

Control de Robots

Manipuladores Mediante Retroalimentación Visual

Palma Asunción Adilene, Reyes Cortés Fernando, Cid Monjaraz Jaime, Vargas Treviño
Aurora y Vergara Limon Sergio.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla-Facultad de Electrónica.
Tel/Fax: +52 222 29 55 00 ext. 7410
MEXICO

Resumen

El presente artículo aborda el problema de control de robots manipuladores mediante información visual en el lazo de control (visual servoing). Se presenta un nuevo algoritmo de control para la configuración cámara fija y su evaluación experimental en un robot planar de 2 grados de libertad de transmisión directa. La implementación incluye programación para el procesamiento de imágenes (cálculo de los centroides) en MATLAB ver 2013a y comunicación puerto paralelo entre la computadora del robot y la de procesamiento de imágenes. El objetivo de control de posición consiste en llevar la proyección de la imagen del extremo final del robot en el monitor de la computadora hacia una posición deseada en pixeles, es decir, convergencia asintótica local hacia el punto de equilibrio del error de posición y de la velocidad de movimiento.

Palabras clave: visual servoing, robot manipulador de transmisión directa, control de posición, configuración cámara fija, retroalimentación.

1. Introducción

Visión por computadora es una técnica de imitar al sentido humano de la vista y medir cosas (posición del robot) sin contacto físico.

Las áreas que integran a la visión por computadora se encuentran el control de sistemas mecatrónicos usando información visual en el lazo de retroalimentación. De manera técnica ésta sub-área se le denominada visual servoing, que se define como la retroalimentación de la información visual para control de sistemas mecatrónicos.

Un subconjunto de la mecatrónica es la robótica, área multidisciplinaria que aborda la investigación, análisis, y diseño de una clase particular de sistemas mecánicos llamados robots

manipuladores, los cuales, representan retos teóricos debidos a su naturaleza multivariable, dinámica no lineal y acoplada. De acuerdo con la definición aceptada del Instituto de Robótica de América, un robot es un manipulador multifuncional reprogramable diseñado para mover materiales, partes, herramientas o dispositivos especializados a través de movimientos variables programados para el desempeño de una variedad de tareas [1].

Un componente importante de un sistema robótico de visión es la adquisición, procesamiento e interpretación de la información provista por los sensores. Esta información es utilizada para derivar las señales de control para manejar un robot. La información acerca del sistema y su ambiente puede obtenerse a través de una gran variedad de sensores tales como: posición, velocidad, fuerza, tacto y visión [2].

El control de posición enfocado a robot manipuladores tiene grandes aplicaciones tanto científicas, comerciales, industriales, domésticas y en medicina, adicionalmente también puede aplicarse a control cartesiano, control punto a punto y programación de instrucciones para robots industriales [3], entre otras.

2. Modelo del Robot Manipulador

Conocer el modelo matemático del robot manipulador, es específico con el robot que se usará de forma experimental, es de gran importancia conocerlo, ya que el modelo puede ser usado en las etapas de construcción mecánica, de esta manera el robot puede ser estudiado antes de ser construido, también, el diseño de control de sistemas de control son basados en el modelo matemático del robot manipulador, por último, el modelo matemático de igual forma nos permite la validación de los resultados en simulación del controlador diseñado [9].

2.1 Cinemática del robot y transformaciones homogéneas

La parte de la física que proporciona la descripción geométrica del movimiento de sistemas mecatrónicos sin importar las causas que lo producen, es hablar de cinemática [3]. El estudio de la cinemática de sistemas mecatrónicos y robots manipuladores se le denomina cinemática directa. Por consiguiente, la cinemática directa manifestada en un robot manipulador se refiere al estudio analítico del movimiento del robot, sin tomar en cuenta las causas que lo producen, con respecto a un sistema de referencia cartesiano fijo $\Sigma(x,y,z)$ relacionando la dependencia que existe entre las coordenadas articulares y las coordenadas cartesianas del extremo final del robot. Así el empleo de la cinemática directa resulta de utilidad en computar la posición y orientación del extremo final del robot manipulador como función de las variables articulares.

Para poder representar el posicionamiento de robots manipuladores se hace uso de sistemas de referencia asociado a cada uno de los motores del manipulador, los cuales especifican posición y orientación del extremo final. La transformación homogénea de un robot hace uso de matrices de rotación y traslación relacionadas a las coordenadas articulares y cartesianas de un robot manipulador, lo cual, estructura el modelo de cinemática directa.

2.2 Dinámica del robot

El modelo dinámico del robot manipulador permite explicar todos los fenómenos físicos que se encuentran en su estructura mecánica, tales como efectos inerciales, fuerzas centrípetas y de Coriolis, par gravitacional y fricción, los cuales son fenómenos físicos propios de la naturaleza dinámica del robot [8].

El modelo dinámico de un robot manipulador de n grados de libertad está dada por la ecuación (1), que en su forma compacta y con la notación usada en robótica. Donde $\mathbf{q} \in R^n$ es el vector de posiciones articulares, $\dot{\mathbf{q}} \in R^n$ es el vector de velocidades articulares, $\ddot{\mathbf{q}} \in R^n$ es el vector de aceleraciones articulares, $M(\mathbf{q}) \in R^{n \times n}$ es la matriz de inercia, la cual es simétrica y definida positiva, $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in R^{n \times n}$ es la matriz de fuerza centrípetas y de Coriolis, $\mathbf{g}(\mathbf{q}) \in R^n$ es el vector de fuerzas o pares gravitacionales debido a la acción de la gravedad, $\mathbf{f}_f(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{f}_e) \in R^n$ es el vector de pares de fricción que incluye la fricción viscosa, de Coulomb y estática (\mathbf{f}_e) de cada articulación del robot [3].

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

2.3 Modelo del sistema de visión

Las configuraciones que puede tener entre la cámara y el robot pueden ser clasificadas en la configuración cámara fija y cámara en mano. En este artículo se enfoca a la configuración cámara fija [4].

Considérese un sistema coordenado cartesiano $\Sigma_R = \{R_1, R_2, R_3\}$, que determinan la base 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 [5]. Asimismo se considera un sistema coordenado respecto a la posición de la cámara web $\Sigma_C = \{C_1, C_2, C_3\}$.

El robot experimental, se encuentra trabajando en los ejes R_1 y R_2 . La configuración cámara fija consiste en colocar la cámara fija con respecto al sistema Σ_R capturando imágenes del robot y de su medio ambiente. Ver figura 1.

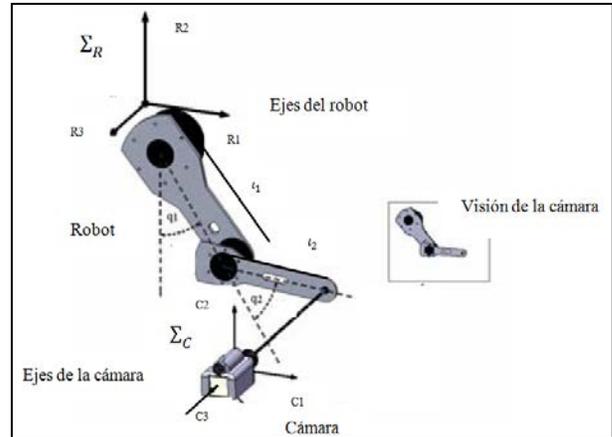


Figura 1: Configuración cámara fija.

Para la realización de un controlador con retroalimentación visual, el problema radica en determinar los pares aplicados $\boldsymbol{\tau}$ a las articulaciones del robot manipulador para que su extremo final se mueva en forma que la proyección de un objeto estático se encuentre en la posición deseada (u_d, v_d) sobre el plano de la imagen [6]. Hablando de control para la cámara fija consiste en encontrar los pares aplicados de tal forma que la proyección del extremo final alcance la posición deseada sobre el plano de imagen [7]. El error en píxeles de imagen es definido como lo muestra la ecuación (2).

$$\begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d - u \\ v_d - v \end{bmatrix} \quad (2)$$

De la ecuación (2), sacando el límite respecto al tiempo al infinito, tenemos que el vector de error de posición $[\tilde{u}, \tilde{v}]^T$, tiende a cero conforme el tiempo evoluciona, para los propósitos de posición de debe asegurar que el controlador llevará a un error cero.

Para el desarrollo del algoritmo de control, sea (3) el vector $[\dot{u}, \dot{v}]$ y la ecuación del control en (4) de la forma diferencial de primer orden.

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-\alpha_u \lambda}{\lambda + x_{c3}} & 0 \\ 0 & \frac{\alpha_v \lambda}{\lambda + x_{c3}} \end{bmatrix} R_R^{C^T} J(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (3)$$

Del modelo dinámico (1) y el esquema de control (3) se tienen que el sistema en lazo cerrado que se puede escribir como (4).

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{u} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{-\alpha_u \lambda}{\lambda + x_{c3}} & 0 \\ 0 & \frac{\alpha_v \lambda}{\lambda + x_{c3}} \end{bmatrix} R_R^{C^T} J(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \\ M(\mathbf{q})^{-1} \left[k_p \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \frac{1 + [\tilde{u}]^2}{\tilde{v}} \end{bmatrix} - k_p \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \sqrt{1 + \tilde{q}^2} \end{bmatrix} - C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} - B(\dot{\mathbf{q}}) \right] \end{bmatrix} \quad (4)$$

Para llevar a cabo la prueba de estabilidad de (4) se debe proponer una función candidata [3]. Si el determinante del Jacobiano $J(\mathbf{q})$ del robot es cero, entonces se dice que no es de rango completo y presenta problemas de singularidades [3]. Para la prueba del $J(\mathbf{q})$, La prueba inicia bajo la hipótesis de que $J(\mathbf{q})$, es de rango completo por lo tanto, realizando las pruebas se tiene (5) se cumple sí sólo sí (6) se cumple, por lo tanto (7) se cumple y K_p y K_v son matrices definidas positivas con (7) es un vector de dimensiones \mathbb{R}^2 .

$$\begin{bmatrix} \frac{-\alpha_u \lambda}{\lambda + x_{c3}} & 0 \\ 0 & \frac{\alpha_v \lambda}{\lambda + x_{c3}} \end{bmatrix} R_R^{C^T} J(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} = 0 \quad (5)$$

$$\dot{\mathbf{q}} = 0 \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

Así se define a Λ como una matriz diagonal simétrica definida positiva perteneciente a $\mathbb{R}^{2 \times 2}$. Por lo tanto, (8) existe y describe Λ^{-1} .

$$\Lambda^{-1} = J^T(\mathbf{q}) R_R^C(\theta) \begin{bmatrix} \frac{-\alpha_u \lambda}{\lambda + x_{c3}} & 0 \\ 0 & \frac{\alpha_v \lambda}{\lambda + x_{c3}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Si la función de Lyapunov es semidefinida positiva es posible demostrar estabilidad, es decir, si una función es continua y diferenciable, definida sobre un conjunto invariante con respecto al sistema dinámico (4), puede ser construida de forma que sus derivadas a lo largo de las trayectorias del sistema son semidefinidas negativas y ninguna trayectoria del sistema puede permanecer indefinidamente en puntos donde las derivadas de la función se desvanecen, entonces el punto de equilibrio es asintóticamente estable [3]. Así empleando el teorema de LaSalle se demuestra estabilidad asintótica.

2.4 Algoritmo del controlador visual

Para este controlador para sistemas robóticos cámara fija basados en la metodología de diseño de Jacobiano analítico transpuesto. Se emplea el modelo de visión en configuración cámara fija descrito en la ecuación (9), donde λ es la distancia focal de la cámara y α_u y α_v son factores de escalamiento en pixeles. En O_R^C está determinado por (10), donde (10) determina la posición de la cámara donde los ejes son $R_3 || C_3$ son paralelos con una ligera rotación de 2grados en θ , los ejes de los sistemas coordenadas del robot a la cámara $R_1 || C_1$ y $R_2 || C_2$ también son paralelos respecto a $C_1 - C_2 || l_1 - l_2$, donde la cámara tiene alineación óptica con respecto al plano del centro de la cámara.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha_u & 0 \\ 0 & \alpha_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\lambda}{\lambda + x_{c3}} & 0 \\ 0 & \frac{\lambda}{\lambda + x_{c3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_R^{C^T}(\theta) [f(\mathbf{q}) - O_R^C] + \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$O_R^C = \begin{bmatrix} O_{R1}^C \\ O_{R2}^C \\ O_{R3}^C \end{bmatrix} \quad (10)$$

La cinemática directa empleada en el algoritmo de control es mostrada por (11) donde se muestran las matrices de rotación para el robot experimental.

$$f(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} l_1 \sin(q_1) - l_2 \sin(q_1 + q_2) \\ -l_1 \cos(q_1) - l_2 \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \quad (11)$$

Por lo tanto el modelo de (1) nos queda como se muestra en (12).

$$\tau = K_p \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \frac{1 + [\tilde{u}]^2}{\tilde{v}} \end{bmatrix} - K_p \left[\frac{\tilde{q}}{\sqrt{1 + \tilde{q}^2}} + g(\mathbf{q}) \right] \quad (12)$$

En (13) se describe la forma matemática llevando a una ecuación ordinaria de primer orden usando representación en variables de estado:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ \dot{\tilde{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ M(q)^{-1} \left[K_p \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \sqrt{1+|\tilde{u}^2|} \\ \tilde{v} \\ \sqrt{1+|\tilde{v}^2|} \end{bmatrix} - K_v \begin{bmatrix} \dot{\tilde{q}} \\ \sqrt{1+\dot{\tilde{q}}^2} \end{bmatrix} - C(q, \dot{q})\dot{q} - B(q) \right] \end{bmatrix} \quad (13)$$

Aplicando el método de Lyapunov [3], proponemos una función candidata Lyapunov (14)(15), donde $V(\dot{q}, \tilde{u}, \tilde{v})$ es una función definida positiva, su $\frac{\partial V(\dot{q}, \tilde{u}, \tilde{v})}{\partial(\dot{q}, \tilde{u}, \tilde{v})}$ es una función continua con respecto a $\dot{q}, \tilde{u}, \tilde{v}$ y la derivada con respecto al tiempo existe y es continua con respecto a $\dot{q}, \tilde{u}, \tilde{v}$. La función de Lyapunov es importante debido a que su estructura matemática permite demostrar las propiedades de estabilidad asintótica [3].

$$V(\dot{q}, \tilde{u}, \tilde{v}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{M}(q) \dot{q} - \psi \quad (14)$$

$$\psi = 2 \begin{bmatrix} \sqrt{\tilde{u}^2 + 1} - 1 \\ \sqrt{\tilde{v}^2 + 1} - 1 \end{bmatrix}^T k_p \Lambda^{-1} \begin{bmatrix} \sqrt{\tilde{u}^2 + 1} - 1 \\ \sqrt{\tilde{v}^2 + 1} - 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Para la derivada con respecto al tiempo de $V(\dot{q}, \tilde{u}, \tilde{v})$ debe ser una función definida negativa definida en (16) por propiedades de la función candidata Lyapunov [3], así (17) muestra la ecuación completa y en (18) se concluye que $\dot{V}(\dot{q}, \tilde{u}, \tilde{v})$ es semidefinida negativa.

$$\dot{V}(\dot{q}, \tilde{u}, \tilde{v}) = \frac{\partial V(\dot{q}, \tilde{u}, \tilde{v})}{\partial(\dot{q}, \tilde{u}, \tilde{v})} \dot{\mathbf{q}} \quad (16)$$

$$\dot{V}(\dot{q}, \tilde{u}, \tilde{v}) = \dot{q}^T K_p \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \sqrt{1+|\tilde{u}^2|} \\ \tilde{v} \\ \sqrt{1+|\tilde{v}^2|} \end{bmatrix} - \dot{q}^T K_v \dot{q} - \dot{q}^T B \dot{q} - \dot{q}^T C(q, \dot{q}) \dot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{M}(q) \dot{q} \quad (17)$$

$$\dot{V}(\dot{q}, \tilde{u}, \tilde{v}) = -\dot{q}^T K_v \dot{q} - \dot{q}^T B \dot{q} \leq 0 \quad (18)$$

Debido a la naturaleza de la ecuación diferencial es autónoma y por lo tanto posibilita el análisis asintótico mediante el principio de invariancia de Lasalle en la región Ω . Por lo tanto se define la región expresada en (19).

$$\Omega = \left\{ \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^2 \text{ con } \dot{\mathbf{q}} = 0 \text{ tal que: } \dot{V}(\dot{q}, \tilde{u}, \tilde{v}) = 0 \right. \\ \left. \Leftrightarrow \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0} \in \mathbb{R}^2 \right\} \quad (19)$$

Entonces (20) concluye es teorema de Lasalle y se concluye estabilidad asintótica local del punto de equilibrio.

$$\Omega = \left\{ \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^2 \text{ con } \dot{\mathbf{q}} = 0 \text{ tal que: } \dot{V}(\dot{q}, \tilde{u}, \tilde{v}) = 0 \right. \\ \left. \Leftrightarrow \dot{\mathbf{q}} = 0, \tilde{u} = 0, \tilde{v} = 0 \right\} \quad (20)$$

El controlador tiene propiedades de robustez frente a incertidumbre en el valor del parámetro θ , es decir [7]. Donde θ_e es una aproximación del ángulo θ , k_{p1} y k_{p2} son las ganancias proporcionales de la articulación del hombro y codo respectivamente. (21).

$$|\theta_e - \theta| \leq \cos^{-1} \left\{ \frac{k_{p1} - k_{p2}}{k_{p1} + k_{p2}} \right\} \quad (21)$$

2.5 Robot y Cámara Experimental

El experimento del sistema fue realizado en un robot de transmisión directa llamado "Rotradi" de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Este está construido de Aluminio. Ver figura 2.



Figura 2. Robot experimental "Rotradi"

Las características de los servo actuadores del robot manipulador se describen en la tabla 1.

Tabla 1. Características de los servo actuadores del robot manipulador experimental

Parte del robot manipulador	Modelo del Servo actuador	Torque Máximo	Ciclo por revolución
Base	DM-1050	50	1,024,000
Codo	DM-1150A	150	1,024,000
Hombro	DM-1015B	15	1,024,000

Los algoritmos de control están escritos en código C y se ejecutan en tiempo real con un período de muestreo de 2,5 ms en un Pentium-1 a 166MHz.

Para la captación de imágenes emplea una cámara web marca Acteck, modelo ATW-750.

Trabaja bajo interfaz USB 2.0 para con la PC, tiene luz led frontal, formato RGB 320X240 en tamaño de imagen.

La cámara web adquiere con facilidad los cuadros de imagen necesarios para la captación de imágenes y la retroalimentación de información visual al controlador. En la figura 3 se muestra la cámara web utilizada para el experimento.



Figura 3. Cámara web usada en el experimento, la cual se encarga de la captura de imágenes.

3. Análisis de resultados

Para los experimentos se hizo uso de un círculo negro colocado en el extremo del eslabón final, para localizar su posición en coordenadas de la cámara, como lo muestra la figura 2. El círculo manifiesta una estructura geométrica amigable, la cual, permite la sencillez para localizar del centro geométrico del círculo y así poder tener las coordenadas de las posiciones del extremo final del robot. El controlador fue evaluado en el lenguaje C, con un tiempo de muestreo de 2.5mseg., mientras que la retroalimentación visual se encontraba a 100mseg., es decir, 10 cuadros de imagen por segundo. La cámara fue colocada frente al robot manipulador, de manera que coincidió el eje R_3 con el eje C_3 de la cámara web usada para la captación de imágenes. El procesamiento de imágenes para la valoración de las coordenadas del eslabón final fue realizado usando MATLAB, aprovechando su toolbox, de procesamiento de imágenes. Para el experimento se indicó una posición inicial en píxeles respecto al plano de la cámara de $[u_0, v_0]^T = [123, 192]^T$, es decir, $q_1 = 0^\circ$, $q_2 = -45^\circ$, $q_3 = 120^\circ$ en grados; una posición deseada en píxeles para el experimento fue de $[u_d, v_d]^T = [130, 150]^T$. El error de posición en píxeles está definido por $\tilde{u} = u_d - u$ y $\tilde{v} = v_d - v$. El controlador es de ganancia variable, por lo cual, la sintonía de las ganancias para la posición deseada del experimento son: $k_{p11} = 07.00N$, $k_{p12} = 00.10N$, $k_{p21} = 00.10N$, $k_{p22} = 03.00N$, $k_{v1} = 0.0124Nm$, $k_{v2} = 11.11Nm$. Las constantes respectivas del eje de la cámara no afectan al sistema por la propiedad de robustez del sistema de visión por lo ya demostrado en [7], por tal razón, se considera una matriz de ganancia proporcional cuadrada y las

constantes de la rotación del eje de la cámara son unitarias.

Los resultados experimentales se muestran en las gráficas mostradas en la figura 4 y en la figura 5 donde se aprecian las evoluciones de los parámetros con respecto al tiempo, donde se validan el funcionamiento adecuado del controlador visual. Se muestra en la figura 4 la evolución con respecto al tiempo de los errores en píxeles de cada una de las coordenadas \tilde{u} y \tilde{v} , respectivamente. En la gráfica de la figura 4, se nota la convergencia a cero errores en píxeles para \tilde{u} y \tilde{v} con respecto a la evolución del tiempo. La respuesta del controlador es de 5.11 segundos.

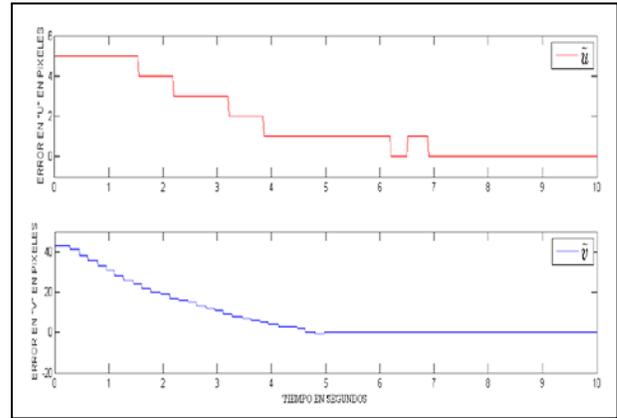


Figura 4. Error de posición \tilde{u} y error de posición \tilde{v} .

Las torques aplicadas al robot durante la evolución del experimento con respecto al tiempo se pueden observar en la figura 5. Descritos por τ_1 y τ_2 , respectivamente al codo y hombro del robot experimental. Se observan las torques que llevan y mantienen en la posición deseada al extremo final del eslabón.

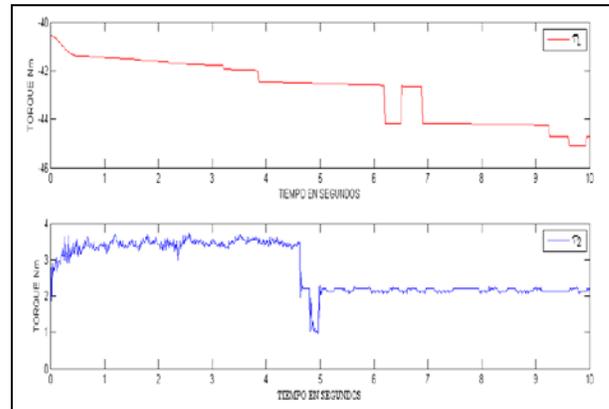


Figura 5. Gráfica de los pares aplicados del hombro τ_1 y codo τ_2 .

La figura 6, muestra la trayectoria del robot en el plano de la imagen, es decir, de la posición inicial del centro geométrico del eslabón final y el punto final del mismo con respecto a la evolución del tiempo durante el experimento, lo cual, verifica gráficamente que el robot manipulador se coloca en las coordenadas deseadas.

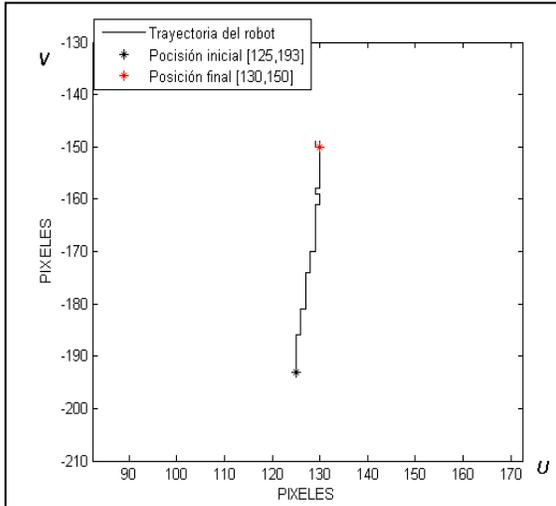


Figura 6. Trayectoria robot sobre el plano de la imagen del controlador.

4. Conclusiones

El aporte principal de este trabajo, es la presentación de un nuevo algoritmo de control empleando información visual para la configuración cámara fija con demostración de estabilidad asintótica local (en el sentido de Lyapunov) del punto de equilibrio de la ecuación en lazo cerrado formada por el modelo dinámico del robot manipulador, modelo de visión y estructura matemática del esquema propuesto, los cuales se validan implementando en el robot experimental planar de transmisión directa. Se presentaron resultados experimentales en un robot manipulador de 2 grados de libertad de transmisión directa con cámara fija utilizando una cámara-web. El controlador presentado es de sintonía variable y con propiedades de robustez con respecto a las coordenadas de la posición de la cámara web y las del robot manipulador [7]. Los resultados experimentales determinando errores pequeños y acotados en las coordenadas u y v y facilidad en el proceso de sintonía de las ganancias del algoritmo de control. En base al conocimiento y experiencia adquirida se visualiza para un trabajo futuro desarrollar e implementar el controlador para un Robot

Manipulador de 3 grados de libertad, así como hacer el control en la trayectoria del manipulador y realizar el controlador auto sintonizable con respecto a diversos puntos del plano de trabajo del manipulador, entendiendo como plano de trabajo al área en que el Robot Manipulador y la cámara se encuentran interactuando respecto a sus planos de coordenadas.

Referencias

- [1] Sciavicco L., Siciliano B., “*Modelling and Control of Robot Manipulators*”, Springer-Verlag, 2nd ed., London, 2001.
- [2] Reyes F., Cid J., “*Control de Movimiento para un Robot de Transmisión Directa Mediante Retroalimentación Visual*”, UPAEP, México, 2007.
- [3] Reyes F., “*Robótica Control de Robots Manipuladores*”, Marcombo, México, 1ra. Edición, 2011.
- [4] Reyes F., “*Control de Robot Manipulador de Transmisión Directa de dos grados de Libertad*”, CICESE, Ensenada, México, 1997.
- [5] Cid J., Reyes F., “*Controlador con retroalimentación visual para brazo robot*”, VIEP-BUAP, México.
- [6] Hashimoto K., “*Visual Servoing with nonlinear observer*”, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pág.484-489, 1995.
- [7] Kelly R., “*Robust asymptotical stable visual servoing of planar robots*”, IEEE Transactions on Robotics and Automation Vol. 12 No 5, pág.759-766, 1996.
- [8] Reyes F., “*Matlab aplicado a la Robótica y a la Mecatrónica*”, Marcombo, México, 1ra. Edición, 2012.
- [9] Kruse I., “*Modelling and Control of a FlexibleBeam and Robot Arm*”, University of Twente, Enschede, The Netherlands 1990.
- [10] Kelly R., Santibáñez V., “*Control de robots manipuladores*”, Printice-Hall, Pearson, México, 1ra Edición, 2003.