

Control por Retroalimentación Visual de un Brazo Manipulador de 7 GdL

Elvia R. Palacios-Hernández,
Facultad de Ciencias-UASLP
Av. Salvador Nava s/n, S.L.P.
CINVESTAV-IPN
epalacios@ciencias.uaslp.mx

José Rubén Sánchez-López, Antonio Marín-Hernández
Departamento de IA-UV
Sebastián Camacho No. 5, Xalapa, Ver.
sanchezlopezjr@gmail.com, anmarin@uv.mx

Resumen— En este trabajo se propone un método de servo-control por retroalimentación visual para realizar el proceso de manipulación de objetos cilíndricos por un brazo de 7 GdL. El manipulador no tiene sensores para medir su posición. Una cámara de estereovisión sobre una unidad móvil (pan/tilt) obtiene imágenes del efector final y de los objetos. La diferencia entre la posición en 3D del efector final y de los objetos es tomada como entrada. Se diseñaron tres controladores PID que realizan el ajuste fino de la manipulación. Resultados experimentales demuestran el desempeño del método propuesto. **Palabras clave:** Robot manipulador, retroalimentación por vision, PID.

I. INTRODUCCIÓN

Los avances recientes en el campo de la robótica han hecho converger dos de sus principales ramas: a) la robótica móvil y b) la robótica de manipuladores. Por un lado la robótica móvil se dedicó al estudio del movimiento de agentes autónomos tanto en ambientes interiores como exteriores, desarrollando entre otras técnicas para la construcción y mantenimiento de mapas o SLAM (por sus siglas en inglés *Simultaneous Localization And Mapping*), así como soluciones a los problemas de exploración reactiva, entre otros. Y por otro lado, la robótica de manipuladores, se enfocó al estudio de sistemas de control preciso, que sirven en el desarrollo actual de las células de manufactura, entre otras muchas aplicaciones.

Si bien existen desarrollos compartidos, como la planificación de movimientos, que dio sus inicios en la robótica móvil para rápidamente encontrar su espacio en la de manipuladores, hasta llegar a sistemas complejos como son la agregación y estructura de moléculas (Latombe, 1999); hasta hace algunos años estas dos líneas de investigación, compartían muy poco entre sí.

En años recientes, los desarrollos en ambas líneas se han consolidado resultando en una interesante línea de robots móviles manipuladores. El problema resulta complejo, por un lado los mapas de dos dimensiones (interiores) o agregación de superficies planas (exteriores) comúnmente usados no reflejan la complejidad real de un ambiente en donde un robot debe manipular objetos. Además el sistema de control del brazo al no estar fijo como en las celdas de manufactura, genera complejidad adicional al sistema de

control sobre todo cuando éste se da por posición. Particularmente, el problema está asociado la incertidumbre en la posición del robot con respecto a su ambiente (comúnmente $5cm$) y el problema dinámico del ambiente.

Los sistemas de planificación de trayectorias también se enfrentan al problema de la incertidumbre de la localización y aunado a la complejidad del manipulador generará que aún los mejores sistemas de planificación requieran de varios segundos para proveer una solución al problema (LaValle, 2006).

El problema de la manipulación de objetos por robots móviles comúnmente se divide en tres procesos (Siciliano y Khatib, 2008): a) identificación de la zona donde se encuentra el objeto a manipular, planificación de la trayectoria y ejecución de esta para llevar al robot hasta las cercanías del objeto (donde se este pueda alcanzar por el manipulador), b) identificación *precisa* del objeto, estimación de incertidumbres y planificación de trayectorias para acercarse a tomar el objeto y c) ajuste fino para realizar la toma del objeto deseado. Particularmente este último punto es de vital importancia dado que los errores de estimación acumulados entre la base del robot, su percepción y el control del brazo para llevarlo a la región del objeto, resulta muy complicado y por ello se requiere de un ajuste fino supervisado para poder finalizar la tarea.

En otras palabras, esta tarea de manipulación consiste en ubicar el objeto y el efector final del brazo manipulador, de tal forma que calcule el error de posición, el cual debe ser minimizado activando los motores del brazo hasta que el efector final este sobre el objeto y finalmente pueda tomarlo.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

El problema del ajuste fino en la manipulación de objetos por robots móviles han sido atacado en diferentes trabajos y bajo diferentes perspectivas, a continuación se mencionan algunos de de los trabajos relacionados más relevantes.

Fedrizzi et al. en (Fredrizzi et. al, 2009), usando un robot móvil auto-localizado con 2 manipuladores cada uno con de 6 GdL, generan un paradigma de paralelismo para tomar varios objetos usando un esquema probabilista de las posibles posiciones de los mismos. La planificación de las acciones se realiza en un módulo de razonamiento y

aprendizaje. El módulo de razonamiento usa lo que los autores llaman ARPlace (Action-Related Place) y permite al robot lograr la robustez de la manipulación añadiendo incertidumbre al momento de planificar, gracias a un sistema de reglas que van transformando los planes del robot.

En (Tegin et. al., 2009) se muestra un esquema para la manipulación de objetos basándose en una programación por demostración. En este trabajo los autores consideran que un robot humanoide debe contar con un módulo que le permita tomar objetos de forma similar a un ser humano. Para poder tomar un objeto se requiere primero ubicarlo en el sistema de visión que implica un análisis de textura para corresponder el objeto con alguno conocido en la base de datos, posteriormente, el agarre se realiza empleando el conocimiento que un humano transfiere al robot mediante una interfaz háptica. Adicionalmente, el ajuste del agarre se realiza usando un controlador Proporcional para las velocidades de los motores del efector final de 3 dedos los cuales estarán en acción hasta que se tome correctamente el objeto (utiliza una retroalimentación de fuerza). Los dos trabajos mencionado utilizan el esquema *ver y mover* (See&Move), es decir se localiza el objeto a manipular se ubica su posición y a partir de esta se controla el manipulador, no volviendo o raramente a entrar el proceso de visión en esta última etapa.

En (Hamner et. al, 2010) con un objetivo ligeramente diferente se trata de insertar un objeto en un hoyo integrando técnicas de control coordinado, servocontrol visual, control de fuerza y control reactivo en un robot manipulador de 7 GdL montado sobre una base móvil, que a su vez tiene un sistema de visión estéreo sobre una unidad pan-tilt. Para lograr las diferentes posturas del manipulador se emplea control coordinado y un algoritmo reactivo de control de velocidad (Siciliano, 2005) además de añadir restricciones al controlador con el fin de no lograr posturas indeseables en el brazo. La combinación de un enfoque de control visual y de fuerza permite al manipulador lograr reducir la incertidumbre al momento de colocar los objetos en sus posiciones, dicha incertidumbre puede venir de información visual, que será reducida usando la retroalimentación de fuerza. El servocontrol visual se realiza usando un controlador PID y en el caso del control de fuerza solo se usa un control Proporcional. La diferencia principal es que cuando no se tiene aun el objeto no se puede aplicar control de fuerza.

En este trabajo nos enfocamos en la última parte del proceso de manipulación el *ajuste fino* mencionada anteriormente y para ello proponemos la realización de un servocontrol visual realizado con la ayuda de una cámara de estereovisión. A diferencia de los enfoques *ver y mover*, en el lazo de control propuesto, se logra estimar el error en tiempo real ($> 20Hz$). Este ajuste fino se realizará con PIDs con retroalimentación visual del objeto y del efector final del brazo. Aquí se asume que ya existe un controlador que haga que el robot se acerque lo suficientemente al objeto para tenerlo a su alcance.

El presente trabajo se organiza de la siguiente manera: en la sección I se presenta la introducción al problema y en la sección II se describe el trabajo relacionado a este problema. En la sección III se define la arquitectura del sistema y el problema de control. En la sección IV se presenta el algoritmo de visión para obtener la información de la posición del objeto y del efector final en 3D. En la sección V se presenta el brazo manipulador. En la sección VI se describe el diseño de los PIDs y su implementación. En la sección VII se presentan los resultados de algunos experimentos realizados. Finalmente, en la sección VIII se presentan las conclusiones del trabajo.

III. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En esta sección se define el problema a resolver en este trabajo. Primero, se presenta la arquitectura del sistema, donde se describen todos los módulos que intervienen. Después se define el problema a resolver.

III-A. Arquitectura del sistema

Este tipo de sistema es conocido como *binocular independiente* (binocular stand alone) (Kragic y Chrisensen, 2002) donde la cámara se encuentra separada del efector final y el tipo de control es basado en imágenes (image based control). La arquitectura básica del sistema a controlar consta de:

1. La cámara es de tipo estéreo y se comunica vía puerto IEEE-1394 con la computadora. Cuenta con un sensor que obtiene imágenes en formato RGB con resoluciones entre 320x240 píxeles y 1280x768 píxeles. En este trabajo se consideraron imágenes de 640x480 píxeles.
2. El brazo manipulador tiene 7 uniones en las cuales tienen un servomotor con 180° de movimiento total. Tiene un efector final tipo pinza accionada por un servomotor. El control de todos los servomotores lo realiza la tarjeta SSC-32 con tecnología ATMEL.
3. La etapa de potencia se encuentra en la tarjeta SSC-32 y las fuentes de alimentación son dos baterías: una de 6 Volts con 7A para los motores y otra de 9 Volts para a etapa digital.
4. Una computadora con procesador Intel Pentium M con 1.8 GHz de velocidad de procesamiento ante 512 MB de memoria RAM. Aquí se realizan las tareas de:

Visión: Implementación de algoritmo de obtención de la posición 3D del efector final y del objeto a manipular.

Control: Aquí se realiza el algoritmo de control clásico PID.

Tr: (Traductor) Los datos son cadenas de texto de 8 bits vía puerto serial RS-232 con una velocidad de transferencia de 115200 baudios.

SC: (Servocontrol) Este bloque convierte las cadenas de texto a pulsos eléctricos. Estos pulsos tienen una frecuencia de 60 Hz and 5 Volts de corriente

directa con PWM (modulación por ancho de pulso).

III-A.1. Definición del problema: Una vez que la arquitectura del sistema y sus módulos fueron descritos, el problema de control puede ser formulado. En este sentido, se hace notar que el mayor interés en explotar las propiedades de visión para proponer una solución al problema establecido. Entonces el problema puede ser definido como:

Considerar el robot manipulador de 7 gdl con una pinza como efector final y asumiendo que:

A.1 Existe un planificador de trayectorias tal que lleve el brazo, específicamente al efector final a una posición cercana al objeto.

A.2 Existe una retroalimentación visual (imagen) de la posición en 3D del efector final y del objeto.

Bajo estas condiciones, el problema es diseñar una ley de control u tal que el $\lim_{t \rightarrow \infty} (x_{ef} - x_{obj}) = 0$ donde x_{ef} es la posición en 3D del efector final y x_{obj} es la posición 3D del objeto. Y finalmente hacer que el robot tome el objeto.

IV. ALGORITMO DE VISIÓN

En esta sección se describe como se obtienen la posición 3D del efector final x_{ef} y del objeto x_{obj} a partir de un par de imágenes. El algoritmo global de visión se presenta en la figura 1.

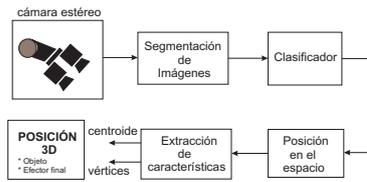


Figura 1. Algoritmo general de visión

IV-A. Segmentación de Imágenes

Para esta etapa es necesario tener definido el espacio de color en el cual se trabajará, en este caso es el espacio de color HSV (Hue, Saturation and Value) (Forsyth y Ponce, 2003), pero solo se considerarán las componentes H y S. El algoritmo de segmentación utilizado utiliza un enfoque de aprendizaje supervisado y se describe a continuación:

- Definición del universo de trabajo (UT), dicho de otra forma son los colores que se utilizan, en este trabajo se consideran el siguiente UT.

$$UT = \{\text{morado, azul, amarillo, rojo, naranja}\} \quad (1)$$

de los cuales el color naranja es del efector final y los demás colores son de los objetos.

- Adquisición de muestras en color. Se obtienen 100 muestras de cada color del UT.
- Cálculo de centroides de las muestras de colores.

$$cenHS(i) = \left(\frac{\sum_{j=1}^n H(j)}{n}, \frac{\sum_{j=1}^n S(j)}{n} \right) \quad (2)$$

donde $cenHS(i)$ representa el i -ésimo valor del vector prototipo de un color, $i \in [0, 4]$ es la posición del color en UT, $H(j)$ y $S(j)$ es el j -ésimo valor de la componente H y S perteneciente al color i respectivamente y n es el total de muestras $n = 100$.

- Radio de Clasificación. Para simplificar la clasificación se definen i radios de un círculo a partir de los centroides calculados anteriormente. Los radios $r(i) = \{10, 15, 15, 30, 35\}$ son la distancia euclidiana que existe desde $cenHS(i)$ hasta abarcar el i conjunto de muestras.
- Clasificación. Se utiliza la distancia euclidiana

$$d(a, b) = \sqrt{\sum_{k=1}^{n_1} (a_k - b_k)^2}, \quad (3)$$

donde a y b son dos puntos en el espacio Euclídeo, n_1 es el número de dimensiones y k toma valores entre 1 y n_1 , así aquellos valores de píxeles que sean menores o iguales a $r(i)$ serán clasificados como clase i . Al final de este paso se obtiene una imagen segmentada como la mostrada en la figura 2. De esta imagen binaria se tiene que estimar la posición del objeto en el espacio.



Figura 2. Efector final segmentado de acuerdo a su color

- Posición en el espacio. Aquí la imagen binaria es procesada para eliminar el posible ruido después de la segmentación. Se determinan las componentes conexas de la imagen, es decir, dos píxeles están conectados si (Gonzalez y Woods, 2002): i) tienen vecinos en común (4 u 8 vecinos), ii) sus valores de intensidad son iguales o satisfacen algún criterio de similitud, iii) existe una ruta entre ellos que contenga los píxeles contenidos en una región y iv) los píxeles contenidos en una región están conectados, es decir, existe una ruta entre ellos, a esto se le denomina componente conexa. Entonces, es necesario calcular todas las áreas de las componentes conexas

$$area(cc) = \sum_x \sum_y f(x, y) \quad (4)$$

donde $area(cc)$ es el área de los píxeles contenidos en la componente conexa definida como $f(x, y)$, después para saber si el área de la componente conexa es válida (1) o no (0), se utiliza

la siguiente expresión

$$fa = \begin{cases} \text{area}(cc) > um, & 1 \\ \text{area}(cc) \leq um, & 0 \end{cases} \quad (5)$$

donde fa es la función que evalúa el área, um es el umbral de las áreas que se permiten pasar, en este caso $um = 15$.

g) Extracción de características. Aquí se calculan, el centroide de la imagen y los vértices.

- Centroides. Este se calcula por la siguiente ecuación, que es la media de los valores de las posiciones x, y del área filtrada.

$$c(\bar{x}, \bar{y}) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n x}{\text{area}(cc)}, \frac{\sum_{i=1}^n y}{\text{area}(cc)} \right) \quad (6)$$

el cual representa la posición del centroide en coordenadas de píxel en la imagen.

- Vértices. El cálculo de vértices se realiza usando cadenas de Freeman (Freeman, 1961).

h) Posición 3D de un objeto. Aquí se obtiene la posición de un objeto en el mundo real con respecto al marco de referencia de una cámara. En este caso es una cámara estéreo (contiene dos cámaras: izquierda y derecha) montada sobre una unidad Pan-Tilt de Directed Perception mod. 46-17-5S. El modelo geométrico de esta cámara se muestra en la figura 3 donde u, v, u', v' son las coordenadas imagen, C_x, C_y es el centro óptico de la imagen, el sistema de ubicación de marcos referenciales donde se encuentra X, Y y Z es la mano derecha tomando como referencia la cámara izquierda. T_x es la traslación que existe entre los geométricos de las lentes, S es un punto en el mundo real, s y s' es la proyección de S en el plano de la imagen derecha e izquierda respectivamente y finalmente f la longitud focal. Entonces la matriz

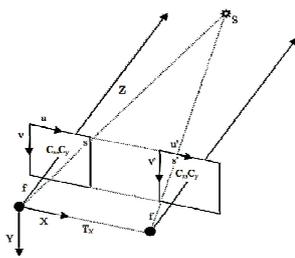


Figura 3. Modelo geométrico de la cámara

de reproyección de la cámara se define como

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -C_x \\ 0 & 1 & 0 & -C_y \\ 0 & 0 & 0 & f \\ 0 & 0 & \frac{-1}{T_x} & \frac{C_x - C'_x}{T_x} \end{bmatrix} \quad (7)$$

donde C'_x es el centro geométrico rectificado de la imagen derecha. Como se tiene el mismo objeto

segmentado en dos imágenes no se puede asegurar que existan los mismos vértices, por lo tanto se tiene que hacer una correspondencia de puntos

- Correspondencia de puntos con el vecino más cercano.

Entonces un punto en la cámara izquierda puede ser reproyectado si la disparidad y la matriz (7) son conocidas. La disparidad es el desplazamiento entre las posiciones de dos características en el plano de la imagen (Jain et al., 1995) la cual se calcula con la siguiente expresión

$$di = x_i - x_d \quad (8)$$

donde di es la disparidad existente entre la coordenada x de la imagen izquierda x_i y la coordenada x de la imagen derecha x_d .

Finalmente, para la posición 3D de un punto se utiliza la matriz (7) y (8) en la siguiente ecuación

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \end{bmatrix} \cong Q \begin{bmatrix} x \\ y \\ di \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

donde el punto 3D queda descrito por $X/W, Y/W, Z/W$ y x, y es el punto de la imagen izquierda. Así, para cada punto con su correspondiente resultado del axioma 1 se aplica lo anterior resultando un conjunto de puntos 3D que representan los objetos en la escena.

Estos puntos 3D están sobre un marco referencial de la cámara, pero las acciones de control residen en un modelo esférico donde el centro es la base del brazo manipulador y a partir de este punto se obtiene la posición de los puntos, por lo tanto se requiere transformar el marco referencial de la cámara hacia el marco referencial del brazo, por lo cual se hace una rotación en el eje x de la cámara y después una traslación hacia la base del brazo. Esta rotación fue de 135° en el eje x . La rotación se realizó aplicando la siguiente ecuación

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

y la traslación con

$$x' = x' + T_x \quad (11)$$

$$y' = y' + T_y \quad (12)$$

$$z' = z' + T_z \quad (13)$$

El punto está definido ahora por el vector (x, y, z) en su forma homogénea. $T_x = -290mm, T_y = 90mm$ y $T_z = 500mm$. Estas transformaciones se determinan para cada punto estimado del objeto (efector final y un cilindro de color).

Para corregir errores ya sea por el sistema de adquisición de datos o por el procesamiento se utiliza una transformación rígida, es decir, un mapeo de sistemas de coordenadas dado un marco de referencia F , donde existe una rotación y una translación. En este trabajo se utilizó el metodo presentado en (Taati Babak, 2009)

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9992 & -0,0160 & 0,0379 & 86,5665 \\ 0,0379 & 0,0014 & -0,9993 & 109,1161 \\ 0,0159 & 0,9999 & 0,0020 & -40,7601 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

De esta forma x'', y'', z'' son los puntos calibrados a partir del proceso de visión (x', y', z') que se ajustan a los puntos reales por medio de (14). Sin embargo, al realizar mediciones en los datos estimados (x'', y'', z'') existen discrepancias de tipo constante, las cuales corresponden a un desplazamiento en los ejes X y Z , de tal forma que un punto (x'', y'', z'') en sus componentes y, z se determinan por

$$y'' = y' + T'_y \quad (15)$$

$$z'' = z' + T'_z \quad (16)$$

donde $T'_z = -80mm$ y $T'_y = -40mm$ obtenidos de forma experimental. Toda la etapa de visión se encarga de obtener la posición en 3D del efector final $x_{ef} = [x''_{ef}, y''_{ef}, z''_{ef}]^T$ y la posición en 3D de un cilindro de color $x_{obj} = [x''_{obj}, y''_{obj}, z''_{obj}]^T$.

V. BRAZO MANIPULADOR

El brazo manipulador utilizado en este trabajo es un Brazo Cyton de la compañía Robai. El manipulador cuenta con 7 servomotores, donde cada servomotor tiene asignado un control de velocidad y posición. El espacio de trabajo de un brazo de 7 gdl es redundante, es decir, se puede llegar a un punto usando diferentes configuraciones lo cual implica que el control sea más complejo. Además de que el espacio de trabajo de este tipo de manipuladores es esférico. En un brazo antropomórfico de 3 gdl las coordenadas esféricas representan la posición de un punto en su espacio por medio de 3 variables: r_a (radio), ϕ (colatitud) y θ (longitud) que en el espacio Euclidiano (x, y, z) son

$$r_a = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad (17)$$

$$\phi = \cos^{-1} \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}, \quad (18)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y}{x}. \quad (19)$$

En nuestro caso para el control del brazo dentro del espacio esférico se puede plantear en solamente dos dimensiones: i) utilizando x y y para calcular θ y r_a y ii) z directamente del espacio Euclidiano. Tenemos que

$$r_a = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (20)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y}{x}. \quad (21)$$

Resultando que el punto de un objeto y del efector final queda representado por

$$x_{obj} = (\theta_{obj}, r_{aobj}, z_{obj}) \quad y_{x_{ef}} = (\theta_{ef}, r_{aef}, z_{ef}) \quad (22)$$

TABLA I
ARTICULACIONES

Articulación	angulo fijo	
2	0°	
4	0°	
5	-60°	
6	45°	
Articulación	Val. mínimo	Val. maximo
0 (θ)	-80°	-40°
3 (r_a)	200mm	300mm
1 (z)	-30mm	110mm

Entonces las articulaciones 2,4,5 y 6 tienen una posición fija y las articulaciones 0,1 y 3 son las variables a controlar, ver tabla I.

Por lo tanto, es necesario diseñar 3 controladores para cada una de las variables a controlar θ, r_a y z . Para ello se definen los errores

$$e_\theta = \theta_{obj} - \theta_{ef}, \quad (23)$$

$$e_{r_a} = r_{aobj} - r_{aef} \quad (24)$$

$$e_z = z_{obj} - z_{ef}, \quad (25)$$

Entonces para cada variable se empleo un controlador PID independiente

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de}{dt} + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) \quad (26)$$

como lo muestra la Figura 4. Los 3 PID utilizados se sintonizaron de forma experimental, donde las ganancias integral (q_1) y derivativa (q_2) quedaron en función de la ganancia proporcional (q_0) como se muestra a continuación:

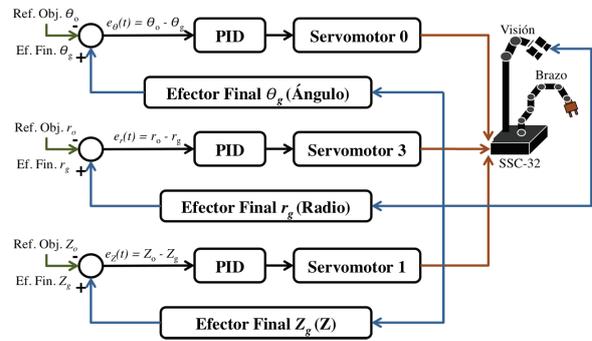


Figura 4. Esquema de control propuesto

$$q_{1\theta} = \frac{q_{0\theta}}{3}, q_{1r_a} = \frac{q_{0r_a}}{3}, q_{1z} = \frac{q_{0z}}{3}, \quad (27)$$

$$q_{2\theta} = \frac{q_{0\theta}}{10}, q_{2r_a} = \frac{q_{0r_a}}{10}, q_{2z} = \frac{q_{0z}}{10}$$

donde los valores resultantes son:

$$q_{0\theta} = 7, \quad q_{1\theta} = 2, \quad q_{2\theta} = 0,6. \quad (28)$$

$$q_{0r_a} = 1,5, \quad q_{1r_a} = 0,5, \quad q_{2r_a} = 0,15. \quad (29)$$

$$q_{0z} = 1, \quad q_{1z} = 0,3, \quad q_{2z} = 0,1. \quad (30)$$

VI. RESULTADOS

Se implementaron 3 controladores PID (26) y cerrando el lazo de control se realizó la prueba experimental mostrada en la figura 5. Aquí el objetivo es tomar un cilindro de color azul. Como se puede observar el PID lleva al efector final a la posición del objeto. El controlador permite al efector final estar sobre el objeto, reduciendo el tiempo de asentamiento del ángulo y de la posición en z. Existe un pequeño sobrepaso en el ángulo y el radio es más lento que las otras variables, mostrando errores pequeños en las 3 variables como se muestra en la figura 6.

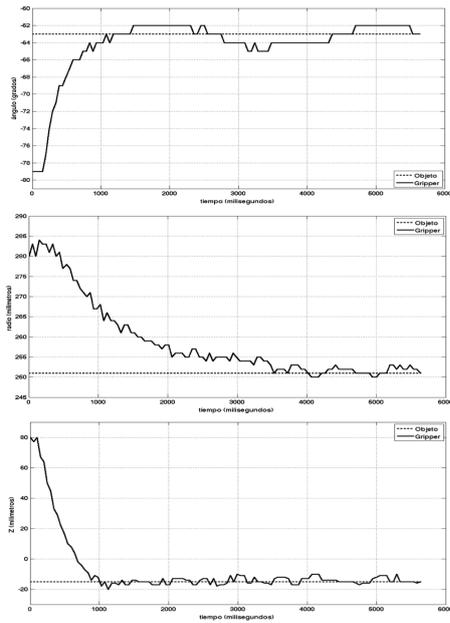


Figura 5. Respuesta del manipulador con el PID

VII. CONCLUSIONES

La metodología propuesta utilizando un servo-control por retroalimentación visual de imágenes garantiza la tarea de manipulación de objetos de un brazo manipulador de 7 gdl. El servo-control visual esta basado en una estructura de PID. El ajuste de las ganancias de los controladores fueron determinadas de forma experimental. Se realiza la estimación de la posición 3D del efector final y de los objetos en línea permitiendo un control en tiempo real.

VIII. AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo proveniente del proyecto CONACyT-SEP 61375 para el financiamiento de este trabajo.

REFERENCIAS

J.C. Latombe, Motion Planning: A Journey of Robots, Molecules, Digital Actors, and Other Artifacts, *The International Journal of Robotics Research* November (1999) 18: 1119-1128.
 Steven M. LaValle, *Planning Algorithms* Cambridge University Press, 2006.

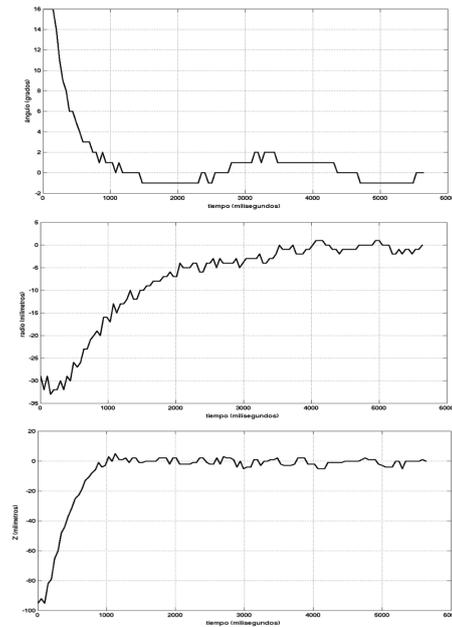


Figura 6. Errores

Forsyth, D.A. y J. Ponce (2003). *Computer vision A Modern Approach*. Prentice Hall.
 Gonzalez R.C y R.E. Woods (2002). *Digital Image Processing*. Prentice Hall.
 Jain R., R. Kasturi y B.G. Schunk (1995). *Machine Vision*. McGraw-Hill.
 Taati Babak (2009). Generation and optimization of local shape descriptors for point matching in 3d surfaces. Tesis para obtener el grado de Doctor en Filosofía. Universidad de Queen's. Kingston, Ontario, Canadá.
 Siciliano B. y O. Khatib (2008) *Handbook of robotics*. Springer Handbooks.
 J. Tegin, S. Ekvall, D. Kragic, J. Wikander, y B. Iliev (2009). Demonstration-Based learning and control for automatic grasping. *Intelligent Service Robotics*, **2-1**, 23-30.
 Kragic, D. y H.I. Christensen (2002). Survey on visual servoing for manipulation. *Technical report, Computational Vision and Active Perception Laboratory*. University of Stockholm, Sweden.
 A. Saxena, J. Driemeyer, J. Kearns, C. Osondu, and A. Ng (2008). Learning to grasp novel objects using vision. *Experimental Robotics*, ser. Springer Tracts in Advanced Robotics, O. Khatib, V. Kumar, and D. Rus, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, 2008 **39**, 33-42.
 Hamner B., S. Koterba, J. Shi, R. Simmons y S. Singh (2010). An autonomous mobile manipulator for assembly tasks. *Autonomous Robots*, **28-1**, 131-149.
 Fedrizzi, A., L. Moesenlechner, F. Stulp y M. Beetz (2009). Transformational planning for mobile manipulation based on Action-related places. *Proceedings of the international Conference on Advanced Robotics*.
 Ito, S., S. Takeuchi y M. Sasaki (2009). Object orientation in two dimensional grasp with friction towards minimization of gripping power. *Biological Cybernetics*.
 Saxena, A. J. Driemeyer, J. Kearns, C. Osondu y A. Ng (2008). Learning to grasp novel objects using vision. in *Experimental Robotics*, Springer Tracts in Advanced Robotics. Springer Berlin/Heidelberg, **39**, 33-42.
 Freeman, H. (1961). On the encoding of arbitrary geometric configurations. *Electric Computers, IRE Transactions on*, *EC-10-2*, 260-268.
 Sciavicco, L., Siciliano, B. (2005). *Modeling and control of robot manipulators (2nd ed.)*. London: Springer.