entre ambas leyes de control.

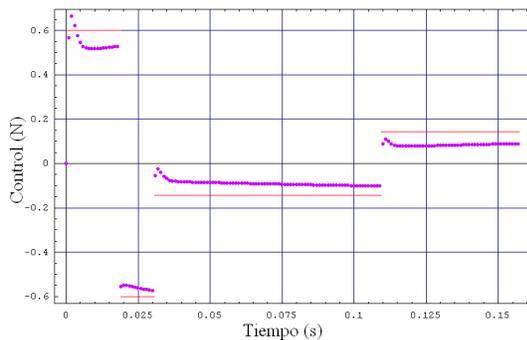


Fig. 11. Ley de control en lazo abierto (Quintero *et al.*, 2010) vs. ley de control propuesta u_k (21).

La ventaja del uso de la ley de control en lazo cerrado aquí planteada radica en la robustez de la misma. Es decir, su capacidad de seguir controlando la velocidad de la masa interna del Capsubot, de la manera deseada, a pesar de que ocurran algunas pequeñas perturbaciones o cambios en la señal de referencia. Por ejemplo, la señal de referencia puede ser la velocidad de la masa interna propuesta en la Fig. 2, de igual manera en este caso, la señal de salida seguirá a la señal de referencia, controlando la velocidad de la masa interna y produciendo así el movimiento del Capsubot. Además de las dos dinámicas deseadas para la velocidad de la masa interna del Capsubot, existe en la literatura otra dinámica propuesta por (Liu *et al.*, 2008a, 2008b), donde el movimiento para el Capsubot se ejecuta en siete pasos en lugar de cuatro. Los algoritmos de control propuestos por (Liu *et al.*, 2008a, 2008b) aun no se han implementado. Así, la nueva técnica de control planteada en el presente trabajo podría ser utilizada para de igual manera tomar la dinámica de la velocidad de la masa interna, descrita por siete tramos o pasos, como la señal de referencia a seguir y analizar su funcionamiento sobre algún prototipo.

Un ejemplo muy común de perturbaciones, puede ser la llamada perturbación paramétrica, donde existe incertidumbre en uno o varios parámetros del modelo. En este modelo en particular, el parámetro del coeficiente de roce es un valor estimado, así los parámetros de la función de transferencia (13) cambian si se toma otro valor para el coeficiente de roce (por consiguiente cambia la función de transferencia discreta (23). Para observar los efectos de colocar el Capsubot sobre una superficie mas lisa, se cambió el valor del coeficiente de roce a $\mu=0.200$ (compárese este valor con el dado en la Tabla 1). En la Fig. 12 se observa la señal de salida siguiendo a la señal de referencia r y en la Fig. 13 se muestra la dinámica de la señal de control para este caso.

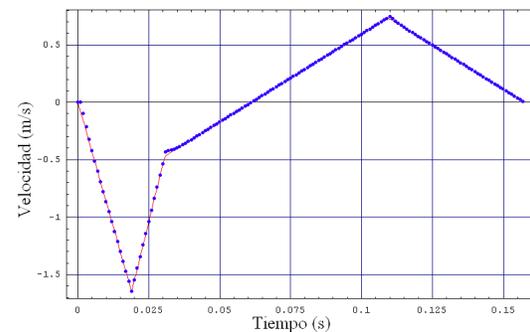


Fig. 12. Señal de salida y_k vs. señal de referencia r cuando $\mu=0.200$.

Como era de esperarse, la ley de control cumple con el objetivo de mantener el error en cero durante el estado estacionario entre la señal de salida y la señal de referencia, como se observa en la Fig. 12. Debido a que el parámetro del coeficiente de roce cambió, la ley de control mostrada en la Fig. 13 presenta cierta diferencia respecto a la dinámica mostrada en la Fig. 11. Sin embargo, el comportamiento de las mismas es muy similar, la diferencia se da en el valor de las amplitudes de los escalones en estado estacionario.

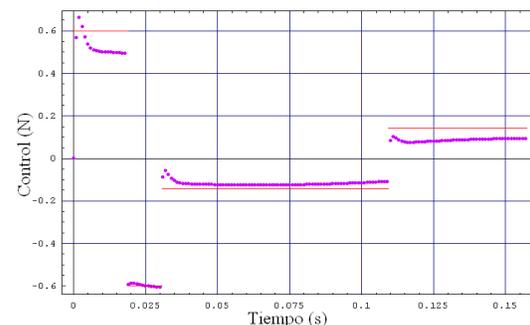


Fig. 13. Señal de control u_k cuando $\mu=0.200$.

El algoritmo de control en lazo cerrado fue probado sobre un mímico del Capsubot para observar su comportamiento.

Una secuencia de imágenes tomadas de la dinámica del mímico se muestra en la Fig. 14. Se puede observar que efectivamente el controlador cumple con controlar la velocidad de la masa interna y generar el movimiento hacia adelante del Capsubot.

En la secuencia, Fig. 14, se puede observar como la masa interna comienza en una posición inicial igual a 1cm y la Cápsula (masa externa) en 5 cm. A medida de que la masa interna se mueve aceleradamente hacia la izquierda, la Cápsula se desplaza hacia la derecha.

Luego de que la masa interna alcanza su máxima posición hacia la izquierda, esta regresa lentamente a su posición inicial mientras la Cápsula externa permanece inmóvil.

El Capsubot se desplaza en todo su ciclo 0.8 cm aproximadamente, y los ciclos se repiten sucesivamente permitiendo el desplazamiento del Capsubot.

7. CONCLUSIONES

Una nueva ley de control en lazo cerrado ha sido propuesta para el sistema Capsubot. La ley de control combina el criterio de varianza mínima generalizada con el concepto de control por superficie deslizante en el dominio discreto.

La aplicación de la ley de control permite realizar el seguimiento de la señal de referencia por la señal de salida. Al escogerse la señal de referencia como la dinámica de velocidad deseada de la masa interna del Capsubot, se produce el movimiento deseado del sistema Capsubot.

Para la aplicación de esta técnica de control fue necesario llevar el modelo no lineal del Capsubot a un modelo lineal.

Los resultados de las simulaciones y la implementación computacional de la ley de control sobre un mímico del sistema Capsubot verifican que efectivamente la ley de control cumple con el objetivo de control y se genera el movimiento adecuado del sistema Capsubot.

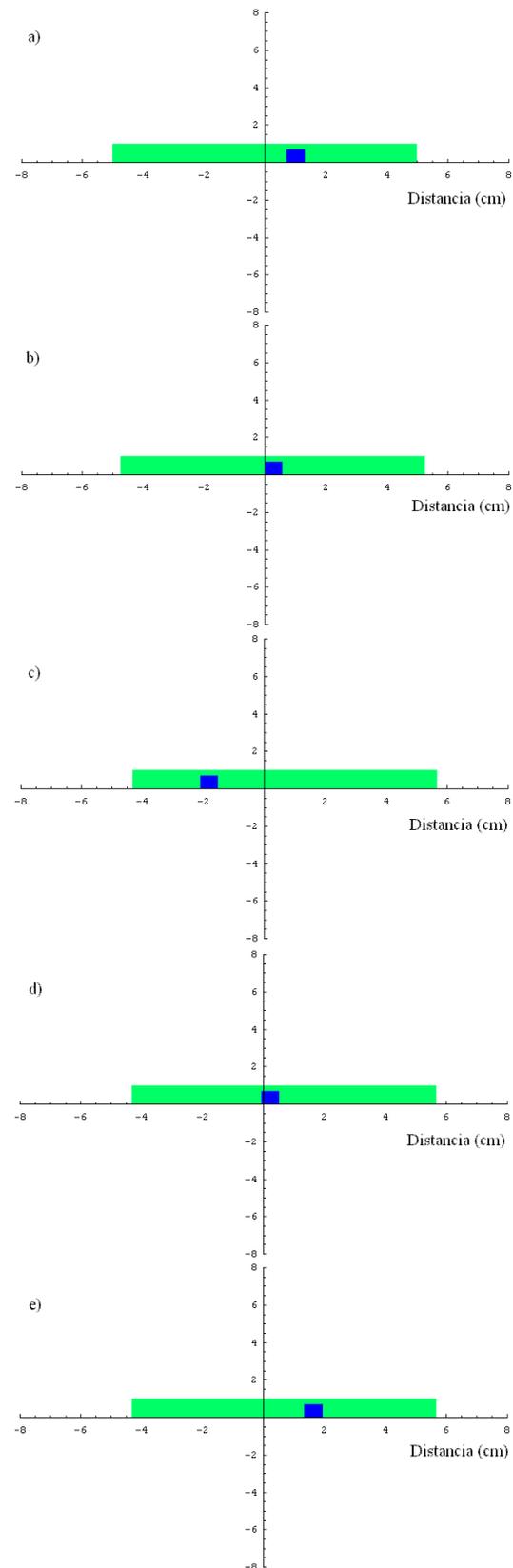


Fig. 14. Secuencia del mímico del sistema Capsubot al usar la ley de control u_k (12).

TRABAJO FUTURO

Una vez se cuente con el sensor de luz y el microcontrolador, la ley en lazo cerrado será probada sobre el prototipo de Capsubot 4 (Quintero *et al.*, 2010). Además, se propone crear un diseño que sustituya la fuente de poder por una batería tipo pila para construir un sistema autónomo.

REFERENCIAS

- Åström, K.J., & Wittenmark, B. (1989). "Adaptive Control". Addison-Wesley Reading, MA.
- Isermann, R. (1989). "Digital Control Systems (Vol I)". Fundamentals, Deterministic Control, Springer-Verlag.
- Furuta, K. (1993). "VSS Type Self-tuning Control". IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 40, pp. 37-44.
- Li, H., Furuta, K. & Chernous'ko, F. L. (2006), "Motion Generation of a Capsule Robot Using Internal Force and Static Friction". In Proc. of IEEE Conf. Decision and Control, San Diego CA, USA, pp. 575-580.
- Lee, N., Kamamichi, N., Li, H. & Furuta, K. (2008). "Control System Design and Experimental Verification of Capsubot". In Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Nice, Francia, pp. 1927-1932.
- Liu, Y., Yu, H. & Yang, T. C. (2008a). "Analysis and Control of a Capsubot". In Proc. of 17th World Congress The International Federation of Automatic Control, Seoul, Korea, pp. 756-761.
- Liu, Y., Yu, H. & Vladereanu, L. (2008b). "An Iterative Learning Control Scheme for the Capsubot". Proc. of the UKACC International Conference on Control 2008.
- Patete, A., Furuta, K. & Tomizuka, M. (2008a). "Stability of Self-tuning Control based on Lyapunov Function". International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, Vol. 22, No. 8, pp. 795-810.
- Patete, A., Furuta, K. & Tomizuka, M. (2008b). "Self-tuning Control based on Generalized Minimum Variance Criterion for Auto Regressive Models". Automatica, Vol. 44, No. 8, pp. 1970-1975.
- Li, H., Lee, N. & Kamamichi, N. (2009). "Control System Design for the Capsubot", Emergent Problems in Nonlinear Systems and Control LNCIS, 393, pp. 107-123.
- Quintero, J., Patete, A. & Aguirre, I. (2010). "Construcción de un Prototipo del Sistema Capsubot a Bajo Costo", Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, Vol. 1, No. 15, pp. 7-15.