Congreso Nacional de Control Automático 2006
18 - 20, Octubre, 2006, UNAM, México, DF

ISBN 970-32-4025-9

Resultados experimentales de control servo visual para un robot planar por campos de velocidad

Ricardo R. Pérez*, Marco A. Arteaga†, Arturo Espinosa*
* Facultad de Matemáticas
Universidad Autónoma de Yucatán
Anillo Periférico Norte Tablaje Cat. 13615 Mérida, Yucatán México
† Departamento de Control y Robótica
Edificio de Posgrado de la Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
Apdo. Postal 70–256, México, D. F., 04510, México
$richrpa@gmail.com$, $arteaga@verona.fi - p.unam.mx$

***Resumen*— Gran parte de los trabajos desarrollados para el seguimiento de trayectorias por robots industriales requieren que dicha trayectoria sea parametrizada en el tiempo, En este artículo se implementa un control visual bajo la filosofía de campos de velocidad para el seguimiento de trayectorias aleatorias determinadas por el operador en la imagen obtenida de la cámara.**

***Palabras Clave*— Robots, seguimiento de trayectorias, campos de velocidad.**

I. Introducción

En muchos casos en que el ambiente de trabajo resulta inaccesible para el ser humano es necesario emplear robots que realizan tareas determinadas. Cuando la actividad a realizar es repetitiva se define y programa el comportamiento que debe tener el dispositivo mecánico; caso contrario se presenta cuando la actividad a realizar requiere de que un operador decida las acciones que debe ejecutar el robot. Este caso en particular es el que motiva el presente trabajo. El objetivo es introducir una metodología por medio de la cual un operador pueda determinar una trayectoria que es totalmente aleatoria y que la ley de control realice el seguimiento de esta.

Actualmente la tarea de seguimiento de trayectorias para los robots industriales en su gran mayoría se realiza definiendo un polinomio parametrizado en el tiempo[1]. Dicha labor se complica al momento en que se quiere definir una trayectoria aleatoria que debe cubrir una cantidad considerable de puntos en el espacio de trabajo, debido a que el polinomio ajustado a todos estos puntos es de orden alto. Una alternativa es emplear el concepto de control basado en campos de velocidad [2], que permite alcanzar coordenadas en el espacio de operación sin la necesidad de determinar una trayectoria deseada en el tiempo.

La visión es un valioso sensor para el robot, dado que intenta imitar el sentido de la visión humana, y permite hacer mediciones del ambiente sin tener contacto con él. Por tal motivo un controlador servo visual es implementado en este trabajo permitiendo que el operador pueda definir en el espacio de la imagen la trayectoria a ser seguida por el dispositivo mecánico y con la cámara cerrar el lazo para la retroalimentación del control.

El artículo está organizado como sigue: En la Sección II se presenta el modelo del robot, los conceptos básicos relacionados con el mapeo del espacio de la imagen al espacio articular y el concepto de campos de velocidad. En la Sección III se describe el controlador propuesto para el seguimiento de la trayectoria con un observador de velocidad lineal. En la Sección IV se muestran los resultados experimentales. Finalmente, en la Sección V se dan las conclusiones.

II. Preliminares

El sistema empleado en este trabajo está constituido por un brazo robótico de la marca CRS modelo A465 de seis grados de libertad, del cual sólo se emplean dos de ellos dándole un comportamiento planar vertical. En el efector final del manipulador se encuentra sujeta una esfera de unicel de color negro. La cámara UNIC UF-1000CL está fija de tal manera que el eje óptico se encuentra perpendicular al plano de trabajo del robot y se conoce su posición con respecto al sistema coordenado del robot. En la Figura 1 se puede observar el sistema utilizado.

El modelo dinámico del robot sin tomar en cuenta la fricción en las articulaciones está dado por

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{\tau} \tag{1}$$

donde $\boldsymbol{q} \in \mathbb{R}^n$ es el vector de coordenadas generalizadas articulares, $\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}) \in \mathbb{R}^{nxn}$ es la matriz de inecia, $\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} \in \mathbb{R}^n$ es el vector de Coriolis y fuerzas centrifugas, $\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de fuerzas gravitacionales, y $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^n$ es el vector de torques actuando en las articulaciones

La función que realiza el mapeo entre el espacio cartesiano y el de la imagen se conoce como cinemática perceptual [3] y está dada por

$$\boldsymbol{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \frac{\alpha\lambda}{O^C_{\mathrm{R3}} - \lambda}\boldsymbol{R}(\phi)\left[\boldsymbol{x}_{\mathrm{R}} - \begin{bmatrix} O^C_{\mathrm{R1}} \\ O^C_{\mathrm{R2}} \end{bmatrix}\right] + \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

Fig. 1. Sistema Robótico

donde $\boldsymbol{x}_{\mathrm{R}}$ corresponde a la posición cartesiana del centroide de la esfera del robot, $\boldsymbol{R}(\phi)$ determina la orientacion y $\boldsymbol{O}_{\mathrm{R}}^{C} = \left[O_{\mathrm{R1}}^{C}\ O_{\mathrm{R2}}^{C}\ O_{\mathrm{R3}}^{C}\right]^{T}$ la posición del marco de referencia de la cámara con respecto al sistema coordenado del robot, α es el factor de conversión de metros a píxeles, λ es la distancia focal de la cámara, y $[u_0\ v_0]^T$ es el corrimiento en la imagen del centro óptico de la cámara.

Derivando la ecuación (2) se obtiene la velocidad en el espacio de la imagen

$$\dot{\boldsymbol{y}} = \frac{\alpha\lambda}{O_{\mathrm{R3}}^{C} - \lambda}\boldsymbol{R}(\phi)\boldsymbol{J}_{\mathrm{A}}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}} \tag{3}$$

siendo $\boldsymbol{J}_{\mathrm{A}}(\boldsymbol{q}) = \partial\boldsymbol{k}(\boldsymbol{q})/\partial\boldsymbol{q}$ y $\boldsymbol{k}(\boldsymbol{q})$ la cinemática directa del robot. De la ecuación (3) y el Jacobiano perceptual queda definido como

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{q}) = \frac{\alpha\lambda}{O_{\mathrm{R3}}^{C} - \lambda}R(\phi)\boldsymbol{J}_{\mathrm{A}}(\boldsymbol{q}) \tag{4}$$

El campo de velocidad es una función que determina la velocidad deseada en el espacio de la imagen calculando el vector tangente a cada punto del espacio de la imagen. El campo de velocidad deseado seleccionado para este trabajo está dado por la función

$$\boldsymbol{v}(\boldsymbol{y}) = -\frac{k_0}{\sqrt{(y_1 - y_{\mathrm{d1}})^2 + (y_2 - y_{\mathrm{d2}})^2} + \epsilon}\begin{bmatrix} y_1 - y_{\mathrm{d1}} \\ y_2 - y_{\mathrm{d2}} \end{bmatrix} \tag{5}$$

De este modo, el objetivo de control consiste en que error del campo de velocidad que se define a continuación tienda a cero cuando el tiempo tiende a infinito.

$$\boldsymbol{e} = \dot{\boldsymbol{y}} - \boldsymbol{v}(\boldsymbol{y}) \tag{6}$$

III. Control servo visual

En esta sección se presenta la ley de control implementada para lograr el objetivo de seguimiento de trayectoria del robot. Primero se define el sistema dinámico para el cálculo de la velocidad deseada de la siguiente manera

$$\dot{\boldsymbol{\rho}} = \boldsymbol{e} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{d}} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})^{-1}\left[\boldsymbol{v}(\boldsymbol{y}) - \boldsymbol{K}\boldsymbol{\rho}\right] \tag{8}$$

donde $\boldsymbol{K}$ es una matriz simétrica definida positiva en $\mathbb{R}^{2X2}$, con lo anterior se define el error de velocidad articular como $\tilde{\boldsymbol{\omega}} = \dot{\hat{\boldsymbol{q}}} - \boldsymbol{\omega}_d$ y el de observación como $\boldsymbol{z} = \boldsymbol{q} - \hat{\boldsymbol{q}}$.

Considerese ahora las siguientes definiciones

$$\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{r}} \triangleq \boldsymbol{\omega}_{\mathrm{d}} - \boldsymbol{\Lambda}_1\boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{\Lambda}_1\boldsymbol{z} \tag{9}$$

$$\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{o}} \triangleq \dot{\hat{\boldsymbol{q}}} - \boldsymbol{\Lambda}_1\boldsymbol{z} \tag{10}$$

donde $\boldsymbol{\Lambda}_1$ está dada por $\boldsymbol{\Lambda}_1 \triangleq \boldsymbol{I} + 2\boldsymbol{\Lambda}_3$, y $\boldsymbol{\Lambda}_3 \in \mathbb{R}^{nxn}$ es una matriz diagonal positiva definida. El control propuesto para este trabajo es una versión simplificada de la ley de control presentada en [4] la cual ha sido aumentada con el sistema dinámico (7)-(8) y está dado por

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\tau} = {} & \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{r}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{r}})\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{r}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) \\ & - \boldsymbol{K}_{\mathrm{R}}(\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{o}} - \dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{r}}) - \boldsymbol{K}_{\mathrm{p}}(\tilde{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{z})\end{aligned} \tag{11}$$

donde $\boldsymbol{K}_{\mathrm{R}} \triangleq (1/2)\boldsymbol{K}_{\mathrm{p}} + \boldsymbol{K}_{\mathrm{R1}}$ y $\boldsymbol{K}_{\mathrm{R1}} \in \mathbb{R}^{nxn}$ es una matriz diagonal positiva definida y

$$\ddot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{r}} = \dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{d}} - \boldsymbol{\Lambda}_1(\dot{\hat{\boldsymbol{q}}} - \boldsymbol{\omega}_{\mathrm{d}}) \tag{12}$$

$\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{d}}$ se obtiene derivando (8), como se muestra a continuación

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{d}} = {} & \boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})^{-1}\left[\frac{\partial\boldsymbol{v}(\boldsymbol{y})}{\partial\boldsymbol{y}} - \boldsymbol{K}\left[\dot{\boldsymbol{y}} - \boldsymbol{v}(\boldsymbol{y})\right]\right] \\ & + \left[\frac{d}{dt}\boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})^{-1}\right]\left[\boldsymbol{v}(\boldsymbol{y}) - \boldsymbol{K}\boldsymbol{\rho}\right]\end{aligned} \tag{13}$$

Finalmente para el cálculo de la velocidad articular se implementa el observador lineal siguiente

$$\dot{\hat{\boldsymbol{q}}} = \dot{\hat{\boldsymbol{q}}}_{\mathrm{o}} + \boldsymbol{\Lambda}_2\boldsymbol{z} + k_{\mathrm{d}}\boldsymbol{z} \tag{14}$$

$$\ddot{\hat{\boldsymbol{q}}}_{\mathrm{o}} = \ddot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{r}} + k_{\mathrm{d}}\boldsymbol{\Lambda}_2\boldsymbol{z} \tag{15}$$

donde k_{d} es una constante real positiva. Las condiciones iniciales para el observador son escogidas como $\dot{\hat{\boldsymbol{q}}}_{\mathrm{o}} = -(\boldsymbol{\Lambda}_2\boldsymbol{z}(\boldsymbol{0}) + k_{\mathrm{d}}\boldsymbol{z}(\boldsymbol{0}))$ y $\hat{\boldsymbol{q}}(\boldsymbol{0}) = \boldsymbol{q}(\boldsymbol{0})$ cuando $\boldsymbol{z}(\boldsymbol{0}) = \boldsymbol{0}$ y $\dot{\hat{\boldsymbol{q}}}(\boldsymbol{0}) = \boldsymbol{0}$

IV. Resultados experimentales

En esta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos en las pruebas realizadas al sistema. El experimento consiste en que el operador por medio del cursor en pantalla defina una trayectoria a ser seguida por el efector final del robot. El proceso para obtener la trayectoria comienza cuando el operador hace click en algún punto de la imagen, a partir de ese momento ese punto se establece como deseado para el cálculo del campo de velocidad, y se almacena cada una de las coordenadas por las que se desplaza el puntero en la imagen hasta recibir otro click en el botón izquierdo del mouse. Esta colección de coordenada

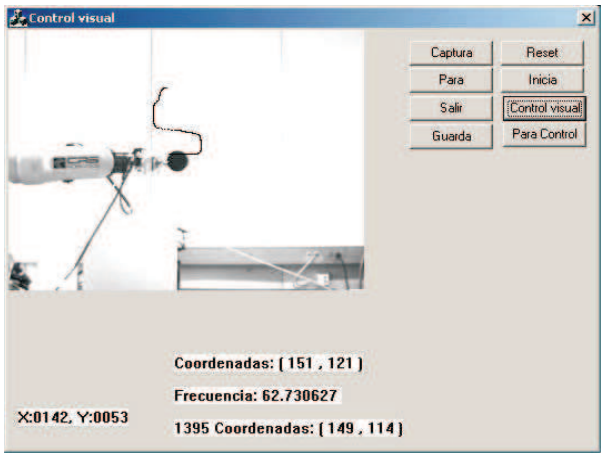

Fig. 2. Interfaz del sistema.

que han sido almacenadas se convierten en la trayectoria a ser seguida. En la Figura 2 se puede observar la interfaz en la que se trabaja y una línea negra que muestra la trayectoria a ser cubierta por el brazo articulado.

El centroide de la esfera en la imagen se determina por medio de del procesamiento de la imagen. Dicho proceso consiste de varias etapas como son la umbralización que permite eliminar gran parte de la información no trascendente de la imagen, la segmentación que divide la imagen en los distintos objetos que la constituyen y el análisis que distingue cual de los objetos obtenidos del paso anterior corresponde a un círculo además de obtener su centro [5].

Con estos dos valores el centroide de la esfera y la posición deseada se puede calcular la velocidad deseada determinada por el campo vectorial definido por la ecuación (5), con $k_0 = 1.5$ y $\epsilon = 0.1$.

Cuando se alcanza la coordenada deseada se actualiza con el siguiente punto deseado y así sucesivamente hasta lograr cubrir la trayectoria completa.

Los valores de los parámetros relacionados con el sistema de visión son: $\lambda = 0.0085$m, $\alpha = 67567$ pixeles/m, donde λ se obtiene de la información técnica del lente de la camara y α se calcula a partir de una regla de tres entre la superficie del sensor de la cámara y la resolución del mismo. La posición del marco de referencia de la cámara con respecto al de robot es $\boldsymbol{O}_R^C = [0.647\ 0.616\ 1.52]^T$m, la rotación de la cámara $\phi = 0^o$, y el corrimiento en la imagen del centro óptico de la cámara $u_0 = 182$ pixeles, $v_0 = 124$ pixeles.

Para el controlador se utilizan los siguientes valores para las matrices de ganancias

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{R}} = \begin{bmatrix} 90 & 0 \\ 0 & 90 \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{K}_{\mathrm{p}} = \begin{bmatrix} 45 & 0 \\ 0 & 45 \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}$$

El observador utiliza los siguientes valores en sus matrices de ganancias

$$\boldsymbol{\Lambda}_1 = \begin{bmatrix} 26 & 0 \\ 0 & 26 \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\Lambda}_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \quad k_{\mathrm{d}} = 5$$

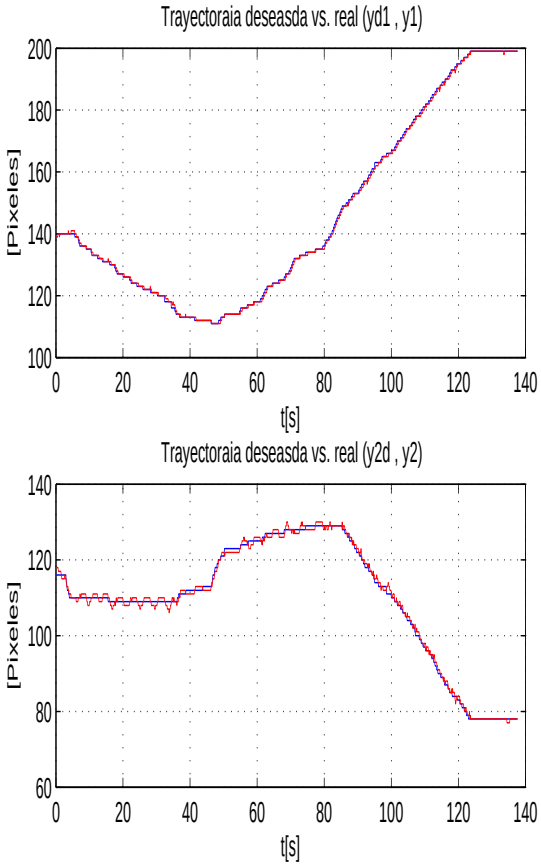

Fig. 3. Trayectoria real vs. deseada.

En la Figura 3 se puede observar la gráfica de comparación entre la trayectoria deseada (en azul) y le trayectoria que siguió el efector final del robot (en rojo), tanto para y_1 como y_2, se puede observar en la gráfica como el dispositivo mecánico alcanza cada uno de los puntos que forman parte de la secuencia que fue definida por el operador.

En la Figura 4 se presenta el error de posición durante el proceso de seguimiento a la trayectoria como se puede observar los valores para cada una de las componentes de $\boldsymbol{y}$ no rebasa los 2 pixeles de error una vez que ha comenzado a seguir la secuencia de puntos que conforman la trayectoria.

En lo que se refiere al error de observación $\boldsymbol{z}$ en la Figura 5 que presenta su evolución durante el seguimiento de la trayectoria, el valor máximo en la articulación 1 esta dado por $|z_1| = 1.57$, y para la articulación 2 $|z_1| = 2.87$.

Finalmente, en la Figura 6 se muestra como el error del campo de velocidad se encuentra variando cada vez que se actualiza la coordenada deseada hasta que llega al ultimo punto y mientras permanece en él, dicho error tiende a valores con valor máximo de 0.02 pixeles por segundo

V. Conclusiones

En este artículo se presenta una aplicación del control servo visual para robots planares por medio de campos de velocidad al llevarlo al seguimiento de trayectorias aleatorias,

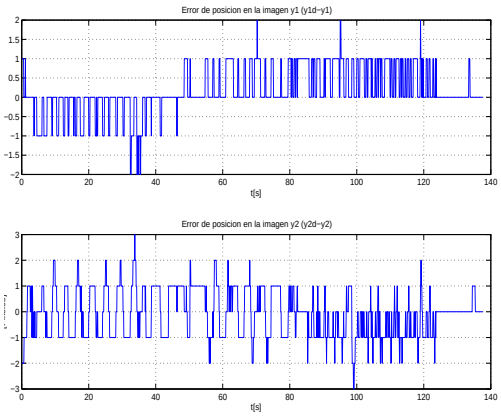

Fig. 4. Error de posición en y.

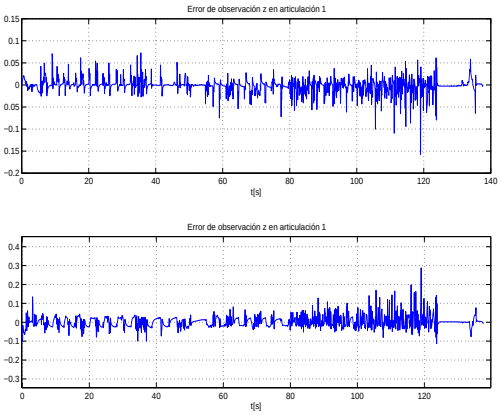

Fig. 5. Error de velocidad en la imagen.

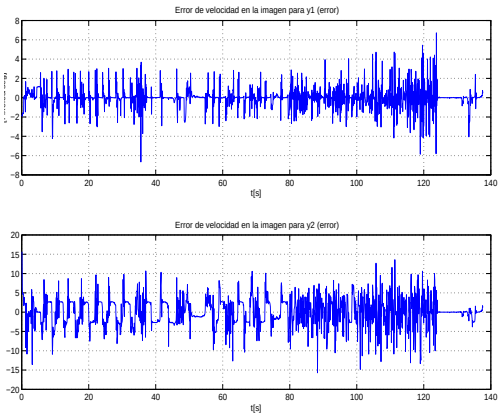

Fig. 6. Error de velocidad en la imagen.

además de proponer una ley de control que cuenta con un observador de velocidad lineal. Los resultados obtenidos son satisfactorios en el sentido de como se puede definir trayectorias en el espacio de operación que es permitido para el robot CRS 465 y como este en un tiempo finito logra recorrerla. Sin embargo como se puede observar en las gráficas el tiempo de respuesta del dispositivo mecánico es relativamente lento al emplear aproximadamente 140 segundos en llegar al final de la trayectoria por lo que resulta de interés hacer las modificaciones necesarias de manera que se optimice el funcionamiento. Entre estas modificaciones se pueden mencionar agregar el termino de la fricción en el modelo del robot el cual no fue tomado en cuenta en este trabajo y resulta de bastante importancia en los sistemas físicos, otro factor a ser tomado en cuenta para lograr un mejor desempeño del sistema es la disminución del tiempo de muestreo que se obtuvo en este trabajo y que resulta de 15 ms. En lo que se refiere a la prueba de estabilidad para el sistema actualmente se está trabajando en ella.

REFERENCIAS

[1] Saeed B. Niku. (2001). “Introduction to Robotics Analysis, Systems, Applications”. Prentice Hall, Upper Saddle River.

[2] Li, P. and Horowitz, R. (1999) “Passive Velocity Field Control of Mechanical Manipulators”. IEEE Transactions on Robotics and Automation. Vol. 15, No. 4, pp. 751 - 763.

[3] Kelly, R., Moreno, J. and Campa, R (2004). “Visual Servoing of Planar Robots via Velocity Fields”. IEEE 43rd Conference on Decision and Control, Atlantis, Paradise Island, Bahamas.

[4] Arteaga, M.A. and Kelly. R (2004). “Robot Control Without Velocity Measurements: New Theory and Experimental Results”. IEEE Transactions on Robotics and Automation. Vol. 20, No. 2, pp. 297 - 308.

[5] Gonzalez , R.C. and Woods. R.E (2002). “Digital Image Processing”. Second Edition Prentice Hall.