

CONTROL SERVO VISUAL DE UN ROBOT MANIPULADOR TIPO SCARA BASADO EN PASIVIDAD

Carlos Soria¹, Flavio Roberti¹, Ricardo Carelli¹, José M. Sebastián²

¹Instituto de Automática
Universidad Nacional de San Juan
Av. Libertador San Martín 1109 (o), 5400 San Juan
{rcarelli, csoria, froberti}@inaut.unsj.edu.ar

²Dpto. De Automática, Ingeniería Electrónica e Informática Industrial
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid
c/Gutiérrez Abascal 2, 28006-Madrid, España
(jose.sebastian@upm)

Resumen: En este trabajo se diseña un controlador servo visual basado en pasividad. Se deduce la propiedad de pasividad del sistema servo visual y también se realiza un análisis de desempeño L_2 para el caso en que el objeto de interés tenga una velocidad desconocida y el controlador pueda cumplir una tarea de seguimiento visual. Se muestran resultados experimentales realizados en un robot manipulador tipo SCARA para verificar el cumplimiento de los objetivos del controlador propuesto.

Palabras Claves: robot manipulador, control servo visual, control no lineal, pasividad.

1. INTRODUCCION

La información visual es sin duda una de las herramientas que más se utiliza actualmente para reconocer entornos desconocidos. El control basado en visión de sistemas robóticos ha despertado mucho interés en estos últimos años debido a la reducción de costos de las cámaras de visión y de todo el sistema de procesamiento asociado.

Una clasificación de las estructuras de los sistemas con realimentación visual se introduce en (Weiss *et al.*, 1987), (Hutchinson *et al.*, 1997), a partir del cual se pueden caracterizar todos los sistemas prácticos.

Un sistema dinámico “mirar y mover” es aquel donde la arquitectura de control es jerárquica y se usa el sistema de visión para proveer las entradas de referencia al controlador de las articulaciones que utiliza la realimentación de las variables articulares de posición y velocidad para controlar internamente el robot. Es decir, las operaciones son ejecutadas en forma secuencial, primero “mirar” y luego “mover”. En estos esquemas el lazo de control de posición domina la dinámica total del sistema.

En contraste con esto, los sistemas "servo visuales directos" eliminan completamente el controlador de las articulaciones del robot reemplazándolo con un controlador servo visual que directamente calcula los

valores de las coordenadas articulares usando solamente la visión para controlar el mecanismo.

Una segunda clasificación de los sistemas distingue al control basado en posición (Basri *et al.*, 1998), (Wilson *et al.*, 1996) del control basado en imagen (Sanderson *et al.*, 1987), (Espiau *et al.*, 1992). En esquemas de control basados en posición, se extraen las características de la imagen las cuales se utilizan junto al modelo geométrico del objeto y el conocimiento del modelo de la cámara para estimar la posición y orientación del objeto de interés con respecto a la cámara. La acción de control se calcula para reducir los errores de posición y orientación estimados. En el control basado en imagen, los valores de las acciones de control se calculan directamente sobre la base de las características de la imagen. Este tipo de esquema puede reducir retardos de computación, eliminar la necesidad de interpretación de la imagen y eliminar errores debidos a las incertidumbres en los modelos de los sensores y de la calibración de la cámara.

Por último, los sistemas se puede clasificar de acuerdo a la posición que ocupe el sensor de visión en: "sistemas con cámara fija", o "sistemas con cámara en mano". En este trabajo se utilizará el sistema “cámara en mano”.

El objetivo de control de un sistema visual de seguimiento con cámara en mano es controlar el

movimiento de la cámara -y por lo tanto del robot- para colocar las coordenadas de las características del plano de la imagen en algún valor deseado, independientemente del movimiento del objeto. Se han propuesto numerosos controladores servovisuales basados en distintas teorías, como Lyapunov (Kelly, 1996), (Kelly *et al.*, 2000), robustez (Maruyama y Fujita, 1998). Sin embargo solo recientemente se han desarrollado controladores basados en las propiedades de pasividad del sistema del robot y la visión (Fujita *et al.*, 2002).

En este trabajo se diseña un controlador servo visual basado en la teoría de pasividad. Se analizará también el desempeño L_2 para el caso en que el objeto de interés se mueva con una velocidad desconocida. Este controlador presenta como característica respecto de otras propuestas su simplicidad, la utilización de la teoría de LMI para el cálculo de la matriz de ganancias y la utilización de una matriz de ganancia no diagonal, lo cual mejora el desempeño del sistema de control. Asimismo se propone la utilización de una matriz de ganancia variable para mejorar el desempeño de regulación o seguimiento y evitar la saturación de los actuadores.

2. MODELO DINAMICO DEL MANIPULADOR ROBOTICO

En ausencia de perturbaciones, la dinámica en el espacio de las articulaciones de un manipulador rígido de n eslabones se puede escribir como,

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

donde q es el vector de desplazamientos articulares de orden $n \times 1$, τ es el vector de pares aplicados de orden $n \times 1$, $M(q)$ es la matriz de inercia definida positiva de orden $n \times n$ y $C(q, \dot{q})$ es la matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis de orden $n \times n$ y $g(q)$ es el vector de pares de gravedad.

2.1 Modelo dinámico del robot industrial BOSCH SR-800

Considérense los dos grados de libertad en el plano horizontal del robot manipulador industrial BOSCH SR-800 de la Fig. 1. Se define un sistema de coordenadas cartesianas cuyo origen se selecciona en el punto de intersección del eje de rotación de la articulación del hombro con el plano horizontal xy .



Fig. 1. Robot industrial Bosch SR 800.

En el esquema de la Fig. 2, m_1 es la masa del eslabón 1, l_1 es la longitud del eslabón 1, I_1 es la inercia del eslabón 1, r_1 es el centro de masa del eslabón 1, q_0 es

la posición articular del eslabón 1, m_2 es la masa del eslabón 2, l_2 es la longitud del eslabón 2, I_2 es la inercia del eslabón 2, r_2 es el centro de masa del eslabón 2, q_1 es la posición articular del eslabón 2.

El modelo de este manipulador tiene la estructura de la ecuación (1) con dimensión 2 y sin considerar el efecto gravitatorio.

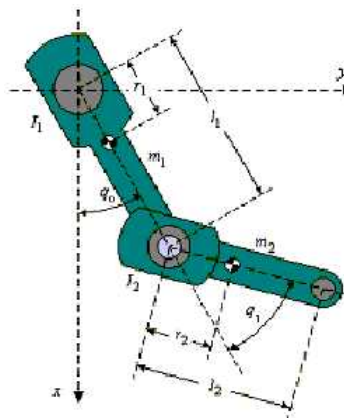


Fig. 2. Descripción geométrica del robot manipulador

3. MODELO DE LA CAMARA

Una característica de la imagen es cualquier variable que incluya relaciones entre componentes estructurales de la imagen tales como líneas, puntos, áreas o parámetros cuantitativos asociados a ellas. Se define un parámetro característico de la imagen como cualquier cantidad real valuada que se puede calcular desde una o más características de imagen.

Algunos de los parámetros característicos más ampliamente conocidos son las coordenadas de un punto en la imagen (Hashimoto, 1993), (Papanikolopoulos *et al.*, 1993), (Espiau *et al.*, 1989), la distancia entre dos puntos en el plano de la imagen y la orientación de la línea que los conecta (Feddema y Mitchell, 1989), (Feddema *et al.*, 1991), y el área de la superficie proyectada como puede verse en (Weiss *et al.*, 1987).

Tomando en cuenta lo anterior, un objeto puntual (característica) ${}^c p_o$ con coordenadas, $[{}^c p_x \quad {}^c p_y \quad {}^c p_z]^T \in \mathfrak{R}^3$ en el marco de la cámara, se proyecta sobre un punto en el plano de la imagen con coordenadas $[u \quad v]^T \in \mathfrak{R}^2$, Fig. 3.

$$\xi({}^c p_x, {}^c p_y, {}^c p_z) = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = -\frac{\lambda}{c p_z} \begin{bmatrix} \alpha_x {}^c p_x \\ \alpha_y {}^c p_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde α_x , α_y son los factores de escala en los ejes x e y respectivamente y λ es la distancia focal.

Estas coordenadas pueden considerarse como parámetros característicos de la imagen.

La Fig. 4 ejemplifica la obtención de la característica de imagen que en este caso corresponde al centroide de un objeto circular, donde la cruz simboliza la posición del centro de masa.

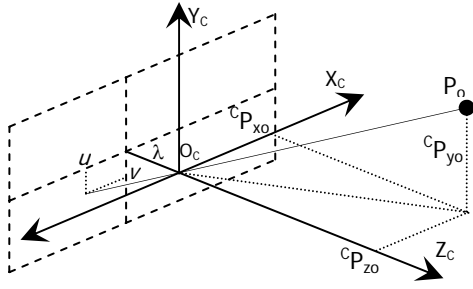


Fig. 3. Sistema de coordenadas de la cámara.

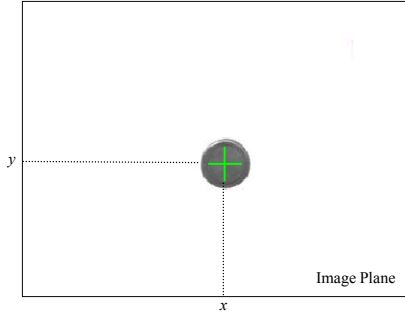


Fig. 4. Obtención de la característica de imagen.

2.1 Un punto característico

Sea ${}^w p_o \in \mathcal{R}^{m_o}$ la posición de un objeto puntual expresado en el marco de la base del robot. Además, la posición relativa de este objeto puntual con respecto al marco de la cámara será ${}^c p_o$. De acuerdo con el modelo de la cámara expresado por la ecuación (2), el punto característico de imagen depende únicamente de la posición del objeto puntual ${}^w p_o$ y de la posición y orientación de la cámara, es decir

$$\xi = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = -\alpha \frac{\lambda}{c p_{z_o}} \begin{bmatrix} c p_{x_o} \\ c p_{y_o} \end{bmatrix} \quad (3)$$

donde se ha supuesto que los factores de escala α_x y α_y son iguales y expresados en píxeles/m. La derivada temporal de (3) conduce a,

$$\dot{\xi} = -\alpha \lambda \begin{bmatrix} \frac{1}{c p_{z_o}} & 0 & -\frac{c p_{x_o}}{c p_{z_o}^2} \\ 0 & \frac{1}{c p_{z_o}} & -\frac{c p_{y_o}}{c p_{z_o}^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c \dot{p}_{x_o} \\ c \dot{p}_{y_o} \\ c \dot{p}_{z_o} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Por otra parte, la posición del objeto puntual ${}^w p_o$ con respecto al marco de la cámara, esto es ${}^c p_o$ se puede expresar como,

$${}^c p_o = {}^c R w(q) [{}^w p_o - {}^w p_{Corg}] \quad (5)$$

Sean ${}^w v_c$ y ${}^w \omega_c$ las velocidades lineal y angular de la cámara respecto del marco de la base del robot O_w . Entonces, la derivada temporal del vector de posición del punto respecto del marco de la cámara, teniendo en cuenta la expresión de la velocidad lineal y angular, toma la forma,

$$\begin{bmatrix} c \dot{p}_{x_o} \\ c \dot{p}_{y_o} \\ c \dot{p}_{z_o} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} {}^c p_o = \frac{d}{dt} \{ {}^c R w(q) [{}^w p_o - {}^w p_{Corg}] \} \quad (6) \\ = {}^c R w(q) \{ -{}^w \omega_c \times ({}^w p_o - {}^w p_{Corg}) \} + ({}^w \dot{p}_o - {}^w v_c)$$

Si la velocidad del objeto es distinta de cero, es decir ${}^w \dot{p}_o \neq 0$ la ecuación (6) se puede expresar como,

$$\begin{bmatrix} c \dot{p}_{x_o} \\ c \dot{p}_{y_o} \\ c \dot{p}_{z_o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & -c p_{z_o} & c p_{y_o} \\ 0 & -1 & 0 & c p_{z_o} & 0 & -c p_{x_o} \\ 0 & 0 & -1 & -c p_{y_o} & c p_{x_o} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^c R w(q) & 0 \\ 0 & {}^c R w(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^w v_c \\ {}^w \omega_c \end{bmatrix} + {}^c R w(q) {}^w \dot{p}_o \quad (7)$$

donde ${}^w v_c$ y ${}^w \omega_c$ son las velocidades lineal y angular de la cámara con respecto al marco de la base del robot.

El movimiento del punto característico de la imagen como una función de la velocidad de la cámara se obtiene sustituyendo (4) en (7):

$$\dot{\xi} = -\frac{\alpha \lambda}{c p_{z_o}} \begin{bmatrix} -1 & 0 & \frac{c p_{x_o}}{c p_{z_o}} & \frac{c p_{y_o} c p_{x_o}}{c p_{z_o}} & \frac{c p_{z_o} + c p_{z_o}}{c p_{z_o}} & c p_{y_o} \\ 0 & -1 & \frac{c p_{x_o}}{c p_{z_o}} & \frac{c p_{z_o} + c p_{y_o}}{c p_{z_o}} & -\frac{c p_{x_o} c p_{x_o}}{c p_{z_o}} & -c p_{x_o} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^c R w(q) & 0 \\ 0 & {}^c R w(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^w v_c \\ {}^w \omega_c \end{bmatrix} - \frac{\alpha \lambda}{c p_{z_o}} \begin{bmatrix} \frac{1}{c p_{z_o}} & 0 & -\frac{c p_{x_o}}{c p_{z_o}} \\ 0 & \frac{1}{c p_{z_o}} & -\frac{c p_{y_o}}{c p_{z_o}} \end{bmatrix} {}^c R w(q) {}^w \dot{p}_o \quad (8)$$

Utilizando la proyección del punto en el marco de la cámara y la definición del jacobiano de la imagen,

$$J_{imagen}(\xi, c p_{z_o}) = \begin{bmatrix} \alpha \lambda & 0 & \frac{u}{c p_{z_o}} & \frac{uv}{\alpha \lambda} & \frac{\alpha^2 \lambda^2 + u^2}{\alpha \lambda} & v \\ 0 & \alpha \lambda & \frac{v}{c p_{z_o}} & -\frac{\alpha^2 \lambda^2 + v^2}{\alpha \lambda} & \frac{uv}{\alpha \lambda} & -u \end{bmatrix} \quad (9)$$

Se puede expresar $\dot{\xi}$ en términos de las velocidades angulares \dot{q} y de la velocidad del objeto ${}^w \dot{p}_o$, por la siguiente expresión

$$\dot{\xi} = J_{imagen}(\xi, c p_{z_o}) \begin{bmatrix} c R_w & 0 \\ 0 & c R_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & T_A(q) \end{bmatrix} J_A(q) \dot{q} - \quad (10)$$

$$- \frac{\alpha \lambda}{c p_{z_o}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{c p_{x_o}}{c p_{z_o}} \\ 0 & 1 & -\frac{c p_{y_o}}{c p_{z_o}} \end{bmatrix} {}^c R w {}^w \dot{p}_o$$

En forma compacta:

$$\dot{\xi} = J(q, \xi, c p_{z_o}) \dot{q} + J_o(q, c p_o) {}^w \dot{p}_o \quad (11)$$

4. DISEÑO DEL CONTROLADOR SERVO VISUAL BASADO EN PASIVIDAD

Un aporte importante y más reciente en el control de sistemas no lineales es lo que se refiere a la pasividad, este concepto de manera intuitiva muestra que un sistema pasivo no puede entregar más energía de la que está recibiendo y muestra de manera inmediata la estabilización de un sistema con esta cualidad, es decir un sistema no lineal que es pasivo se puede estabilizar simplemente (Fig. 5) haciendo una retroalimentación negativa de la salida $v = -ky$, con k

> 0 . Para un sistema de entrada v y salida y se dice que es pasivo si verifica

$$\int_0^T v^T y dt \geq \beta \quad \forall T, \quad \beta \in \mathfrak{R} \quad (12)$$

y es estrictamente pasivo de entrada si verifica

$$\int_0^T v^T y dt \geq \beta + \alpha \|v\| \quad \forall T, \quad \alpha, \beta \in \mathfrak{R} \quad (13)$$

La pasividad es una propiedad importante entre la entrada y la salida de un sistema y ha sido ampliamente utilizada en el análisis de estabilidad de sistemas no lineales (Hill y Moylan, 1976), (Lin, 1995), (Willems, 1972a), (Willems, 1972b). Este concepto ha sido usado para analizar la estabilidad de sistemas interconectados y especialmente en estructuras en cascada, ej. (Vidyasagar, 1979), (Byrnes *et al.*, 1991) y (Ortega *et al.*, 1995).

Particularmente, en (Byrnes *et al.*, 1991), fue presentada una síntesis de conceptos y técnicas para la teoría de sistemas pasivos utilizando la teoría de control no lineal geométrico y muestra de manera concreta cuándo un sistema de dimensión finita puede ser transformado a su equivalente pasivo a través de retroalimentación del estado. La pasividad es entonces una propiedad útil en el análisis y diseño de sistemas no lineales y representa una alternativa al diseño mediante la teoría de Lyapunov.

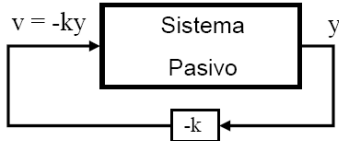


Fig 5. Sistema pasivo estabilizado con $v=-ky$

4.1 Propiedades de pasividad del robot

El robot es pasivo de τ a \dot{q} . Usando la ec. (1):

$$\int_0^T \dot{q}^T(t) \tau(t) dt = \int_0^T [\dot{q}^T M(q) \ddot{q} + \dot{q}^T C(q, \dot{q}) \dot{q}] dt \quad (14)$$

con

$$\dot{q}^T M(q) \ddot{q} = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} [\dot{q}^T M(q) \dot{q}] - \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{M}(q) \dot{q} \quad (15)$$

Siendo

$$\frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{M} \dot{q} = K \geq 0 \text{ Energía cinética}$$

y además

$$\int_0^T dK - \frac{1}{2} \dot{q}^T (\dot{M} - 2C) \dot{q} dt = K(T) - K(0) \geq -K(0)$$

$$\int_0^T \tau^T \dot{q} dt \geq -\beta_m \quad \forall T$$

Por tanto, de acuerdo a (12), el mapeo

$$\tau \rightarrow \dot{q} \text{ es pasivo}$$

4.2 Propiedad de pasividad del sistema de visión

Para un objeto estático ${}^w \dot{p}_o = 0$ y entonces la ecuación (10) puede escribirse como

$$\dot{\xi} = J_I(\xi, {}^c p_{zo}) \begin{bmatrix} {}^c R_W(q) & 0 \\ 0 & {}^c R_W(q) \end{bmatrix} J_G \dot{q} \quad (16)$$

Tomando como función de energía $V_\xi = \frac{1}{2} \xi^T \xi$ y

realizando la derivada temporal:

$$\dot{V}_\xi = \xi^T \dot{\xi} = \xi^T J_I(\xi, {}^c p_{zo}) \begin{bmatrix} {}^c R_W(q) & 0 \\ 0 & {}^c R_W(q) \end{bmatrix} J_G \dot{q}$$

Integrando

$$\begin{aligned} \int_0^T \dot{V}_\xi dt &= \int_0^T \xi^T J_I(\xi, {}^c p_{zo}) \begin{bmatrix} {}^c R_W(q) & 0 \\ 0 & {}^c R_W(q) \end{bmatrix} J_G \dot{q} dt \\ &= \int_0^T v_\xi^T \dot{q} dt = V(T) - V(0) \geq -V(0) \end{aligned}$$

Con

$$v_\xi = J_G^T \begin{bmatrix} {}^c R_W(q) & 0 \\ 0 & {}^c R_W(q) \end{bmatrix}^T J_I^T(\xi, {}^c p_{zo}) \xi$$

Puede concluirse que el mapeo

$$\dot{q} \rightarrow v_\xi \text{ es pasivo}$$

4.3 Diseño del Sistema de Control

Considerando la variable $\tilde{\xi}(t) = \xi(t) - \xi_d$ en lugar de $\xi(t)$ para contemplar el problema de regulación, se preserva la propiedad de pasividad del resultado anterior con $u = \dot{q}$,

$$\begin{aligned} \int_0^T u^T v_{\tilde{\xi}} dt &\geq -\beta \quad \forall T \\ u &\rightarrow v_{\tilde{\xi}} \text{ es pasivo} \end{aligned}$$

Con $V_{\tilde{\xi}} = \frac{1}{2} \tilde{\xi}^T \tilde{\xi}$ y

$$\begin{aligned} v_{\tilde{\xi}} &= J_G^T \begin{bmatrix} {}^c R_W(q) & 0 \\ 0 & {}^c R_W(q) \end{bmatrix}^T J_I^T(\xi, {}^c p_{zo}) \tilde{\xi} \\ &= J^T(\xi, {}^c p_{zo}, q) \tilde{\xi} \end{aligned}$$

La ley de control (ver esquema en la Fig. 6) queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} u &= -K v_{\tilde{\xi}} \quad K = K^T > 0 \\ u &= -K J_G^T \begin{bmatrix} {}^c R_W(q) & 0 \\ 0 & {}^c R_W(q) \end{bmatrix}^T J_I^T(\xi, {}^c p_{zo}) \tilde{\xi} \quad (16) \end{aligned}$$

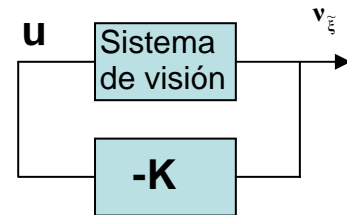


Fig. 6. Diagrama de bloques del sistema de control servo visual.

Siendo

$$J^T(q, \xi, {}^c p_{z0}) = J_G^T \begin{bmatrix} {}^c R_W(q) & 0 \\ 0 & {}^c R_W(q) \end{bmatrix} J_I^T(\xi, {}^c p_{z0}) \quad (17)$$

$$J^T(q, \xi, {}^c p_{z0}) = \begin{bmatrix} -\frac{\alpha\lambda}{{}^c p_{z0}} l_1 \cos(q_2) - \frac{\alpha\lambda}{{}^c p_{z0}} l_2 + v & -\frac{\alpha\lambda}{{}^c p_{z0}} l_2 + v \\ \frac{\alpha\lambda}{{}^c p_{z0}} l_1 \sin(q_2) - u & -u \end{bmatrix} \quad (18)$$

4.4 Análisis de la ley de control

Con

$$\int_0^T \mathbf{u}^T \mathbf{v}_{\xi} dt \geq -\beta \quad \forall T \Rightarrow \text{Pasivo}$$

Y teniendo en cuenta que de acuerdo a (13)

$$\int_0^T \mathbf{v}_{\xi}^T \mathbf{u} dt = - \int_0^T \mathbf{v}_{\xi}^T \mathbf{K} \mathbf{v}_{\xi} dt \geq -\lambda_{\max}(\mathbf{K}) \int_0^T \|\mathbf{v}_{\xi}\|^2 dt$$

El controlador resulta estrictamente pasivo de entrada.

Restando las dos ecuaciones anteriores se tiene

$$\lambda_{\max}(\mathbf{K}) \int_0^T \|\mathbf{v}_{\xi}\|^2 dt - \beta \leq 0$$

$$\int_0^T \|\mathbf{v}_{\xi}\|^2 dt \leq \frac{\beta}{\lambda_{\max}(\mathbf{K})}$$

$\Rightarrow \mathbf{v}_{\xi}$ es cuadrado integrable.

Para \mathbf{v}_{ξ} uniformemente continua, por el lema de Barbalat,

$$\Rightarrow \mathbf{v}_{\xi}(t) \rightarrow 0$$

Por tanto:

$$\tilde{\xi}(t) \rightarrow 0,$$

Cumplíendose el objetivo de control visual de regulación.

4.5 Robustez a movimiento del objeto: Diseño con desempeño L_2

Para objetos en movimiento, su velocidad se considera una perturbación al sistema de control y se diseña un controlador robusto con el criterio de desempeño L_2 (atenuación de perturbación en ganancia de norma L_2 o atenuación de energía) (Van der Schaft, 2000)

$$\int_0^T \|\tilde{\xi}\|^2 dt \leq \gamma^2 \int_0^T \|\mathbf{w}\|^2 dt; \quad \forall T > 0$$

siendo \mathbf{w} la perturbación.

Esta condición se obtiene si

$$\dot{V} \leq \frac{1}{2} (\gamma^2 \|\mathbf{w}\|^2 - \|\tilde{\xi}\|^2)$$

con

$$V = \frac{1}{2} \tilde{\xi}^T \tilde{\xi}$$

4.6 Condiciones de la ganancia de control para desempeño L_2

Considerando

$$V_{\xi} = \frac{1}{2} \tilde{\xi}^T \tilde{\xi}$$

y su derivada

$$\dot{V}_{\xi} = \frac{1}{2} \tilde{\xi}^T \dot{\tilde{\xi}}$$

con $\dot{\tilde{\xi}} = J_I(\xi, {}^c p_{z0}) \begin{bmatrix} {}^c R_W(q) & 0 \\ 0 & {}^c R_W(q) \end{bmatrix} J_G \dot{q} + J_o(q, {}^c p_o)^w \dot{p}_o$, en

forma compacta:

$$\dot{\tilde{\xi}} = J_I R J_G \dot{q} + \mathbf{w} = J_I R J_G \mathbf{u} + \mathbf{w} \quad (19)$$

siendo la ley de control igual a:

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K} \mathbf{J}_G^T \mathbf{R}^T \mathbf{J}_I^T \tilde{\xi}$$

reemplazando

$$\dot{V}_{\xi} = \tilde{\xi}^T \dot{\tilde{\xi}} = -\tilde{\xi}^T J_I R J_G \mathbf{K} J_G^T \mathbf{R}^T J_I^T \tilde{\xi} + \tilde{\xi}^T \mathbf{w} \leq \frac{1}{2} (\gamma^2 \|\mathbf{w}\|^2 - \|\tilde{\xi}\|^2)$$

Resolviendo y reagrupando se llega a:

$$\begin{pmatrix} \tilde{\xi}^T & \mathbf{w}^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -J_I R J_G \mathbf{K} J_G^T \mathbf{R}^T J_I^T + \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \gamma^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\xi} \\ \mathbf{w} \end{pmatrix} \leq 0 \quad (20)$$

Para encontrar un valor de \mathbf{K} y γ que satisfaga la desigualdad matricial, se utiliza la técnica de LMI. Para ello primeramente se coloca al Jacobiano total $J(q, \xi, {}^c p_{z0})$, ec. (18) en un conjunto convexo, tomando como vértices los siguientes valores $\{[u_{\min}, u_{\max}]; [v_{\min}, v_{\max}]; [q_{2\min}, q_{2\max}]\}$, siendo $u_{\min} = -320$ [pixel], $u_{\max} = 320$ [pixel], $v_{\min} = -240$ [pixel], $v_{\max} = 240$ [pixel], $q_{2\min} = -\pi/2$ [rad] y $q_{2\max} = \pi/2$ [rad]. Utilizando la herramienta LMI-Tool (El Ghaoui *et al.*, 1995) se procede a encontrar los valores de \mathbf{K} y γ .

Un problema que surge al seleccionar la matriz \mathbf{K} es que para grandes errores los actuadores saturan y para pequeños errores se tiene baja ganancia de corrección. Para solucionar este problema, se propone que la matriz de ganancia \mathbf{K} sea variable. Para ello se busca una ganancia \mathbf{K}_1 para grandes errores y otra \mathbf{K}_2 para pequeños errores. La ganancia \mathbf{K} en cada instante estará en el conjunto convexo

$$\mathbf{K} = (1 - \alpha) \mathbf{K}_1 + \alpha \mathbf{K}_2 \quad (21)$$

$$\alpha = \frac{|\tilde{\xi}|}{|\tilde{\xi}|_{\max}} \quad (22)$$

Esto garantiza que toda \mathbf{K} cumpla con la condición de desempeño γ . Para errores grandes se tolera un γ mayor, para errores pequeños corresponde un valor de γ menor según la especificación de diseño.

5. EXPERIMENTACION

El controlador está programado en el sistema operativo de tiempo real QNX, el tiempo de muestreo para el controlador y el tiempo de muestreo del sistema de visión es de 1 [ms] y 33 [ms] respectivamente.

Los valores de las ganancias encontradas son $K_1 = 10^{-5} \begin{bmatrix} 0.1443 & -0.1443 \\ -0.1443 & 0.4096 \end{bmatrix}$ con $\gamma = 3.9$ y $K_2 = 10^{-4} \begin{bmatrix} 0.0496 & -0.0496 \\ -0.0496 & 0.1399 \end{bmatrix}$ con $\gamma = 0.9$.

La experimentación comienza con la característica inicial $\xi_0 = [-48 \quad -65]$ [píxeles] y se elige primero la referencia $\xi_{d1} = [0 \quad 2]$ [píxeles] y después $\xi_{d2} = [-72 \quad 64]$ [píxeles]. A partir del tiempo $t=15$ seg comienza a moverse el objeto con una velocidad desconocida de aproximadamente 5 [mm/s]. En las figuras 7 y 8 se muestran las evoluciones de las características de imagen ξ_1 y ξ_2 respectivamente. En la Fig. 9 se observa la evolución de la norma del error. Cuando el objeto está fijo, el error de estado estacionario está por debajo de los 2 píxeles, obteniéndose una buena regulación. Cuando se mueve el objeto ($t > 15$ seg.), se puede observar que el controlador trata de mantener el error de características lo más cercano a cero, la norma del error en este caso está por debajo de 10 píxeles. En la Fig. 10 y 11 se muestran las acciones de control para las articulaciones q_1 y q_2 , se observa que ninguna supera los valores de saturación (± 1.2 [rad/s]). En la Fig. 12 se muestra la evolución de la característica en el plano de la imagen, desde la posición inicial hasta la primera característica deseada y después hasta la segunda, donde comienza a moverse el objeto. Se puede observar que el controlador diseñado trata de llegar por un camino relativamente directo hacia el punto de característica deseada.

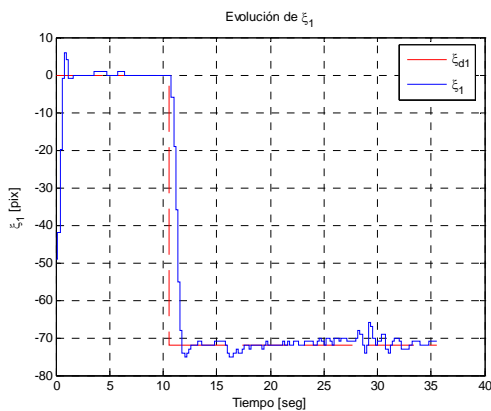


Fig. 7. Evolución de la característica ξ_1 y ξ_{d1}

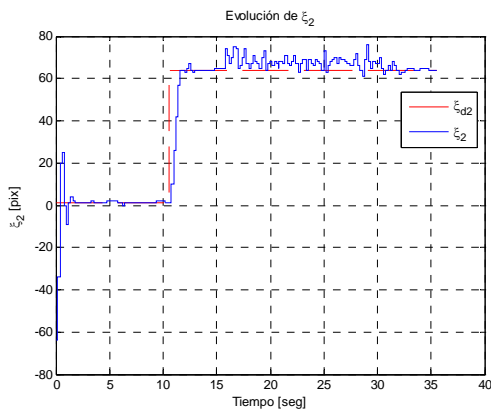


Fig. 8. Evolución de la característica ξ_2 y ξ_{d2}

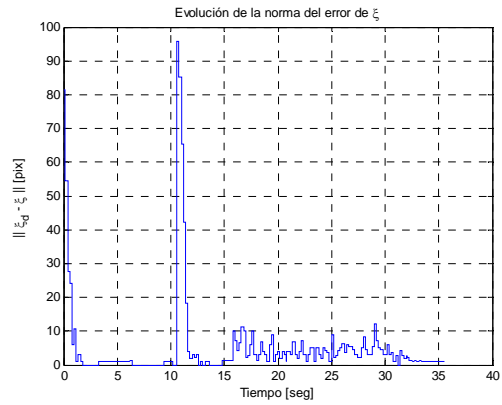


Fig. 9. Evolución de la norma del error $\|\xi_d - \xi\|$

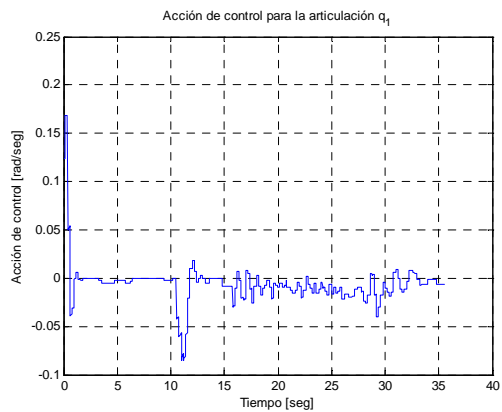


Fig. 10. Acción de control para la articulación q_1 .

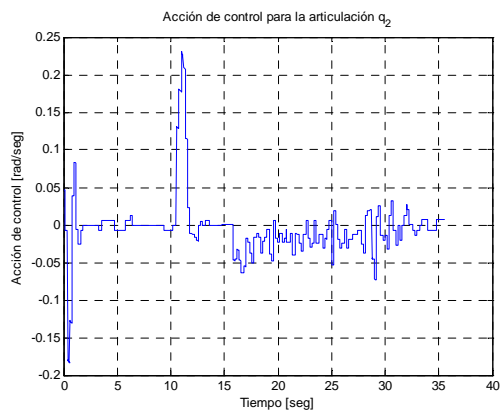


Fig. 11. Acción de control para la articulación q_2 .

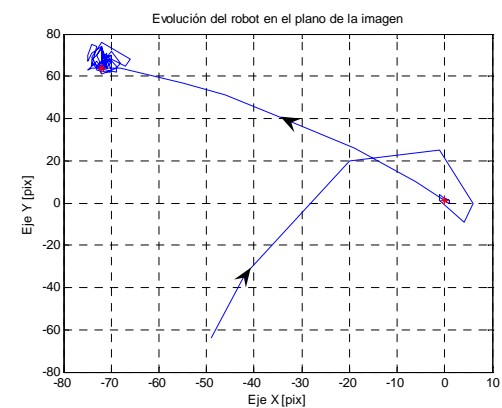


Fig. 12. Trayectoria de la característica en el plano de la imagen.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado el diseño y análisis de desempeño L_2 para un controlador servo visual basado en la teoría de pasividad. Se presentaron las propiedades de pasividad del sistema robótico y del sistema servo visual. El controlador permite evitar la saturación de los actuadores y muestra un desempeño aceptable para regulación y seguimiento de objetos móviles. Los resultados experimentales realizados en un robot manipulador industrial tipo SCARA Bosch SR-800 corroboran los objetivos del diseño propuesto.

REFERENCIAS

- Basri R., E. Rivlin, and I. Shimshoni, (1998). Visual homing: Surfing on the epipoles. In *Proceeding of International Conference on Computer Vision (ICCV '98)*, pages 863-869.
- Byrnes C.I., Isidori A., Willems J.C., (1991). Passivity, Feedback Equivalence, and the Global Stabilization of Minimum Phase Nonlinear Systems. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol.36, no.11, pp.1228-1240.
- El Ghaoui L., R. Nikoukhah and F. Delebecque, (1995). LMITOOL: a Package for LMI Optimization, *Proceedings IEEE Conference on Decision and Control*.
- Espiau B., F. Chaumette and P. Rives, (1989). "A New Approach To Visual Servoing in Robotics", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 5, pp.691-700.
- Espiau B., F. Chaumette, and P. Rives, (1992). A new approach to visual servoing in robotics. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 8(3).
- Feddema J. and O. Mitchell, (1989). "Vision – Guided Servoing with Feature Based Trajectory Generation", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 5, pp.691-700.
- Feddema J, C. Lee and O Mitchell, (1991), "Weighted Selection of Image Features for Resolved Rate Visual Feedback Control". *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 7, No.1, pp. 31-47.
- Fujita M., H. Kawai and M. W. Spong, (2002) "Passivity-based Dynamic Visual Feedback Control for Three Dimensional Target Tracking: Stability and L_2 -gain Performance Analysis," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol °, No. 11.
- Hashimoto, K., (1993). "Visual Servoing Real Time Control of Robot Manipulators Based on Visual Sensory Feedback," *World Scientific Series in Robotics and Automated Systems*, vol 7.
- Hill D. and P. Moylan, (1976). Stability results for nonlinear feedback systems. *Automatica*, Vol. 13, pp. 373-382.
- Hutchinson S., G. Hager and P. Corke, (1996). A tutorial on visual servo control. *IEEE Trans. On Robotics and Automation*, 12(5):651-670.
- Kelly R. (1996), "Robust Asymptotically Stable Visual Servoing of Planar Robots," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 12, no. 5, pp. 759-766.
- Kelly R., R. Carelli, O. Nasisi, B. Kuchen and F. Reyes, (2000). "Stable Visual Servoing of Camera-in-Hand Robotic Systems," *IEEE Trans.Mechatronics*, Vol. 5, No. 1, pp. 39-48.
- Lin W., (1995). Feedback Stabilization of General Nonlinear Control System: A Passive System Approach. *Syst. Control Lett.*, Vol.25, 41-52.
- Maruyama A. and M. Fujita, (1998). "Robust Control for Planar Manipulators with Image Feature Parameter Potential," *Advanced Robotics*, Vol. 12, No. 1, pp. 67-80.
- Ortega R., A.Loria, R. Kelly and L. Praly, (1995). On passivity based output feedback global stabilization of Euler-Lagrange systems, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Vol.5, 313-324.
- Papanikolopoulos, N. P., P. K. Khosla and T. Kanade, (1993), "Visual Tracking of a Moving Target by a Camera Mounted on a Robot: A Combination of Control and Vision", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 1.
- Sanderson A. C., L. E. Weiss, and C. P. Neumann, (1987). Dynamic sensor based control of robots with visual feedback. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 3:404-417.
- Van der Schaft A. (2000), *L2-Gain and Passivity Techniques in Nonlinear Control*, Springer-Verlag, 2000.
- Vidyasagar M., (1979). New passivity-type criteria for large-scale interconnected systems. *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol.24, pp.575-579.
- Weiss L. E., A. Sanderson, P. Neuman, (1987). "Dynamic Sensor-based Control of Robots With Visual Feedback", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 3, No. 9, pp. 404-417.
- Willems J. C., (1972a). Dissipative dynamical systems part I: General theory. *Arch. Ration. Mech. Anal.*, vol.45, pp. 325-351.
- Willems J. C., (1972b). Dissipative dynamical systems part II: Linear systems with quadratic supply rates, *Arch. Ration. Mech. Anal.*, vol.45, pp. 352-393.
- Wilson W. J., C. C. Williams Hulls, and G. S. Bell, (1996). Relative end-effector control using cartesian position based visual servoing. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 12(5):684-696.