

Diseño de un Controlador por Torque Calculado CTC de un Robot Manipulador Tipo SCARA

Guillermo E. Valencia*, John C. Turizo**, M E. Sanjuan***

*Universidad Antonio Nariño sede Puerto Colombia, ing_mecguillo@hotmail.com **Universidad del Norte, johnt@uninorte.edu.co, ***Universidad del Norte, msanjuan@uninorte.edu.co

Resumen — Se implementó en simulación un control por modelo de referencia tipo *Controlador por Torque Calculado* (CTC) sobre un robot manipulador tipo SCARA de cuatro grados de libertad, con miras a realizar un estudio de las bondades del algoritmo ante un conjunto de pruebas. El CTC es una ley clásica en control de manipuladores industriales y usa la realimentación de una señal que cancela los efectos de gravedad, fricción, tensor de inercia del manipulador, fuerzas de coriolis y centrífugas. Los controladores fueron evaluados calculando el error de seguimiento, rechazo de perturbación y errores en el modelo.

Palabras Claves — Controlador por torque calculado CTC, controlador predictivo generalizado GPC, control por modelo de referencia MPC, robot manipulador, SCARA.

Abstract — *A control by reference model Computed Torque Control (CTC) was implemented through simulation on a SCARA-type robot manipulator with four degrees of freedom, in order to carry out the study of the benefits of the algorithm to a set of tests. The CTC is a classical law in control of industrial manipulators and it uses the feedback of a signal that cancels the effects of gravity, friction, inertia tensor of the manipulator, coriolis and centrifugal forces. The controllers were evaluated by calculating the tracking error, rejection of disturbance and errors in the model.*

Keywords — *Computed torque control CTC, generalized predictive controller GPC, reference model control RMC, robot manipulator, SCARA.*

I. NOMENCLATURA

| | |
|------------|--|
| CTC | controlador por torque calculado |
| GPC | controlador predictivo generalizado |
| MPC | controlador por modelo de referencia |
| PD | controlador proporcional derivativo |
| PID | controlador integral derivativo |
| q | vector de posiciones angulares reales |
| \dot{q} | vector de velocidades angulares reales |
| \ddot{q} | vector de aceleraciones angulares reales |

Guillermo E. Valencia. Profesor Tiempo completo Departamento de Ingeniería Electromecánica, Universidad Antonio Nariño.

John C. Turizo. Estudiantes de maestría en Ingeniería mecánica. Universidad del Norte.

Marco E. Sanjuán. Profesor Tiempo completo Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del Norte.

\ddot{q}_d vector de aceleraciones angulares deseadas

e desviación angular

K_p ganancia de posición en el controlador

K_v ganancia de velocidad en el controlador

Símbolos griegos

τ_D matriz de torques deseados

τ matriz de torques reales

II. INTRODUCCIÓN

Se han implementado muchas estrategias para dar solución a los problemas relacionados a mejorar el rendimiento de controladores en el seguimiento de trayectorias, proponiendo una gran variedad de algoritmos y métodos convencionales de control en aplicaciones de robótica y áreas relacionadas, entre los cuales se destacan el controlador Proporcional Derivativo (PD), Proporcional Integral Derivativo (PID), *Computer Torque Control* (CTC).

Los manipuladores industriales fueron inicialmente concebidos como un conjunto de n sistemas independientes [1]. Por consiguiente, las reacciones entre juntas consecutivas son ignoradas o consideradas como alteraciones externas. La tarea de control dada esta aproximación, es diseñar un controlador para cada junta como un sistema SISO. Esto es, el manipulador dinámico es reducido a un sistema de segundo orden lineal acoplado. Por lo tanto, métodos de control tradicionales con controladores lineales son sugeridos para obtener los requerimientos del sistema. Algunos ejemplos de estos controladores tradicionales son PI, PID como se menciona en [2]. De cualquier manera se ha encontrado que en la realidad la dinámica de manipuladores incluye no sólo efectos acoplados sino también otros términos no lineales como la fricción y la gravedad, que explican las falencias de diseñar métodos de control SISO en muchos casos. Estas falencias ocurren regularmente cuando se incurre en ignorar términos no lineales (p. ej., incrementando la velocidad de los manipuladores, trabajando en condiciones severas) como en [4]. Al respecto, muchos trabajos se han hecho al respecto para compensar las incertidumbres y las no linealidades. Por un lado, los controladores tradicionales como los PD, y PID fueron modificados para compensar las no linealidades de los sistemas, como en [5]. Por otro lado, aparecen nuevos controladores, llamados CTC [6, 7, 13, 14]. Sin embargo, en [6] se confronta el desempeño del CTC con el controlador

predictivo funcional PFC solo en cuanto error de seguimiento de trayectoria, por lo que no se determina la robustez del controlador por medio de rechazo de perturbaciones y la presencia de errores en el modelado. En estos, la linealización por realimentación no lineal [8] ha sido propuesta para dar solución a estas dificultades. Aunque algunas mejoras fueron reportadas, se obtuvieron inconvenientes debido a los requerimientos de conocimiento acerca de la dinámica del manipulador. En consecuencia, la comunidad científica dedicada al control de manipuladores ha avanzado hacia controladores con mejor rendimiento pero también con mayor complejidad, y es así como se ha llegado desde la pasada década, al control predictivo (MPC) como una importante estrategia en el control industrial de procesos [9, 10]. Entre las bondades de dicha estrategia se encuentra su buena respuesta ante rechazo de perturbaciones y errores en los parámetros del modelo, pero solo se tiene registro de pocos trabajos de su implementación en los robots manipuladores [11, 12]. En el presente artículo se implementará el controlador predictivo sobre el modelo dinámico de un manipulador industrial tipo SCARA, el cual es comparada con respecto al control por torque calculado. El manipulador donde se implementaron los controladores fue un robot de cuatro grados de libertad tipo SCARA. El principal objetivo de la investigación es evaluar las bondades del controlador predictivo frente al controlador por torque calculado. En el documento se muestra de manera explícita el modelo dinámico inverso del manipulador seguido de la descripción de los algoritmos de control predictivo y torque calculado.

III. FORMULACIÓN DEL MODELO DINÁMICO

El movimiento articular real de un robot es gobernado por la dinámica, teniendo en cuenta la masa de cada eslabón y junta, la velocidad y aceleración articular, y las fuerzas aplicadas a cada junta. Se utilizó el método recursivo de Newton-Euler para obtener el modelo dinámico del manipulador SCARA aplicando este método, se calcularon finalmente los torques en función de las posiciones, velocidades y aceleraciones articulares. El modelo dinámico del robot SCARA es un conjunto de ecuaciones diferenciales y están dadas por:

$$A(q) \cdot \ddot{q} + B(q) \cdot [\dot{q} \cdot \dot{q}] + C(q) \cdot [\dot{q}^2] + g(q) = \Gamma \quad (1)$$

Donde:

q es el n-vector de coordenadas espaciales generalizado que describe la posición del manipulador.

\dot{q} es el n-vector de velocidades angulares.

\ddot{q} es el n-vector de aceleraciones angulares.

$A(q)$ es la matriz simétrica de inercia en el espacio articular de tamaño $n \times n$.

$B(q)$ es la matriz de efectos de coriolis de tamaño $n \times n(n-1)/2$.

$C(q)$ es la matriz de torques centrípetos de tamaño $n \times n$.

$g(q)$ es el n-vector de torques gravitatorios.

IV. ESTRATEGIAS DE CONTROL

Control por Torque Calculado (CTC):

Como en sistemas mecánicos, se usa un controlador PD en conjunto con el método de linealización por realimentación. Con la linealización por realimentación el sistema no lineal es transformado a un sistema desacoplado lineal para así cancelar las variables no lineales por medio de la ley de control. Aplicando criterios de estabilidad sobre este "nuevo" sistema lineal, los parámetros del PD pueden ser determinados mucho más fáciles que en el caso no lineal para conseguir la robustez deseada y el funcionamiento. Cuando se asume que se conocen exactamente los parámetros, la linealización por realimentación puede ser obtenida según la ley de control mostrada en la ecuación (2):

$$\tau = M(q)a + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + J^T \tau_D \quad (2)$$

$$a = \ddot{q}_d - K_v \dot{e} - K_p e \quad (3)$$

Donde \ddot{q}_d es el vector con la aceleración deseada en las articulaciones y e es definida como $e = q - q_d$.

En la ecuación (2) se cancelan las no linealidades de modo que el sistema sea linealizado por realimentación y desacoplado. Junto con el modelo dinámico que se muestra en la ecuación (1) se puede obtener que el comportamiento de la entrada-salida es:

$$\ddot{q} = a \quad (4)$$

La ecuación (3) hace que el sistema inestable de integradores puros sea estabilizado añadiendo una acción PD. La siguiente ecuación de error puede ser obtenida para el sistema de lazo cerrado:

$$\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e \quad (5)$$

Que es estable si las matrices K_p y K_v son definidas como positivas, de igual forma se puede usar una acción PID en vez de la acción PD, por lo que se tiene el siguiente error dinámico:

$$\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e + K_i \int e dt = 0 \quad (6)$$

A continuación se muestra un diagrama esquemático del controlador que ha sido estudiado.

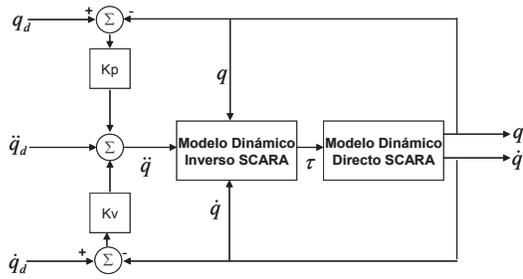


Fig. 1. Diagrama Esquemático del Controlador CTC

V. RESULTADOS Y SIMULACIONES

Se evaluaron tres escenarios diferentes para realizar un análisis comparativo de los controladores implementados. Inicialmente se evaluó el *error de seguimiento*, determinando el valor absoluto del error y la magnitud de la desviación cartesiana, ante una trayectoria deseada que consta de un cambio de dirección gradual y otro abrupto respectivamente. Luego se evaluaron los *errores en el modelo* introduciendo en el controlador cambios en sus parámetros de sintonía con el fin de evaluar su robustez frente a estas variaciones.

Por último, se evaluó la *robustez* de los controladores cuantificando errores máximos y tiempos de estabilización ante una perturbación tipo pulso.

A. ERROR DE SEGUIMIENTO

Esta prueba fue realizada usando un periodo de muestreo de 1ms con un tiempo de simulación de 3s, siguiendo la trayectoria mostrada en la figura 2. El manipulador realizó el recorrido a una velocidad promedio de 11 cm/s. En la figura 2, se muestran las desviaciones del manipulador bajo el empleo del controlador tipo CTC respecto a la trayectoria deseada.

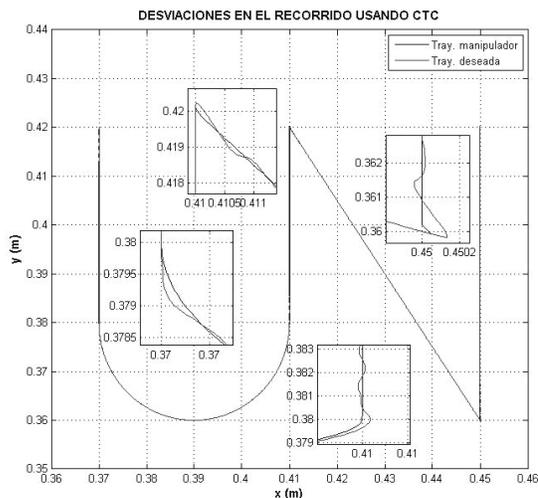


Fig. 2. Desviación del recorrido del manipulador para CTC

A continuación, se grafican los errores relativos cartesianos producidos en el recorrido de la trayectoria, obteniendo

registros que no superan los 5×10^{-4} m, usando el controlador tipo CTC.

B. ERRORES EN EL MODELO

En esta prueba igualmente se siguieron los parámetros de tiempo de simulación, periodo de muestreo y trayectoria anteriores, para este caso se variaron los parámetros de sintonía (ganancias) para el CTC, tanto en velocidad como en posiciones, en porcentajes constantes desde 20% menos, pasando por 10% menos, así como también 10% y 20% mayores respecto al valor originalmente establecido, tomando estos últimos como referencias en el comportamiento del controlador, como se observa a continuación, registrándose un error máximo escasamente por encima de 5×10^{-4} m.

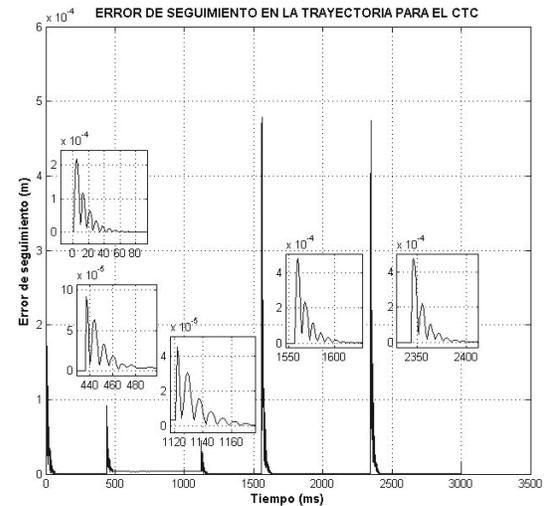


Fig. 3. Error de seguimiento en la trayectoria para el CTC

COMPORTAMIENTO DEL CTC FRENTE A LA VARIACION DE PARAMETROS DE SINTONIA

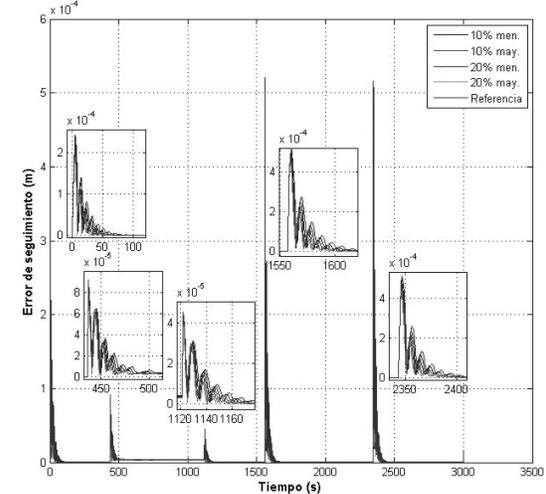


Fig. 5. Comportamiento del CTC frente a la variación de parámetros de sintonía