

Una Plataforma de Control Basado en Visión para la Rehabilitación de Robots Manipuladores de Tipo Industrial

A vision based control platform for Industrial Robot Rehabilitation

Marco A. García¹, Antonio Cárdenas¹, Juan M. Rendón² and Mauro Maya Méndez¹

¹Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Manuel Nava 8, C.P. 78290, San Luis Potosí, S.L.P.

marcoagr23@gmail.com; jcardena@uaslp.mx; mauro.maya@uaslp.mx

²Universidad Autónoma del Estado de Morelos,

Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa C.P. 62209, Cuernavaca, Morelos.

rendon@uaem.mx

Artículo recibido en Marzo 10, 2008; aceptado en Septiembre 04, 2008

Resumen

En este artículo se describe el desarrollo de una plataforma de control basado en visión para robots manipuladores de tipo industrial. Uno de los objetivos del control basado en visión es habilitar a los robots manipuladores para realizar tareas complejas diversas de manera genérica y en ambientes no estructurados. Adicionalmente de buscar este objetivo, la plataforma que se presenta reúne dos características importantes: a) reemplaza al control de origen, por lo que no es necesario que el robot cuente con un controlador funcional y b) el control implementado es robusto a errores en el modelo cinemático del robot, errores ocasionados ya sea por inexactitud en los parámetros del modelo cinemático y/o por desgaste moderado de las piezas mecánicas. Las ventajas citadas hacen que la plataforma propuesta sea aplicable tanto a robots nuevos como usados habilitándolos para la realización de tareas complejas y alargando su vida útil. En suma, la implementación de esta plataforma permite una disminución de costos y una mejora de beneficios en la utilización de robots comerciales para la realización de procesos industriales. La plataforma de control desarrollada fue validada experimentalmente con un robot industrial PUMA 761.

Palabras clave: Robot manipulador, Control basado en visión, Manipulación en espacio de cámara, Rehabilitación de robots.

Abstract

In this paper a development of a visually based control platform for industrial robots is described. One of the objectives of a vision based control is to enable robotic manipulators to execute diverse complex tasks in non structured environments. Additionally to this aim, this platform presents two important characteristics: a) replaces the original controller, thus it is not required that the manipulator has a functional controller, and b) the applied control strategy is robust to errors in the characterization of the kinematics model of the robot, errors caused either by inaccuracy in the parameters of the model or due to the moderate deterioration of the mechanical parts. These advantages enable robotic manipulators to accomplish complex tasks and/or extending their useful life. In sum, the implementation of this platform allows a reduction of costs and an improvement of benefits in the commercial use of robotic manipulators for the accomplishment of industrial processes. The developed control platform was validated experimentally with a PUMA 761 robot.

Keywords: Vision based control, Camera space manipulation, Retrofit of industrial manipulators

1 Introducción

La utilización de robots en procesos de manufactura industriales está limitada por diversos factores. Uno de ellos es el alto costo de esta tecnología (inversión inicial y mantenimiento). Otro factor es la poca flexibilidad que podría presentar una línea de producción que incluya un robot, ello debido al número de sensores y dispositivos que se hacen necesarios para garantizar la correcta interacción del robot con la línea de producción. Tradicionalmente los robots se han utilizado en tareas simples y repetitivas; esto debido a que la correcta realización de tareas complejas está condicionada a la adecuada calibración del sistema (un proceso que puede resultar complicado y costoso), la exactitud del modelo cinemático del robot y a un mínimo desgaste de los componentes mecánicos. Adicionalmente la programación de tareas complejas resulta ardua y costosa en tiempo y el control comercial del robot simplemente

puede no contar con las capacidades para realizar esta programación [Becerra *et al*, 2004; Moreira *et al*, 1996; Markus *et al*, 2004]. Como resultado, se tienen beneficios moderados que sólo justifican la utilización de robots en procesos industriales particulares.

Típicamente los robots se vuelven obsoletos en la parte de hardware de control mientras que la parte mecánica es viable de ser reutilizable. Ello debido principalmente a que los sistemas mecánicos no han evolucionado de manera tan acelerada como la parte electrónica. Esta última está cambiando tan rápidamente que los controles se vuelven obsoletos en plazos relativamente cortos. Sin embargo esta evolución en la parte electrónica también ha permitido reducir costos de manera que es posible reemplazar el hardware de control a un costo relativamente bajo.

Una parte fundamental perteneciente al sistema de control del robot es la parte sensorial. Los sensores proporcionan información de la posición que es utilizada para controlar al robot. Los sensores exteroceptivos (por oposición a los sensores propioceptivos) proporcionan información directamente relacionada con la interacción entre un sistema y su entorno. El equipamiento de un robot con sensores exteroceptivos equivale a dotarlo de capacidades sensoriales para detectar su entorno y así aumentar su autonomía. Entre los sensores exteroceptivos más atractivos para incrementar las capacidades autónomas en robótica destacan los sistemas de visión debido a la riqueza de la información que proveen. Los primeros intentos de incorporar sistemas de visión en robótica se remontan a hace algunas décadas, pero hasta hace poco los avances tecnológicos en fabricación de cámaras de alta velocidad y equipo de computo, han permitido incorporar estas tecnologías al ámbito industrial [Valera *et al*, 2003; Yanfei *et al*, 2004; Ahmed y Tugrul; Markus *et al*, 2004]. Las técnicas de control por visión permiten la flexibilización de los robots como herramientas de producción [Valera *et al*, 2003; Ahmed y Tugrul], explotando las capacidades de los robots como sistemas adaptables a tareas cambiantes y complejas de manera simple y genérica con requerimientos mínimos de reprogramación.

En resumen, una plataforma robusta de control basado en visión permitiría abatir varios costos asociados al empleo de robots en tareas industriales e incrementar la flexibilidad de los robots para el desempeño de tareas variadas y complejas (en ambientes cambiantes). Con esta motivación se propone en este artículo la realización de una plataforma de control basado en visión diseñada con componentes comerciales de costo relativamente bajo. Además de reducir los costos asociados a la calibración del sistema, una posibilidad para abatir el costo de adquisición de robots consistiría en la recuperación de robots obsoletos y rehabilitarlos para operación al mismo nivel de desempeño de un robot reciente. En efecto, es posible recuperar la parte mecánica de un robot obsoleto y sustituir la electrónica con componentes comerciales con la tecnología más reciente. Esto permitiría obtener un robot operativo con algoritmos de control de vanguardia a un costo bajo.

2 Actualización del Controlador del Robot

Un sistema robótico industrial puede ser dividido en dos partes principales: el sistema mecánico y el sistema de control. El sistema mecánico es una estructura esencialmente conformada por eslabones rígidos que son unidos mediante articulaciones. El sistema de control está conformado por las tarjetas controladoras de movimiento, módulos amplificadores de potencia acorde a los requerimientos de los actuadores y equipo de cómputo que ordena las acciones del robot y ejecuta los algoritmos necesarios para su control. En la Figura 1 se muestra un esquema de estos componentes.

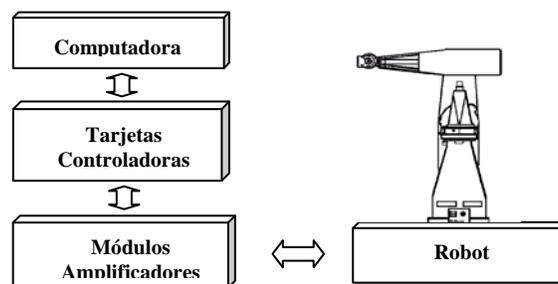


Fig. 1. Componentes del sistema de control de un robot manipulador

Tal como se mencionó anteriormente, los robots se vuelven obsoletos en la parte de control debido al avance tan acelerado de los componentes electrónicos. Un ejemplo de robots en los que la parte mecánica puede ser reutilizable son los robots PUMA. Por tal motivo, para validar la propuesta de la metodología presentada en este trabajo se realizó la actualización del controlador de un robot PUMA de la serie 700 como se describe a continuación.

Actualización del Controlador del robot PUMA 761

Una de las limitaciones de los controladores originales de los robots industriales es el que muchos presentan un control cerrado y resulta complicado integrar elementos y algoritmos externos necesarios para implementar un sistema de visión, además algunos controles comerciales son obsoletos y no cuentan con soporte técnico de hardware y software. Por estas razones, se optó por una propuesta en la cual se elimina el sistema de control original del robot y se sustituye por tarjetas controladoras comerciales, una computadora personal y los algoritmos necesarios para su control. De esta manera es posible integrar una plataforma de visión empleando hardware y software de última generación.

Un ejemplo típico de un robot que puede ser actualizado en la parte electrónica es el robot PUMA 761 (Fig. 3) que aunque mecánicamente sigue siendo útil, su controlador original tiene ya más de veinte años y su sistema electrónico es obsoleto.

Otra de las limitantes del controlador original del robot PUMA es que el sistema operativo del controlador original utiliza el lenguaje VAL-II. Éste es un sistema obsoleto que no aprovecha todas las ventajas que presentan los lenguajes de programación actuales. El incorporar una PC de última generación al sistema de control del robot permite utilizar sistemas operativos y lenguajes de programación más robustos y convenientes.

Hardware Original

El robot PUMA 761 posee una estructura cinemática de 6 grados de libertad (Fig. 2). Las articulaciones de sus tres primeros ejes son de tipo revoluta y su muñeca tiene la configuración de articulación esférica. La muñeca es operada por tres actuadores cuyos ejes ortogonales tienen sus flechas concéntricas. Todos los ejes son operados con servomotores de CD de Imán permanente. El módulo de control del robot es el componente maestro del sistema eléctrico del PUMA. El controlador original cuenta con una memoria de 64K CMOS RAM, una unidad de disco de 5 1/4 y un modulo I/O de 32 entradas y 32 salidas digitales.

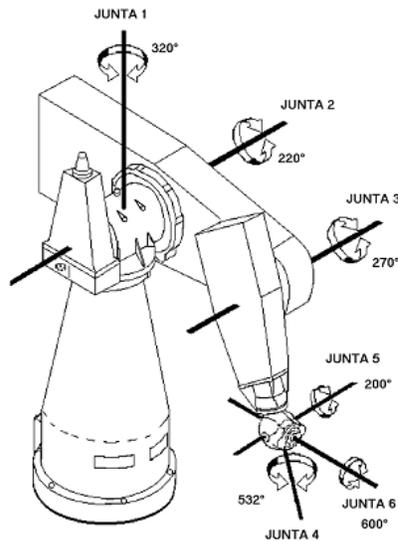


Fig. 2. Identificación de juntas y ejes de rotación del robot PUMA 761¹

¹ Imagen tomada del catálogo técnico de UNIMATION para el PUMA 761.

Integración del nuevo controlador

En el laboratorio de robótica de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí México se cuenta con un robot PUMA 761, el cual fue utilizado como plataforma de pruebas, su controlador original fue remplazado por una tarjeta controladora de movimiento Galil DMC-1860, conectada a una PC Pentium IV, y se agregaron dos módulos de interconexión con tarjetas amplificadoras Galil (AMP-1902 y AMP-1904). Adicionalmente se integraron dos fuentes de poder, una de 24 VCD para la liberación de los frenos electromecánicos y una fuente de 60VCD para energizar las tarjetas amplificadoras y los servomotores.

La unidad de procesamiento principal de la tarjeta controladora Galil es un procesador especializado Motorola de 32 bits con 512K bytes RAM y 512K bytes en memoria Flash EEPROM. La memoria RAM provee espacio para variables, arreglos y programas de aplicación. La memoria flash EEPROM permite almacenar variables, programas y arreglos no volátiles. Esta memoria posee el *firmware* del controlador, el cual puede ser actualizado.

La parte de control de potencia fue cubierta con la utilización de dos módulos de interconexión con tarjetas amplificadoras de la serie AMP-19X0 de Galil. Un módulo AMP-1920 que contiene 2 amplificadores y un módulo AMP-1940 que contiene 4 amplificadores. Ambos son PWM y trabajan a 30 KHz.

Software de control

Para el desarrollo del software de control se diseñaron e implementaron los algoritmos necesarios para lograr el posicionamiento punto a punto empleando la configuración original del robot. Para lograr la posición de los servomotores del robot se calcularon y programaron las ganancias de los controladores incluidos en la tarjeta Galil asociados a cada articulación.

Para la realización de estos algoritmos se utilizaron los comandos propios de Galil Motion[Cessati, 2004]. Todos los algoritmos fueron programados en lenguaje C++ y fueron implementados en una distribución Fedora del sistema operativo Linux. Los diferentes módulos de software se describen con mayor detalle en la sección 4.

Una vez realizada la actualización del controlador del robot y validada experimentalmente con una serie de pruebas, fue posible integrar una plataforma de control por visión empleando hardware genérico. En los siguientes párrafos se describe la metodología desarrollada para implementar el sistema de control por visión.

3 Control basado en Visión

Una de las principales ventajas de utilizar un sistema basado en visión es que proporciona un sistema adaptable a la posición de la pieza de trabajo. Al ser un sistema adaptable elimina la necesidad de que la pieza de trabajo permanezca fija o en una posición conocida respecto al origen del robot, aunado a que explota las capacidades de los robots de ser reprogramados de manera automática durante una maniobra.

El control de robots mediante sensores de visión es una de las áreas que ha tomado mayor interés dentro del campo de la robótica. Este interés ha sido propulsado principalmente por los avances en la tecnología de los componentes electrónicos y por el desarrollo de nuevos algoritmos que han permitido que esta tecnología sea viable de utilizarse en procesos industriales. Por tal motivo ha sido posible el desarrollo de algunas técnicas que han ido evolucionando a través del tiempo. Las técnicas más populares de control basado en visión para robots manipuladores son Teleoperación [Qun *et al*, 2000], Servo Visual (VS) [Hutchinson *et al*, 1996], Manipulación en Espacio de Cámara (CSM, por sus siglas en inglés) [Skaar *et al*, 1990] y Técnicas de Calibración [Hartley y Zisserman, 2004].

El método CSM es una técnica de control por visión que se ha venido desarrollando con éxito en la Universidad de Notre Dame, EU, y actualmente se utiliza para fines de investigación en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Esta metodología se basa en la estimación de la relación entre la posición tridimensional de un determinado número de marcas visuales colocadas en el efector final del robot y su posición correspondiente en las imágenes tomadas por al menos dos cámaras [González *et al*, 2001]. En contraste con otras técnicas de control basado en visión tales como teleoperación y servo visual, CSM no requiere de una retroalimentación en tiempo real de la información visual. Utiliza un control en lazo abierto basado en técnicas de

estimación, lo que hace que CSM sea una técnica viable de ser utilizada en el control basado en visión de sistemas robóticos.

La técnica CSM emplea un modelo simplificado de cámara denominado modelo ortográfico [Seelinger, 1999]. Este modelo es válido cuando las cámaras están colocadas a una distancia relativamente alejada del área de trabajo del robot donde el efecto de perspectiva sea mínimo. Los parámetros de visión acordes al modelo ortográfico son obtenidos mediante un proceso iterativo de estimación no lineal para un mínimo de dos cámaras participantes. Posteriormente, el CSM emplea una corrección de los datos acorde al modelo de cámara de orificio denominada corrección por flattening [Cárdenas *et al.*, 2003] para tomar en consideración el efecto perspectiva.

Recientemente se ha desarrollado una variante del CSM denominada CSM-Lineal [Rendón *et al.*, 2007]. Esta técnica sustituye el modelo ortográfico por el modelo de cámara de orificio y elimina la necesidad de aplicar el proceso de flattening. Otra de las ventajas de esta metodología es que permite obtener los parámetros del modelo de cámara de forma directa mediante la solución de un sistema de ecuaciones lineales. Por tales motivos, esta metodología fue implementada para la plataforma de visión desarrollada en el presente trabajo.

Una de las principales ventaja de emplear el método de CSM para la rehabilitación de robots es que no presenta sensibilidad a errores en el modelo cinemático del robot, tal como se describe en [17]. Estos errores pueden ser causados por el desgaste en las piezas mecánicas y por el denominado error de retorno, que se presenta cuando una articulación del robot cambia de giro.

En los siguientes párrafos se describen de manera general las etapas principales de la metodología que emplea la técnica CSM-Lineal para el proceso de calibración del sistema de visión. También se describe el proceso de solución de los valores angulares que debe adoptar el robot para posicionarse en un punto definido. Esto a partir de las matrices de cámara del sistema de visión y la información visual de puntos objetivo en espacio de imagen.

Cálculo de la matriz de cámara

El modelo de cámara de orificio [Zhang, 2000] representa una relación entre puntos ubicados en el espacio de un sistema de coordenadas tridimensional y su proyección sobre el plano de la imagen. En este modelo están contenidos todos los parámetros que intervienen en el proceso de formación de la imagen. En los siguientes párrafos se describe una metodología para obtener una aproximación al modelo de cámara de orificio basado en correspondencia de puntos.

A partir de un mínimo de seis correspondencias $\mathbf{X}_i \leftrightarrow \mathbf{x}_i$, donde $\mathbf{X}_i = [X, Y, Z, 1]^T$ representa el vector de coordenadas de un punto en el espacio tridimensional y $\mathbf{x}_i = [x, y, 1]^T$ el vector que contiene las coordenadas en espacio de la imagen del mismo punto, es posible calcular una aproximación al modelo de cámara de orificio. Esta aproximación es representada por una matriz \mathbf{P} , denominada matriz de cámara [Hartley y Zisserman, 2004] tal que $\mathbf{x}_i = \mathbf{P}\mathbf{X}_i$, para todo punto i . De la igualdad anterior se derivan las siguientes ecuaciones

$$x_i = \frac{p_{11}X_i + p_{12}Y_i + p_{13}Z_i + p_{14}}{p_{31}X_i + p_{32}Y_i + p_{33}Z_i + p_{34}} \quad y_i = \frac{p_{21}X_i + p_{22}Y_i + p_{23}Z_i + p_{24}}{p_{31}X_i + p_{32}Y_i + p_{33}Z_i + p_{34}} \quad (1)$$

Donde p_{ij} representan los elementos de la matriz \mathbf{P} . Se puede demostrar que las expresiones (1) pueden ser representadas como un sistema lineal de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -xX & -xY & -xZ & -x \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & Y & Z & 1 & -yX & -yY & -yZ & -y \end{bmatrix} \mathbf{p} = 0 \quad (2)$$

Donde \mathbf{p} es un vector de 12 elementos que presenta la forma mostrada en la siguiente expresión:

$$\mathbf{p} = (p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14}, p_{21}, p_{22}, p_{23}, p_{24}, p_{31}, p_{32}, p_{33}, p_{34})^T \quad (3)$$

Tomando en cuenta que el último elemento de la matriz \mathbf{P} representa un factor de escala, el cual puede ser elegido como $p_{34} = 1$, se puede obtener un sistema lineal de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -xX & -xY & -xZ \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & Y & Z & 1 & -yX & -yY & -yZ \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (4)$$

Donde $\tilde{\mathbf{p}}$ está formado por los primeros 11 elementos de \mathbf{p} . Los componentes de la matriz de cámara se obtienen solucionando el sistema de ecuaciones (4). Este proceso se realiza de manera independiente para cada cámara que integra el sistema de visión. A partir de las matrices de al menos dos cámaras y la información del punto objetivo en el espacio de imagen, es posible obtener los valores angulares que debe adoptar el robot para posicionarse en dicho punto, tal como se describe a continuación.

Configuración interna del manipulador

La etapa de posicionamiento del robot consiste en ejecutar los algoritmos de visión en conjunto con los algoritmos de control del robot, para lograr que el efector final se ubique en un punto objetivo seleccionado en la imagen. Este proceso se realiza de manera automática y es iterativo. En cada iteración la información de la posición del robot en espacio de cámara es actualizada empleando una serie de marcas visuales colocadas en el efector final. A partir de las marcas detectadas en la imagen, las matrices de cámara y la cinemática inversa del manipulador son actualizadas de manera local durante la maniobra del robot. Este proceso se realiza conforme el robot se va desplazando hacia el punto objetivo, tal como se describe en [Skaar *et al*, 1990]. Los valores angulares del robot son obtenidos mediante la minimización del funcional $\Gamma(\Theta)$ que aparece en seguida:

$$\Gamma(\Theta) = \sum_{j=1}^{nc} \left\{ \left[x_i^j - p_x(r_x^j(\Theta), r_y^j(\Theta), r_z^j(\Theta); \mathbf{P}^j) \right]^2 + \left[y_i^j - p_y(r_x^j(\Theta), r_y^j(\Theta), r_z^j(\Theta); \mathbf{P}^j) \right]^2 \right\} \quad (5)$$

Donde nc representa el número de cámaras participantes, (x_i^j, y_i^j) son las coordenadas del punto objetivo en la j -ésima cámara, \mathbf{P} representa la matriz de la j -ésima cámara, los valores (r_x^j, r_y^j, r_z^j) representan las coordenadas tridimensionales del punto objetivo referidas al origen del sistema coordenado del robot y que dependen del vector Θ que contiene los valores de la configuración angular del manipulador y p_x, p_y son las estimaciones actuales del punto objetivo en coordenadas de la imagen.

4 Plataforma de pruebas e implementación

Tal como se describió en la sección 2, la primera etapa de la plataforma para rehabilitación de robots fue la actualización del controlador del manipulador. Esta etapa consistió en el reemplazo de las tarjetas controladoras de movimiento. La segunda etapa consiste en la integración de un sistema de control por visión. Este sistema de control tiene como finalidad principal compensar los errores en el modelo cinemático del robot. Estos errores son debidos fundamentalmente al desgaste mecánico presente en sus componentes. La plataforma de control por visión en la que se realizaron las pruebas de validación fue conformada por el robot PUMA 761 con su controlador actualizado y equipo de visión convencional (Fig. 3). A continuación se describen de manera general los componentes que integran esta plataforma.



Fig. 3. Robot PUMA 761 con su computadora de control

Hardware

El sistema de control por visión está conformado por una computadora Pentium IV, que es la encargada de procesar la información visual obtenida a través de un frame grabber PCI Data Translation y de enviar la información al controlador del robot PUMA. La parte de visión está compuesta por dos cámaras CCD Sony SSCM383 B&W con una resolución de 640x480 pixeles. Estas cámaras tienen integrados unos lentes varifocales de 6.5-8.5 mm Rainbow modelo 1639VCS. En la Figura 4 se muestra un esquema general de los componentes principales de la plataforma descrita.

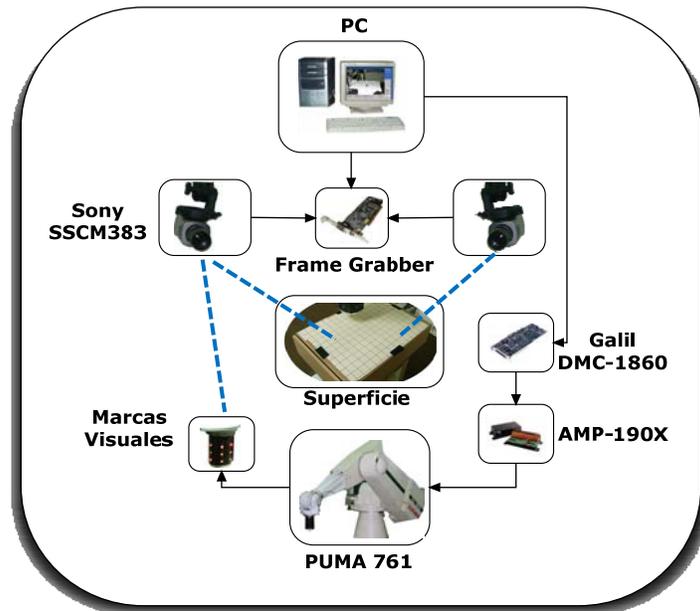


Fig. 4. Arquitectura del hardware del sistema de control por visión

Software

El software implementado se divide en 5 módulos principales: Interfaz de control, adquisición y procesamiento de imágenes, cálculo de matrices de cámara, los algoritmos de control del robot, y cálculo de la configuración del manipulador, tal como se describe a continuación.

La *interfaz de control* o interfaz gráfica de usuario (GUI por sus siglas en inglés), permite la interacción del usuario con el robot. Mediante esta GUI es posible seleccionar en pantalla los puntos objetivo, para que posteriormente se realice el posicionamiento del robot de manera autónoma mediante el sistema de control por visión. En esta interfaz están contenidos todos los módulos de software desarrollados.

El módulo de *adquisición y procesamiento de imágenes* contiene los algoritmos necesarios para la detección de las marcas visuales del robot a partir de las imágenes. Esta información sirve como referencia para obtener los parámetros de calibración del sistema de visión.

La parte de *cálculo de las matrices de cámara* involucra los algoritmos descritos en la sección 2. Tiene como información de entrada los datos obtenidos por el módulo de procesamiento de imágenes y devuelve las matrices asociadas a cada cámara.

En el módulo de *algoritmos de control del robot* están contenidos los programas que permiten la comunicación entre la PC y las tarjetas controladoras del robot. Incluye también los algoritmos del cálculo del modelo cinemático directo del manipulador y todos los algoritmos de control para manejar los dispositivos auxiliares como son las marcas visuales y el láser puntual.

Finalmente el bloque de *cálculo de la configuración del manipulador* contiene el proceso de solución de la expresión 8, que es parte fundamental en la metodología CSM, y permite realizar el cálculo de la cinemática inversa del robot a partir de la información visual.

Como se mencionó anteriormente, los algoritmos fueron programados en lenguaje C++, empleando el compilador “gcc” bajo el sistema operativo Linux, distribución Fedora. La interfaz de control fue desarrollada empleando las librerías gráficas de “QT designer”. La interacción de los componentes de software se muestra en la Fig. 5.

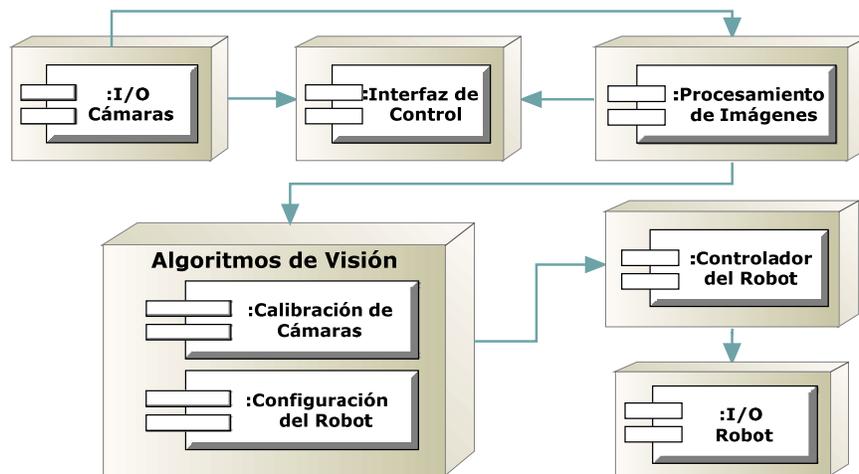


Fig. 5. Arquitectura de software de la plataforma de visión

5 Resultados experimentales

Después de realizar la validación y pruebas iniciales del controlador implementado se llevaron a cabo experimentos en tiempo real con el control basado en visión. Para validar la plataforma de rehabilitación, se realizaron un conjunto de pruebas de posicionamiento del robot. Cada prueba constó de tres partes fundamentalmente: selección del punto objetivo, posicionamiento del manipulador y medición del error.

La selección del punto objetivo se realizó de forma manual en cada experimento haciendo uso de un láser puntual. Este láser es proyectado sobre la superficie de posicionamiento del robot para facilitar su detección en la

imagen. La Figura 6 muestra la interfaz gráfica del software para selección de puntos objetivo y la mancha laser detectada en la imagen.

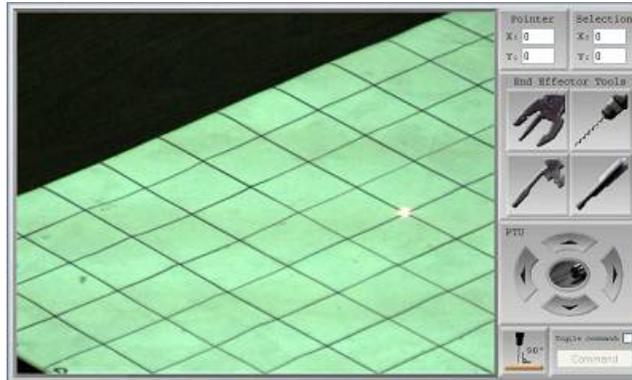


Fig. 6. Interfaz gráfica y mancha del láser proyectada sobre la superficie de posicionamiento del robot

Con la finalidad de poder ejecutar un número determinado de experimentos y poder medir la distancia entre el punto deseado y el punto alcanzado por el efector final, se dibujó una malla sobre la superficie de trabajo del robot, tal como aparece en la Figura 7a. Cada intersección de líneas representa un nodo objetivo, y sirve como referencia para la medición del error. El error δ definido como la distancia entre el nodo objetivo y la posición alcanzada por el efector final del robot se muestra en la fig. 7b.

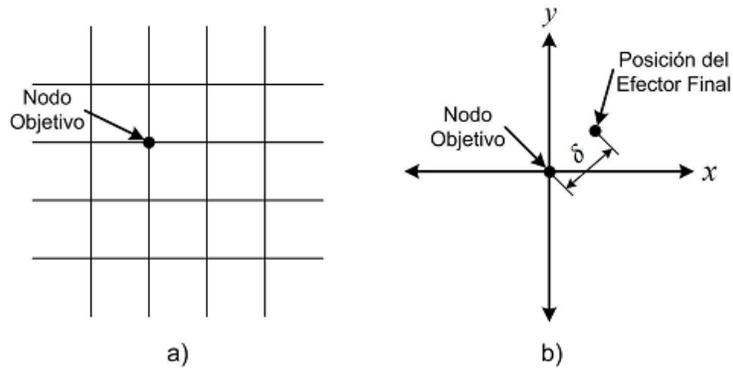


Fig. 7. Nodo objetivo y error de posicionamiento del robot. a) Malla de selección de nodos objetivo. b) Distancia δ entre el nodo objetivo y la posición final del robot

Una serie de pruebas de control de posicionamiento del robot fueron realizadas empleando la plataforma de visión descrita, de las cuales sólo 50 se documentaron. En la Figura 8a se muestra el histograma de los valores δ obtenidos para los 50 experimentos desarrollados. El valor promedio de error de posición obtenido fue 0.85 mm con una desviación estándar de 0.44. La Figura 8b muestra un ejemplo típico del punto alcanzado por el efector final del robot sobre la superficie de posicionamiento.

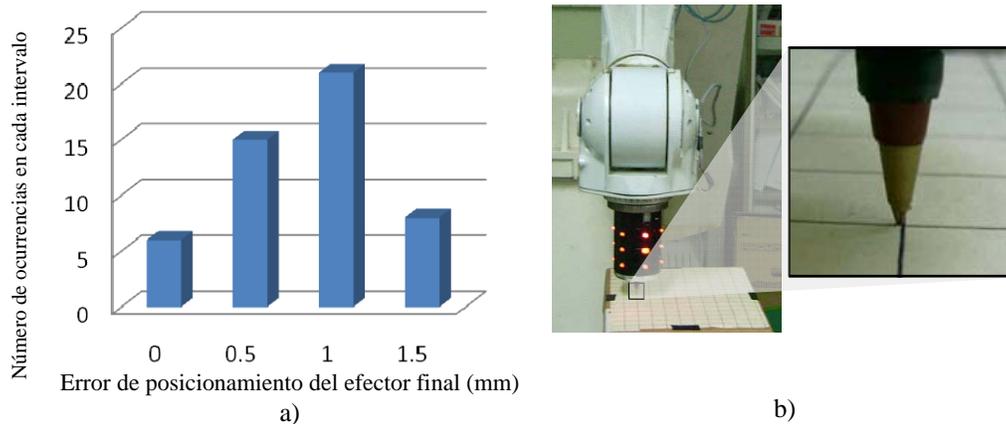


Fig. 8. a) Error de posicionamiento del robot para 50 experimentos empleando la plataforma de visión desarrollada.
b) Ejemplo de una tarea de posicionamiento del robot

6 Conclusiones y trabajo a futuro

Se logró desarrollar una plataforma de rehabilitación para robots industriales. Esta plataforma fue validada experimentalmente en un robot PUMA 761 para maniobras de posicionamiento.

El sistema mostró ser robusto a errores en el modelo cinemático ocasionados por el desgaste moderado presente en las piezas mecánicas. Estos errores son compensados por el control basado en visión conforme el efector final del robot se desplaza hacia el punto objetivo durante la maniobra de posicionamiento.

La plataforma de rehabilitación aquí presentada sustituye el control de origen del robot empleando una arquitectura abierta basada en componentes comerciales. El costo aproximado de los componentes de hardware implementados para el desarrollo de esta aplicación se estima en US\$10,000. Mediante este enfoque un robot industrial obsoleto puede ser rehabilitado invirtiendo aproximadamente el 20% del costo de un robot nuevo.

Con este trabajo se probó la factibilidad de la plataforma aquí descrita para la recuperación de robots obsoletos en la parte de control y con cierto desgaste mecánico. De acuerdo a los resultados obtenidos, esta tecnología puede ser aplicada a diversas tareas en las que los límites de tolerancia de posicionamiento sean del orden de 1.5 mm.

Como trabajo a futuro se encuentra un estudio de sensibilidad del sistema de control basado en visión que permita entender como se puede ajustar el sistema para obtener tolerancias mas cerradas. Además de este análisis, se encuentra en implementación una interfaz gráfica intuitiva que permita a un usuario con capacidad limitada, controlar robots a distancia usando Internet.

Reconocimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca de estudios otorgada a Marco A. García. Este trabajo ha sido parcialmente patrocinado por el CONACYT y CUDI, 100/328/04 C-428-04; Los autores agradecen también al Fondo de Apoyo a la Investigación (FAI) CO6-FAI-03-9.12 y al fondo del PROMEP para el desarrollo del cuerpo académico UASLP-CA-78.

Referencias

1. **Becerra, V.M.; Cage, C.N.J.; Harwin, W.S.; Sharkey, P.M.** "Hardware retrofit and computed torque control of a Puma 560 Robot updating an industrial manipulator". *Control Systems Magazine, IEEE*; Volumen 24, Número 5, Página(s): 78 – 82, Oct. 2004.

2. **Moreira N., Alvito P., Lima P.** “First steps towards an open control architecture for a PUMA 560”. Proc. 2nd Portuguese Conf. On Automatic Control. Porto (Portugal), Septiembre 11-13 1996.
3. **A. Valera, M. Vallés, J.L. Díez, R. Pizá, A. Sánchez.** “Utilización de Sensorización Externa en Robótica”. XXIV Jornadas de Automática, España, ISBN: 84-931846-7-5, Septiembre, 2003.
4. **Yanfei Liu; Hoover, A.W.; Walker, I.D.** “A timing model for vision-based control of industrial robot manipulators”. Transactions on Robotics, IEEE. Volumen 20, Número 5, Página(s): 891 – 898, Octubre 2004.
5. **Ahmet Denker and Tugrul Adigüzel.** “Vision Based Robotic Interception in Industrial Manipulation Tasks”. International Journal of Computational Intelligence. Volumen 3, Número 4, Página(s): 296-302.
6. **Markus S. Loffler, Vilas K. Chitrakaran, and Darren M. Dawson.** “Design and Implementation of the Robotic Platform”. Journal of Intelligent and Robotic Systems, Springer. ISSN 0921-0296 (Print) 1573-0409 (En línea). Volumen 39, Número 1, Página(s): 105-129, 2004.
7. **Seelinger MJ.** “<<Point-and-Click>> Camera-Space Manipulation and some Fundamental Issues regarding the Control of Robots using Vision”. Tesis Doctoral. Universidad de Notre Dame, Notre Dame IN, Página(s): 14-19, 1999.
8. **Hutchinson S., Hager G. D., Corke P. I.,** “A tutorial on visual servo control”, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Volumen 12, Página(s): 651—670, Octubre 1996.
9. **Zhang, Z,** “A flexible new technique for a camera calibration”. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol. 22,Número 11, Página(s):1330-1334, 2000.
10. **González Galván, Emilio Jorge, Cruz Ramírez, Sergio Rolando y Durán García, Héctor Martín.** “Aplicación de sensores múltiples para el posicionamiento tridimensional de robots usando visión”. INCI, Volumen 26, Número 11, Página(s) 541-546, nov. 2001.
11. **Skaar SB, Brockman WH, Jan WS.** “Three dimensional camera space manipulation”. International Journal of Robotics Research, Volumen 9, Número 4, Página(s):22-39, Agosto 1990.
12. **Cárdenas A, Seelinger M, Goodwine B, Skaar SB,** “Vision-Based Control of a Mobile Base and On-Board Arm”, Intenational Journal of Robotic Research, Volumen 22, Número 9, Página(s): 667-698, Septiembre 2003.
13. **Qun Ma, Cardenas A, Goodwine William, Skaar SB.** “Supervisory Control of a Mobile Robot Using Point-and-Click Mobile Camera-Space Manipulation” Proceeding of World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics. Volumen 9, Página(s):38-43, Julio 2000.
14. **Hartley, R. I. and Zisserman, A,** “Multiple view geometry in computer vision”, Cambridge University Press. 2004.
15. **Rendón, Juan M, García, Marco A, Cárdenas, Antonio, Lara, Bruno, González-Galván, Emilio** “Robot Positioning using Camera-Space Manipulation with a Linear Camera Model” Enviado a IEEE Transactions on Robotics. Actualmente en revisión, 2007.
16. **Cessati M, Bovet DP** “DMC-1700/1800 User Manual” Disponible en línea: <http://www.galil.com>, 2004.
17. **Chen, Huadong Sam,** “Error Analysis of Camera-Space Manipulation” PHD Thesis. Aerospace and Mechanical Engineering. Notredame, 2007



Marco A. García. Nació en Zacatecas, México en 1980. Recibió el título de ingeniero en electromecánica por el Instituto Tecnológico de Zacatecas en 2003. Recibió el título de Maestro en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí en 2007. Actualmente está realizando su tesis doctoral en el Centro de Investigación y Estudios de Posgrado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.



Antonio Cárdenas. Cuenta con su Ph.D en Ingeniería Mecánica por la Universidad de Notre Dame (2003) con área concentración en Robótica y Visión. Realizó su maestría en Ciencias de la Computación en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey- Campus Morelos y es Ingeniero Mecánico Electricista por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí . Actualmente es profesor Investigador del CIEP-FI de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Sus áreas de investigación son el control basado en visión de sistemas híbridos holonomicos/no-holonomicos; Integración multisensorial (rayos láser, ultrasonido, sensores de fuerza y momento, visión computacional) usando técnicas de Kalman para controlar robots móviles