

# CONTROLADOR CON RETROALIMENTACIÓN VISUAL PARA BRAZO ROBOT

JAIME CID y FERNANDO REYES

*Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Centro  
Universitario de Vinculación-VIEP, Grupo de Robótica,  
Facultad de Ciencias de la Electrónica MÉXICO  
e-mail:jaimе.cid@correo.buap.mx, freyes@ece.buap.mx*

## RESUMEN

Este trabajo presenta una nueva familia de controladores con retroalimentación visual en la configuración cámara fija para un robot manipulador planar. Se propone un esquema de control visual-servoing con base en posición, empleando la dinámica completa del robot y el modelo de visión, se demuestra la estabilidad asintótica global del punto de equilibrio utilizando la ecuación en lazo cerrado. Se presentan resultados experimentales en un robot manipulador de dos grados de libertad utilizando motores de transmisión directa.

**Palabras Claves:** Retroalimentación visual, control, robot manipulador, transmisión directa, función de Lyapunov, estabilidad asintótica global, cámara fija.

## 1. INTRODUCCIÓN

El problema del posicionamiento de los robots manipuladores que usan la información visual ha sido una área de investigación en los últimos 30 años. Visual servoing hace referencia a un sistema en lazo cerrado para el control de posición del extremo final de un robot usando directamente la retroalimentación visual [1]. Este término se introdujo por Hill y Park [2] en 1979. Representa una solución atractiva para posicionar y mover robots manipuladores autónomos que evolucionan en los ambientes no estructurados.

En visual servoing de Weiss [3] y William [4] ha clasificado dos clases de control en base a visión para el robot: el de retroalimentación visual basada en posición y el de imagen. Dentro de las características de este último se extrae las características principales de la imagen y se estima la posición del blanco con respecto a la cámara. Usando estos valores, se crea una señal de error entre la posición actual y la posición deseada del robot dentro del espacio de trabajo; mientras la última señal de error es definida directamente por los rasgos principales de la imagen para controlar el extremo final del robot. En ambas clases de métodos, se trazan los puntos del objeto hacia el plano de imagen de la cámara y de éstos puntos, por ejemplo una clase particularmente útil de rasgos de la imagen es el centroide usados para el control del robot [3] – [4] – [5].

Una apreciación global excelente de los problemas principales en visual servoing en el control de robots manipuladores se da en Corke [6]. Sin embargo, pocos estudios resultan ser rigurosos, donde incorporen la dinámica no lineal del robot en su contenido. La primera solución explícita al problema formulada en una publicación es debida a Miyazaki y Masutani en 1990, donde el esquema de control para entregar acciones acotadas se basa en un nuevo algoritmo de control mediante retroalimentación visual, utilizando la filosofía del Jacobiano transpuesto introducida por Takegaki y Arimoto [7]. Kelly se orienta al estudio de visual servoing de los robots manipuladores planares bajo la configuración cámara-fija en [13]. Malis en 1999 propuso un nuevo acercamiento al control del

robot basado en visión, llamó 2-1/2-D servoing visuales [8]. El problema de visual servoing se orienta a acoplar la teoría de control no lineal del robot con una representación conveniente de la información visual usada por el robot Conticelli [9] en 1999.

Park y Lee (2003) presentan un control por retroalimentación visual para una pelota en un plato para rastrear su trayectoria deseada en [10]. Kelly proponen un nuevo acercamiento, se dirige en el campo de la aplicación del control en la velocidad, utilizando la retroalimentación visual en la configuración cámara-fija para el robot manipulador en [5]. Schramm presentan una nueva aproximación a la retroalimentación visual, apunta a un controlador llamado extendido-2D (E2D) las coordenadas de los puntos que constituyen un blanco rastreado y proporciona los resultados de la simulación en [17]. Malis y Benhimane (2005) el presentan un sistema genérico y flexible para el control del robot basado en visión, el sistema integra el rastreo visual y la retroalimentación visual se acerca a un cuadro de trabajo (framework) unificado [11].

## 2. MODELO DEL SISTEMA ROBÓTICO

El sistema robótico considerado en este trabajo está compuesto por un robot de transmisión directa y una cámara-CCD puesta en el área de trabajo del robot en la configuración cámara-fija.

### 2.1 Dinámica del Robot

El modelo dinámico de un robot manipulador juega un papel importante para la simulación de movimiento, el análisis de estructuras del manipulador y el diseño de los algoritmos de control. La ecuación dinámica de  $n$  grados de libertad de robot está basada en la metodología de Euler-Lagrange [12], que viene dada por

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

donde  $\mathbf{q}$  es el vector de posiciones articulares de  $n \times 1$ ,  $\dot{\mathbf{q}}$  es el vector de velocidades articulares de  $n \times 1$ ,  $\boldsymbol{\tau}$  es el vector torques aplicado de  $n \times 1$ ,  $M(\mathbf{q})$  es la matriz de inercia de manipulador definida positiva simétrica de  $n \times n$ ,  $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  es el matriz de fuerzas centrífugas y de coriolis de  $n \times n$ , y  $g(\mathbf{q})$  es el vector de pares gravitacionales de  $n \times 1$ .

Se asume que los eslabones del robot se unen a través de las articulaciones de rotación. Aunque la ecuación de movimiento (1) es compleja, tiene

varias propiedades fundamentales que pueden explotarse para facilitar el diseño del sistema de control. Para el nuevo esquema de control es importante utilizar la siguiente propiedad:

**Propiedad 1.** La matriz  $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  y la derivada de la matriz de inercia con respecto al tiempo  $\dot{M}(\mathbf{q})$  satisface [12]:

$$\dot{\mathbf{q}}^T \left[ \frac{1}{2} \dot{M}(\mathbf{q}) - C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \right] \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0} \quad \forall \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^n. \quad (2)$$

### 2.2 Modelo cinemático directo

La cinemática directa es una función vectorial que describe la relación entre la posición articular de  $\mathbf{q}$  con las coordenadas cartesianas de  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$  donde  $n$  es el número de grados de libertad, y  $m$  representa la dimensión del marco de la coordenadas cartesianas.

La posición  $x_R \in \mathbb{R}^3$  del dispositivo final del robot con respecto al marco de coordenadas se da en términos de las posiciones articulares es decir:  $x_R = f(\mathbf{q})$ .

### 2.3 Modelo de visión

El objetivo de una máquina de visión es crear un modelo del mundo real a partir de las imágenes. Una máquina con sistema de visión recupera la información útil sobre una escena de sus proyecciones bidimensionales. Las imágenes son proyecciones bidimensionales del mundo tridimensional. Esta recuperación requiere la inversión de muchos datos en un plano (vea la Figura 1).

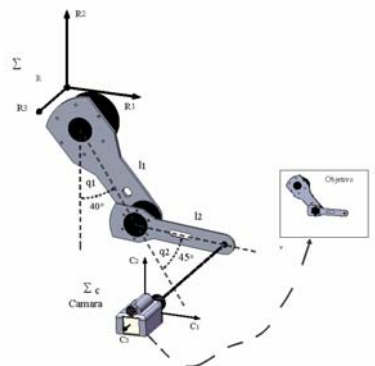


Fig. 1. Configuración cámara-fija.

Considérese un sistema coordenado cartesiano  $\Sigma_R = \{R_1, R_2, R_3\}$  puesto en la base del robot. Donde los ejes  $R_1$  y  $R_2$  representan el área de trabajo del robot. También se tiene un sistema coordenado cartesiano  $\Sigma_E = \{E_1, E_2, E_3\}$  presente en el extremo final del robot cuyo origen es determinado por la cinemática directa  $x_R$ .

La cámara-CCD tiene asociado un sistema de referencia el cuál se denota por  $\Sigma_C = \{C_1, C_2, C_3\}$  cuyo origen se localiza en la intersección formada por el eje óptico y el centro de la lente  $\Sigma_C$ . Las coordenadas de un punto con respecto a este sistema de referencia se expresa como  $x_C$ . La localización relativa entre los sistemas de referencia del robot  $\Sigma_R$  y el sistema de la cámara  $\Sigma_C$  está representada por el vector  $\mathbf{o}_C = [o_{C_1}, o_{C_2}, o_{C_3}]^T$ .

Un objetivo (target) tiene un punto en el sistema cartesiano  $\Sigma_T = \{T_1, T_2, T_3\}$ , cuyo origen se referencia con respecto a su centro geométrico. La posición del marco del objeto con respecto a  $\Sigma_R$  se denota por el  $\mathbf{o}_T = [o_{T_1}, o_{T_2}, o_{T_3}]^T$ .

La escena adquirida por la cámara se proyecta en el CCD, la cual tiene asociado un sistema de referencia descrito por  $\Sigma_I = \{I_1, I_2\}$ , cuyo origen se encuentra en el centro geométrico del CCD. Los ejes  $I_1$  e  $I_2$  son paralelos y apuntan en la misma dirección de los ejes  $C_1$  y  $C_2$  respectivamente. Para obtener las coordenadas de la imagen en el plano del CCD es necesario obtener una transformación de perspectiva. La imagen de la escena sobre el CCD es digitalizada y transferida hacia la pantalla de la computadora, y se define un nuevo sistema coordenado bidimensional  $\Sigma_D = \{u, v\}$ , cuyo origen se ubica en la esquina superior izquierda del monitor. Por consiguiente el sistema de visión completo, para la configuración cámara fija, expresa las coordenadas de la imagen en píxeles. Por consiguiente el modelo del sistema de visión es descrito por:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{\lambda}{\lambda + x_{C_3}} \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 \\ 0 & -\alpha_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{C_1} \\ x_{C_2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} x_{C_1} \\ x_{C_2} \\ x_{C_3} \end{bmatrix} = R^T(\theta) [x_R - o_R^c] \quad (4)$$

donde  $\alpha_u > 0$ ,  $\alpha_v > 0$  son los factores de escalamiento en pixels/m,  $\lambda > 0$  es la distancia focal de la cámara y  $\frac{\lambda}{\lambda + x_{C_3}} < 0$ .

## 2.4 Esquema de visual servoing con base en posición para la configuración de cámara-fija

En esta sección, se presenta el análisis de estabilidad para el esquema de visual servoing basado en posición. La tarea del robot se especifica en el plano de la imagen por lo que se refiere a valores de las características principales de la imagen que corresponden al robot y a las posiciones del objeto. Se asume que el blanco reside en el plano  $R_1 - R_2$ , que se muestra en la Figura 1. Su descripción respecto al marco de referencia  $\Sigma_D$  de la imagen de la computadora (pantalla) es  $[u_d \ v_d]^T$  y es denominado vector de rasgos característicos de la imagen deseada. El

desplazamiento articular deseado  $\mathbf{q}_d$  se estima de la cinemática inversa en función de  $[u_d \ v_d]^T$ .

El problema del control mediante retroalimentación visual para la configuración cámara fija, consiste en diseñar una ley de control para calcular los pares aplicados  $\boldsymbol{\tau}$  de tal forma que las características o rasgos distintivos de la imagen  $[u \ v]^T$  correspondiente al punto que se dan con las coordenadas del centroide de un disco negro colocado en el extremo final del robot, alcance el punto u objetivo deseado en el plano de la imagen  $[u_d \ v_d]^T$ . El error de imagen es definido como  $\begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d - u \\ v_d - v \end{bmatrix}$  por lo tanto, el objetivo de control es garantizar que el  $\lim_{t \rightarrow \infty} [\tilde{q}_1 \ \tilde{q}_2]^T = [q_{d1} - q_1 \ q_{d2} - q_2]^T \rightarrow 0$  al menos para las condiciones iniciales  $[\tilde{q}_1(0) \ \tilde{q}_2(0)]^T$  y que  $\dot{\mathbf{q}}$  sea suficientemente pequeña. Es decir asegurar que el error de los rasgos característicos de la imagen, la diferencia entre la posición actual del efector final expresada en píxeles  $[uv]^T$  y la posición deseada también en píxeles  $[u_d v_d]^T$ , tienda a cero cuando el tiempo evolucione.

$$\begin{bmatrix} u_d \\ v_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_u \lambda}{\lambda + x_{C_3}} & 0 \\ 0 & \frac{-\alpha_v \lambda}{\lambda + x_{C_3}} \end{bmatrix} R(\theta)^T \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} x_{R_1}(q_d) \\ x_{R_2}(q_d) \end{bmatrix} \\ - \begin{bmatrix} o_{R_1}^c \\ o_{R_2}^c \end{bmatrix} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Para resolver el problema de control con retroalimentación, se presenta el siguiente esquema de control con compensación de gravedad:

$$\boldsymbol{\tau} = \nabla v_a(k_p, \tilde{\mathbf{q}}) - f_v(k_v, \dot{\mathbf{q}}) + g(\mathbf{q}) \quad (6)$$

dónde  $\tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q} \in \mathbb{R}^n$  es el vector de error de la posiciones articulares,  $\mathbf{q}_d \in \mathbb{R}^n$  es el vector de las posiciones articulares deseadas.

$K_p \in \mathbb{R}^{n \times n}$  es una matriz diagonal llamada ganancia proporcional,  $K_v \in \mathbb{R}^{n \times n}$  es una matriz definida positiva también llamada la ganancia derivativa,  $\nabla v_a(k_p, \tilde{\mathbf{q}})$  representa la energía potencial artificial, y es una función definida positiva, y  $f_v(k_v, \dot{\mathbf{q}})$  denota una función disipativa decreciente, es decir,  $\dot{\mathbf{q}}^T f_v(k_v, \dot{\mathbf{q}}) > 0$ .

**Proposición.** Considere el modelo dinámico del robot (1) junto con la ley de control (6), entonces el sistema de lazo cerrado es asintóticamente estable localmente y el posicionamiento visual que apunta  $\lim_{t \rightarrow \infty} [\tilde{q}_1(t) \ \tilde{q}_2(t)]^T = \mathbf{0} \in \mathbb{R}^2$  se logra.

**Prueba:** La ecuación del sistema en lazo cerrado se obtiene combinando el modelo dinámico del robot (1) y esquema de control (6) puede escribirse como

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{q}} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{\mathbf{q}} \\ M(\mathbf{q})^{-1} \left[ \nabla v_a(\mathbf{k}_p, \tilde{\mathbf{q}}) - \mathbf{f}_v(\mathbf{k}_v, \dot{\mathbf{q}}) \right] \\ -C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix}$$

que es una ecuación del diferencial autónoma, y el origen del espacio de estado es un punto de equilibrio. Para llevar a cabo el análisis de estabilidad de la ecuación (7), se propone la siguiente función candidata de Lyapunov:

$$V(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}) = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T M(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} + v_a(\mathbf{k}_p, \tilde{\mathbf{q}}). \quad (8)$$

El primer término de  $V(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}})$  es una función definida positiva con respecto a  $\dot{\mathbf{q}}$  porque  $M(\mathbf{q})$  es una matriz definida positiva. El segundo término de la función candidata de Lyapunov (8), puede interpretarse como una energía potencial inducida por la ley de control, también es una función definida positiva con respecto al error de la posición  $\tilde{\mathbf{q}}$ , porque el término  $\mathbf{k}_p$  es una matriz definida positiva. Por consiguiente,  $V(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}})$  es definida positiva y la función es radialmente ilimitada. Se encuentra la derivada con respecto al tiempo de la función candidata de Lyapunov (8) a lo largo de las trayectorias de la ecuación en lazo cerrado (7), después de alguna álgebra y considerado propiedad 1, puede escribirse como:

$$\begin{aligned} \dot{V}(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}) &= \dot{\mathbf{q}}^T M(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} - \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \dot{M}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} - \nabla v_a(\mathbf{k}_p, \tilde{\mathbf{q}})^T \dot{\mathbf{q}} \\ &= \dot{\mathbf{q}}^T \nabla v_a(\mathbf{k}_p, \tilde{\mathbf{q}}) - \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{f}_v(\mathbf{k}_v, \dot{\mathbf{q}}) - C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} \\ &\quad + \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \dot{M}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} - \nabla v_a(\mathbf{k}_p, \tilde{\mathbf{q}})^T \dot{\mathbf{q}} \\ &= -\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{f}_v(\mathbf{k}_v, \dot{\mathbf{q}}) \leq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

que es una función semidefinida negativa y por consiguiente es posible concluir estabilidad del punto de equilibrio. Para demostrar la estabilidad asintótica local, la naturaleza autónoma de la ecuación en lazo cerrado (7) se explota para aplicar el principio de invarianza de LaSalle's [14] en la región  $\Omega$ :

$$\Omega = \left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{q}}_1 \\ \tilde{\mathbf{q}}_2 \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2n} : \dot{V}(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}) = 0 \\ \tilde{\mathbf{q}} = 0 \in \mathbb{R}^n, \dot{\mathbf{q}} = 0 \in \mathbb{R}^n : \dot{V}(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}) = 0 \end{array} \right\} \quad (10)$$

desde que  $\dot{V}(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}) \leq 0 \in \Omega$ ,  $V(\tilde{\mathbf{q}}(t), \dot{\mathbf{q}}(t))$  es una función decreciente de  $t$ .  $V(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}})$  es continua en  $\Omega$  fijo compacto, se limita debajo en  $\Omega$ . por ejemplo satisface  $0 \leq V(\tilde{\mathbf{q}}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) \leq V(\tilde{\mathbf{q}}(0), \dot{\mathbf{q}}(0))$ . Por consiguiente, la solución trivial es la única solución del sistema en lazo cerrado (7) restringió a  $\Omega$ , entonces se concluye que el origen del espacio de estado es localmente estable asintóticamente.

## 2.5 Ejemplos de aplicación

El propósito de esta sección es aprovecharse de la metodología descrita para derivar los nuevos reguladores. Se presentan esquemas de control con compensación de gravedad:

$$\tau = K_p \tanh \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{q}}_1 \\ \tilde{\mathbf{q}}_2 \end{bmatrix} + K_v \tanh \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_1 \\ \dot{\mathbf{q}}_2 \end{bmatrix} + g(\mathbf{q}) \quad (11)$$

**Prueba:** La ecuación del sistema de lazo cerrado obtenida combinando el modelo dinámico de robot (1) y el esquema de control (11) puede escribirse como

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{q}} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{\mathbf{q}} \\ M(\mathbf{q})^{-1} \left[ \mathbf{k}_p \tanh(\tilde{\mathbf{q}}) - \mathbf{k}_v \tanh(\dot{\mathbf{q}}) \right] - C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

que es una ecuación del diferencial autónoma, y el origen del espacio de estado es un punto de equilibrio. Para llevar a cabo el análisis de estabilidad de la ecuación (12), se propone la siguiente función candidata de Lyapunov

$$V(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}) = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T M(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} + \sqrt{\ln \left( \cosh \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{q}}_1 \\ \tilde{\mathbf{q}}_2 \end{bmatrix} \right)^T} K_p \sqrt{\ln \left( \cosh \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{q}}_1 \\ \tilde{\mathbf{q}}_2 \end{bmatrix} \right)} \quad (13)$$

El primer término de  $V(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}})$  es una función definida positiva con respecto a  $\dot{\mathbf{q}}$  porque  $M(\mathbf{q})$  es una matriz definida positiva. El segundo término de la función candidata de Lyapunov (13), puede interpretarse como una energía potencial inducida por la ley de control, también es una función definida positiva con respecto al error de la posición  $\tilde{\mathbf{q}}$ , porque el término  $\mathbf{k}_p$  es una matriz definida positiva. Por consiguiente,  $V(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}})$  es definida positiva y la función es radialmente ilimitada. Se encuentra la derivada con respecto al tiempo de la función candidata de Lyapunov (13) a lo largo de las trayectorias de la ecuación en lazo cerrado (12), después de alguna álgebra y considerado propiedad 1, puede escribirse como:

$$\begin{aligned} \dot{V}(\tilde{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}) &= \dot{\mathbf{q}}^T M(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} - \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \dot{M}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{K}_p \tanh \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{q}}_1 \\ \tilde{\mathbf{q}}_2 \end{bmatrix} \\ &= \dot{\mathbf{q}}^T \tanh \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{q}}_1 \\ \tilde{\mathbf{q}}_2 \end{bmatrix} - \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{K}_v \tanh \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{q}}_1 \\ \tilde{\mathbf{q}}_2 \end{bmatrix} \\ &\quad - C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \dot{M}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{K}_p \tanh \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{q}}_1 \\ \tilde{\mathbf{q}}_2 \end{bmatrix} \\ &= -\dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{K}_v \tanh \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_1 \\ \dot{\mathbf{q}}_2 \end{bmatrix} \leq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Segundo ejemplo para propósito de la metodología:

$$\tau = K_p \arctan \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{q}}_1 \\ \tilde{\mathbf{q}}_2 \end{bmatrix} - K_v \arctan \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_1 \\ \dot{\mathbf{q}}_2 \end{bmatrix} + g(\mathbf{q}). \quad (15)$$

## 3. PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Se utilizó como plataforma experimental y de investigación de los algoritmos de control un robot manipulador diseñado y construido en

la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México; es un robot de dos grados de libertad (ver la Figura 2). Se listan los motores usados en el robot en la tabla 1. Los servos trabajan en el modo torque, para que los motores actúen como una fuente de torque, ellos aceptan un voltaje analógico como una referencia para enviar la señal de torque. El área de trabajo del manipulador es un círculo con un radio de 0.7 m.

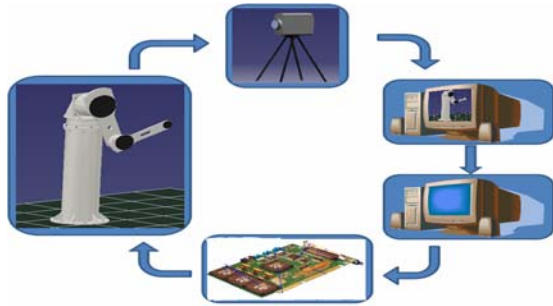


Fig. 2. Robot experimental.

Eslabón	Modelo	Torque	p/rev
Hombro	DM1050A	50	1,024,000
Codo	DM1004C	4	1,024,000

Table 1: Servo actuadores del robot experimental.

Con la referencia del robot de transmisión directa, se requiere el torque gravitacional para implementar el nuevo esquema de control (6) que está disponible en [8]:

$$g(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} 38.46 \sin(q_1) + 1.82 \sin(q_1 + q_2) \\ 1.82 \sin(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \text{ [Nm].} \quad (16)$$

#### 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para apoyar los desarrollos teóricos, en esta sección se presentan los resultados experimentales de los controladores propuestos en el robot planar con la configuración del cámara-fija.

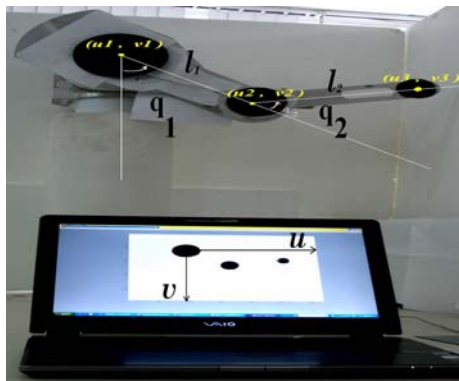


Fig. 3. Robot manipulador y el sistema de visión

Tres discos negros están montados en las articulaciones. Un disco negro grande para el

hombro, un disco negro mediano en el codo, y uno pequeño para el extremo final. Las coordenadas de las articulaciones se estimaron en base al centroide de cada disco y utilizando la cinemática inversa como es muestra en la Figura (3):

$$l_1 = \sqrt{(u_2 - u_1)^2 + (v_2 - v_1)^2} \quad (17)$$

$$l_2 = \sqrt{(u_3 - u_2)^2 + (v_3 - v_2)^2} \quad (18)$$

y

$$q_2 = \arccos \left( \frac{(u_3 - u_2)^2 + (v_3 - v_2)^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \right) \quad (19)$$

$$q_1 = \left( \frac{\pi}{2} \right) - \text{atan} \left( \frac{v_2 - v_1}{u_2 - u_1} \right) - \text{atan} \left( \frac{l_2 \sin(q_2)}{l_1 + l_2 \cos(q_2)} \right) \quad (20)$$

donde  $l_1$ ,  $l_2$  representan la longitud de los eslabones 1 y 2 respectivamente,  $u$  y  $v$  son los ejes de la información visual. Para encontrar la ecuación (19) y (20) se utiliza la figura 3.

Se seleccionaron los centroides de cada disco como los puntos característicos del objeto. En todos los controladores se seleccionaron como la posición deseada en el plano de la imagen a  $[u_d \ v_d]^T = [198 \ 107]^T$  [pixels] y la posición inicial  $[u(0) \ v(0)]^T = [50 \ 210]^T$  [pixels], esto es  $q_1(0), q_2(0) = [0 \ 0]^T$  y  $\dot{\mathbf{q}}(0) = \mathbf{0}$  [grados/seg]. Los controladores evaluados han sido escritos en el lenguaje C. El tiempo de muestreo se ejecutó a 2.5 mseg., mientras la retroalimentación visual estaba en 33 mseg. La cámara de CCD se puso frente al robot y su posición con respecto al marco del robot  $\Sigma_R$  fue  $O_c^R = [0_{c_1}^R, 0_{c_2}^R, 0_{c_3}^R]^T = [-0.5, -0.6, -1]^T$  metros, el ángulo de la rotación  $\theta = 0$  grados. Se trabajo MATLAB utilizando el módulo de SIMULINK para procesar la imagen. La señal de video de la cámara-CCD tiene una resolución de 320x240 pixeles en el formato de RGB.

Las Figuras 4 y 5 muestran los resultados experimentales del controlador (11), las ganancias proporcionales y derivativas se seleccionaron con estos valores  $\mathbf{K}_p = \text{diag}\{26.0, 1.8\}$  [N],  $\mathbf{K}_v = \text{diag}\{12.0, 1.2\}$  [Nm]. respectivamente y  $\mathbf{u}_d = 198$  y  $\mathbf{v}_d = 107$ . La respuesta transitoria es rápida y estaba alrededor de 3 seg. El error de posición es pequeño y tiende a cero asintóticamente.

Los resultados experimentales para el controlador (11) se muestran en las Figuras 4 y 5. La respuesta transitoria estaba alrededor de los 3 segundos. Los componentes del error tienden asintóticamente.

Las Figuras 6 y 7 muestran los resultados experimentales del controlador (15), las ganancias proporcionales y derivativas se seleccionaron con estos valores  $\mathbf{K}_p = \text{diag}\{17.3, 1.2\}$  [N],  $\mathbf{K}_v = \text{diag}\{6.0, 1.2\}$  [Nm]. respectivamente y  $\mathbf{u}_d =$

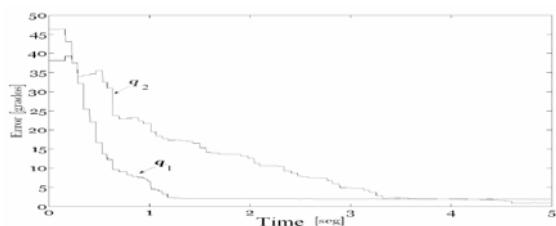


Fig. 4. Error para el controlador (11).

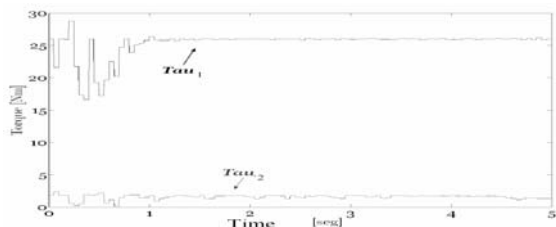


Fig. 5. Torque para el controlador tanh

198 y  $v_d = 107$ . La respuesta transitoria es rápida y estaba alrededor de 1 seg. El error de posición es pequeño y tiende a cero asintóticamente.

Los resultados experimentales para el controlador (15) se muestran en las Figuras 6 y 7. La respuesta transitoria estaba alrededor de 1 segundo. Los componentes del error de posición tienden asintóticamente.

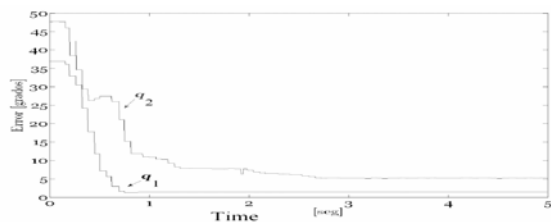


Fig. 6. Error para el controlador (15)

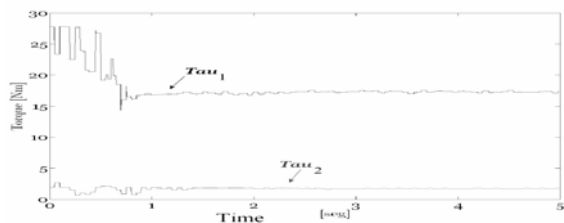


Fig. 7. Torque para el controlador atan.

## 5. CONCLUSIÓN

En este trabajo se presentó a una nueva familia de controladores para resolver visual servoing basado-posición para un robot manipulador planar en la configuración cámara-fija. Se pone énfasis en la dinámica no lineal del robot y el modelo de visión que han sido incluidos en el análisis de estabilidad. Se presentaron resultados experimentales con un robot de dos grados de

libertad que usan las características de tres puntos para ilustrar la actuación del esquema de control.

## Referencias:

- (1) Hutchinson S., G. D. Hager and P. I. Corke, A Tutorial on Visual Servo Control. IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 12, No. 5, October 1996, pp. 651-670.
- (2) Hill J. and W. T. Park, Real Time Control of a Robot with a Mobile Camera. in Proc. 9th ISIR, Washington, D.C., Mar. 1979, pp. 233-246.
- (3) Weiss L. E., A. C. Sanderson, and C. P. Neuman, Dynamic sensor-based control of robots with visual feedback. in IEEE Journal of Robot. Automat., vol. RA-3, pp. 404-417, Oct. 1987.
- (4) Wilson W. J., C. C. Williams, and Graham S. B. Relative End-Effector Control Using Cartesian Position Based Visual Servoing. IEEE Transactions on Robotics and Automation. vol. 12 No. 5, pp. 684-696. October 1996
- (5) Kelly R., P. Shirkey and M. W. Spong, Fixed-Camera Visual Servo Control for Planar Robots. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Minneapolis, Minnesota, April 1996, pp. 2643-2649..
- (6) Corke P. I. Visual Control of Robot Manipulators A review. Visual Servoing, K. Hashimoto, Ed. Singapore: World Scientific, pp. 1-31, 1993.
- (7) Takegaki M. and S. Arimoto, A New Feedback Method for Dynamic Control of Manipulators. ASME J. Dyn. Syst. Meas. Control, Vol. 103, 1981, pp. 119-125.
- (8) Malis E. and S. Benhimane, A Unified Approach to Visual Tracking and Servoing. Robotics and Autonomous Systems, Vol. 52, Issue 1, 31 July 2005, pp. 39-52.
- (9) Conticelli F. and B. Allotta, Nonlinear Controllability and Stability Analysis of Adaptive Image-Based Systems. IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 17, No. 2, 2001, pp. 208-214.
- (10) Park J. and Y.J. Lee, Robust Visual Servoing for Motion Control of the Ball on a Plate. Mechatronics, Vol. 13, Issue 7, September 2003, pp. 723-738.
- (11) Malis E. and P. Rives, Robustness of Image-based Visual Servoing with Respect to Depth Distribution Errors. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2003, pp. 1056-1061.
- (12) Spong M. W. and M. Vidyasagar, Robots Dynamics and Control. John Wiley & Sons, 1989.
- (13) Reyes F. and R. Kelly, Experimental Evaluation of Fixed-Camera Direct Visual Controllers on a Direct-Drive Robot. IEEE International Conference on Robotics & Automation. Leuven, Belgium, May 1998, pp. 2327-2332.
- (14) Khalil, H. K. (2002). Nonlinear Systems. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.
- (15) Chen J., A. Behal, D. Dawson and Y. Fang, 2.5D Visual Servoing with a Fixed Camera. American Control Conference. 2003, pp. 3442-3447.
- (16) Schramm F., G. Morel, A. Micaelli and A. Lottin, Extended-2D Visual Servoing. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2004, pp. 267-273.
- (17) Reyes F. and R. Kelly (1997). Experimental evaluation of identification schemes on a direct drive robot. Robotica, Cambridge University Press. Vol. 15, 563-571.