

# Control servovisual de robots manipuladores: un enfoque hacia la industria

## *Servo-Visual Control of Handling Robots: Focused Towards Industry*

MAXIMILIANO BUENO LÓPEZ\*

MARCO A. ARTEAGA PÉREZ\*\*

### RESUMEN

La investigación actual en el control de robots se orienta fundamentalmente a incorporar de información sensorial externa que con la utilización de algoritmos avanzados de control permite la realización de tareas en medios parcialmente estructurados o con grandes incertidumbres. Dentro de los sensores utilizados en la actualidad los de visión se convierten en una interesante alternativa gracias a la cantidad de información que proporcionan. Los robots combinados con sistemas de visión se han incluido en los últimos años en los procesos de automatización no solo con fines de investigación, sino también a nivel industrial. En este artículo se revisa estado del arte de los sistemas de visión y robots manipuladores aplicados en la industria, posteriormente se mencionan los principales usos de estos y, finalmente, se presentan algunos algoritmos de control servovisual aplicados a robots industriales.

**Palabras clave:** control avanzado, control servovisual, robots manipuladores, sistemas de visión artificial.

### ABSTRACT

Nowadays, research related to robot control is oriented towards the incorporation of external sensorial information that, together with the use of advanced control algorithms, allows performing tasks in partially structured media or media with great uncertainty. Among the sensors currently used, vision sensors have become an interesting alternative due to the amount of information they provide. In recent years, robots with vision systems have been included in automation processes, not only aimed to research, but also in the industry. First, the present article shows a review of the status of vision systems and handling robots applied in the industry; later, it mentions its main uses and finally, it presents different servo-visual control algorithms applied to industrial robots.

**Keywords:** Advanced control, servo-visual control, handling robots, artificial vision systems.

FECHA DE RECEPCIÓN: 7 DE JULIO DEL 2012 • FECHA DE APROBACIÓN: 23 DE SEPTIEMBRE DEL 2012

\* Profesor vinculado a la Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad de La Salle, Bogotá-Colombia. Correo electrónico: maxbueno@unisalle.edu.co.

\*\* Profesor vinculado a la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Departamento de Control y Robótica. División de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Correo electrónico: marteagp@unam.mx.

## Introducción

En la actualidad existe un gran interés por realizar tareas con eficiencia y precisión en lugares donde la presencia humana se torna difícil, arriesgada e incluso imposible, por ejemplo: en el espacio exterior o en el fondo del mar. Para solucionar este problema es necesario el empleo de mecanismos autónomos o remotos que sustituyan a los seres humanos de la ejecución de una tarea y es gracias a esta necesidad que surgen los robots. Los robots industriales, desde su nacimiento en la década de los cincuenta, han evolucionado de manera sorprendente. Dicha evolución ha sido posible gracias a la investigación que se ha dado en diferentes disciplinas concernientes al campo de la robótica, como la mecánica y el control automático; disciplinas que han dotado a los robots de mejores diseños mecánicos pero, sobre todo, de algoritmos de control mucho más eficientes que son capaces de explotar al máximo sus cualidades mecánicas. Es común encontrar en la actualidad robots realizando diferentes tareas como:

- Inspección remota y mantenimiento preventivo de plantas nucleares para evitar la exposición humana a la radiación.
- Combinación de robots móviles con brazos robóticos para realizar tareas en lugares remotos a los que es difícil tener acceso.
- Corte, pulido, soldadura y pintura de piezas industriales aumentando la eficiencia del proceso y reduciendo el tiempo de ejecución de la tarea.
- Aplicaciones médicas como realización de telecirugías.

La capacidad sensorial y su respectivo nivel de integración constituyen otro factor clave en la evolución de los robots. Los sensores son propioceptivos y exteroceptivos y proporcionan al robot información útil para controlar sus movimientos, así como para medir y conocer su entorno. De todos los sensores que en la actualidad se emplean en los sistemas robotizados, el de visión es sin duda el que puede proporcionar la mayor cantidad de información necesaria acerca del ambiente y del propio robot para realizar con éxito una gran variedad de tareas; incluso, para complementar aquéllas donde la principal medición proviene de algún otro sensor pero, principalmente, es el que puede extender el campo de aplicación de los robots dotándolos de “inteligencia” y mayor versatilidad. Hoy en día son pocas las

aplicaciones que se encuentran de robots controlados a partir de información visual en la industria, esto se debe, entre varios otros aspectos, a que el análisis y diseño de las estrategias de control representan un trabajo verdaderamente desafiante, cuyos problemas radican sobre todo en la inestabilidad y en el bajo desempeño (Corke, 1996).

## El control visual de robots

El control visual de robots se define como:

El uso de información visual procedente de una o varias cámaras de video, ya sean fijas o móviles, para controlar la posición y/u orientación del efector final del robot con respecto a un objeto o a un conjunto de características visuales de este (dependiendo de la tarea por realizar) (Corke, 1996).

A menudo, cuando una persona se introduce por primera vez en este campo, suele confundir sistemas que poseen los elementos principales que aparecen en la definición, es decir, un equipo de visión combinado con un robot, con aquellos que se estudian en el control visual de robots, pero que son totalmente distintos. Considérese el siguiente ejemplo:

En la figura 1 se muestra un *Selective Compliance Articulated Robot Arm* (SCARA), que separa piezas mecánicas defectuosas o no defectuosas de acuerdo con la información proveniente de una cámara de video. En este caso, el sistema de visión compara la imagen que toma de cada pieza con un patrón previamente almacenado en memoria, para que, una vez efectuado el procesamiento, emita un comando hacia el controlador del robot, que le indique a este en qué banda debe colocar la pieza. Los movimientos necesarios son previamente “enseñados” al robot por un programador. Entonces, se observa que el robot no es directamente controlado por la información visual, simplemente ejecuta uno u otro movimientos previamente programados, de acuerdo a la señal dada. Ejemplos como este pueden encontrarse con regularidad en la industria; sin embargo, son casos ajenos al control visual.

A diferencia del caso anterior, en el control visual los movimientos del robot son alterados de forma paulatina por efecto de la información extraída e interpretada a partir del sistema de visión. De modo que cambios en el escenario visual modi-

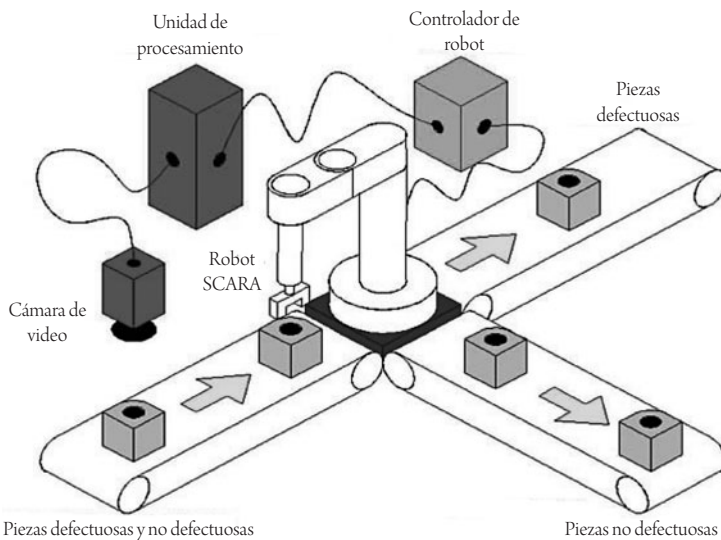


Figura 1. Célula para control de calidad de piezas mecánicas

Fuente: elaboración propia.

fican la conducta del robot. Existen algunos sistemas de control visual que operan en lazo abierto. Su forma de trabajo puede describirse de la siguiente manera: primero, se toma una o varias imágenes, a continuación, se extrae y se interpreta la información, posteriormente, se hace un razonamiento de la tarea que se tiene que ejecutar y, por último, se calcula y se realiza el movimiento requerido bajo la supervisión de un control articular, ya no se vuelve a ocupar la información visual. A este tipo de sistemas se les denomina *look-then-move* (ver y después moverse) (Corke, 1996). Al control que sí usa la información visual para cerrar el lazo de control suele denominarse *visual servoing*. A este campo pertenecen la mayoría de los sistemas que se estudian hoy en día y el trabajo aquí presentado, por lo que de ahora en adelante se hará referencia solo a estos y bajo el nombre de control servovisual. Supóngase un robot cuyo objetivo es insertar una pieza de precisión, en otra que tiene una cavidad con la forma de la primera. Para ello, el robot cuenta con una cámara de video montada sobre él (figura 2).

La pieza con la cavidad puede estar orientada, inicialmente, de cualquier manera con respecto al efector final del robot que lleva la pieza de precisión. Aquí se ilustra un ejemplo de lo que es el control servovisual, ya que en principio la imagen que se tiene del escenario es diferente a la imagen que se desea, es decir, aquella que debe

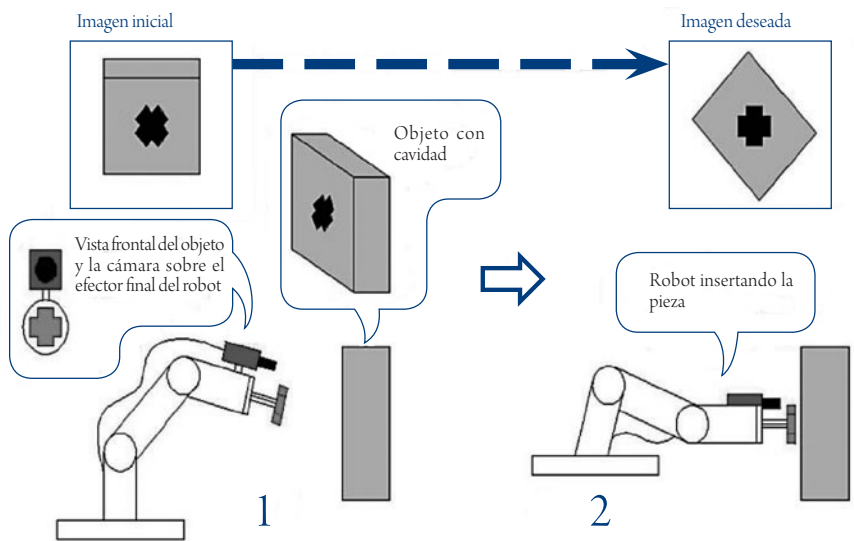


Figura 2. Inserción de pieza mediante un robot controlado visualmente

Fuente: elaboración propia.

“ver” el robot para poder insertar la pieza. La imagen deseada es la referencia que se introduce al sistema, para que en cada instante de tiempo se le compare con la real y en respuesta, el controlador ejecute la acción pertinente moviendo el robot hasta reducir el error a cero. Se muestra entonces cómo los movimientos del robot son controlados con base en la imagen obtenida en cada instante.

El control servovisual ofrece ventajas en relación con el control visual en lazo abierto; principalmente, ser independiente de la precisión de los sensores de visión así como de la precisión del robot. Sin embargo, cerrar el lazo de control aumenta las posibilidades de inestabilidad, lo cual complica en gran medida su desarrollo. La información que se extrae de las imágenes para su posterior interpretación se conoce como parámetros de imagen. Un parámetro de imagen es un valor real que representa a una característica de imagen, la cual, a su vez, es el resultado de la proyección en el plano de imagen de las características físicas de un objeto. Una característica de imagen puede ser un contorno, una línea, un punto, etc. Mientras que los parámetros podrían ser el perímetro del contorno, la longitud de la línea y las coordenadas de imagen del punto (Morales, 2010). De otra manera, si se tiene un conjunto de  $k$  parámetros, entonces:

$$p = [p_1, p_2, \dots, p_k]^T \in P \subseteq \mathfrak{R}^k \quad (1)$$

Donde:

$p$  es el vector de parámetros.

$P$  el espacio de los parámetros.

En los algoritmos que se desarrollan más adelante se tomó como característica de imagen un punto de interés, cuyos parámetros son las dos coordenadas de imagen asociadas a él. De modo que para tal caso se tiene:

$$p = [c_1, c_2]^T \in P \subseteq \mathfrak{R}^2 \quad (2)$$

La cámara de video puede tener dos configuraciones relativas al robot: estar fija en algún lugar del entorno o estar montada sobre el efector final. En el primer caso, la relación entre los marcos de referencia del robot y de la cámara es constante. La mayor ventaja que ofrece esta configuración es el amplio campo de visibilidad disponible, lo cual facilita el posicionamiento de la herramienta. En el segundo caso, la relación entre los marcos de referencia de la cámara y del efector final es variable. Las principales ventajas de este arreglo tienen información casi directa sobre el espacio de trabajo, así como una mayor resolución visual de este, lo que facilita la orientación del efector final. Aquí, la imagen obtenida sobre el objeto a manipular depende del movimiento del robot. En algunas ocasiones, un robot dispone de ambas configuraciones para auxiliarse, tanto de las ventajas de una como de la otra, incluso, la cámara móvil puede estar montada sobre un segundo robot observando al primero.

## Desarrollo histórico del control visual de robots

La historia del control visual de robots comenzó a principios de los años setenta cuando Shirai e Ionue, dos investigadores japoneses, probaron las ventajas de la retroalimentación visual al poner en marcha un robot, que ayudado por la información de una cámara de video fija, manipulaba un cubo y lo colocaba dentro de una caja (Corke, 1996). Probablemente no fueron los pioneros en el intento, pero

sí en tener éxito. Posteriormente, a finales de esa misma década, Hill y Park introdujeron el término *visual servoing* al desarrollar una investigación para controlar un robot UNIMATE (Hill y Patk, 1979).

Más tarde, a mediados de los años ochenta, Sanderson y Weiss propusieron una clasificación dentro de la cual se pueden agrupar todos los sistemas de control visual desarrollados hoy en día (Sanderson y Weiss, 1980). Muchos son los aportes que se han hecho desde aquel entonces, los cuales avanzaron de manera rápida una vez que se fueron desarrollando mejores sensores de visión y computadoras más poderosas (Chong, 2003). La tabla 1 presenta una lista de personas y sus contribuciones ordenadas de manera cronológica que cubre desde 1973 a 2010.

Tabla 1. Aportaciones al control visual de robots

AÑO	PERSONAJES	CONTRIBUCIÓN
1973	Shirai e Inoue	Muestran cómo una retroalimentación visual mejora la precisión de un robot
1973	Bolles y Paul	Aplicaciones para tareas de ensamble con sistemas look-then-move
1976	SRI International	Uso de información visual para inserción de piezas y manipulación de objetos móviles
1979	Hill y Park	Control visual de movimiento en 3D de un robot PUMA. Se les atribuye el término <i>Visual Servoing</i>
1979	R.E.Prajoux	Seguimiento visual de un objeto mediante un mecanismo de dos grados de libertad
1984	L. Weiss	Propone y prueba las técnicas de control adaptable para robots de hasta 3 gdl
1987	Sanderson y Weiss	Realizan estudios para elaborar una clasificación de los sistemas de control visual
1989	Harrel y Slaughter	Diseño e implementación de un robot recolector de frutas controlado con visión
1989	J. T. Feddema	Desarrollo de la generación de trayectorias en el espacio de características de imagen
1989	Rives, Espiau y Chaumette	Empleo del método de la función tarea para el control de posición
1991	Hashimoto	Elabora un estudio comparativo entre las técnicas de control visual basadas en imagen y en posición
1995	Weiss y Papanikolopoulos	Aplicación de controles PI, PID, LQG y asignación de polos
1995	Papanikolopoulos	Empleo de LQG y asignación de polos

Continúa

1996	Sandini, Wilson y Martinet	Aportes en control visual basado en posición
1996	Suh y Welles	Recurren al uso de redes neuronales
1997	De Schutter, Morel y Mailis	Integran los sensores de visión y fuerza
1998	Hashimoto	Implementación de control óptimo
1998	Khadraoui	Empleo del control robusto y $H_{\infty}$
1999	Gangloff	Diseño de un controlador general predictivo
2000	Malis, Martinet y Cervera	Aplicación de la visión estereoscópica
2002	Mezouar	Estudio de la generación de trayectorias para control visual
2002	Martinet y Siciliano	Aporte al esquema de control visual basado en posición
2002	Malis	Control servovisual invariante
2002	Corke y Hutchinson	Control servovisual particionado
2002	Kragic	Control servovisual robusto
2002	Zhang	Avances en el proceso de calibración
2003	Zergeroglu	Inclusión de la dinámica no lineal del robot en el diseño del control servovisual
2004	Carelli	Combinación de visión y fuerza sobre una superficie plana
2005	Pomares y Torres	Combinación de visión y fuerza sobre una superficie curva
2006	Dean León y Cheah	Combinación de visión y fuerza con incertidumbre en los parámetros del robot y la cámara
2007	Dixon y Braganza	Control de posición con incertidumbre en los parámetros de la cámara
2009	Wangs y Pratas	Control de posición con incertidumbre en la geometría del entorno
2010	Karayiannidis, Dougleri y Wang	Control servovisual en tres dimensiones

Fuente: elaboración propia.

## Importancia y aplicación del control visual de robots en la industria

La notable presencia y el confiable desempeño de que gozan los robots actualmente en las labores de manufactura parecieran indicar que los problemas de la robótica industrial han sido en su totalidad resueltos. Sin embargo, aún existen dificultades prácticas y teóricas por afrontar. Si se considera, por ejemplo, la



distribución poblacional de robots por industria, se advierte el gran acaparamiento de los sectores automotor y eléctrico, más del 50 % (Ortamier, 2005). En otros sectores, los robots no han tenido gran éxito; una de las principales razones es la necesidad de proporcionar al robot un entorno altamente estructurado para su correcto funcionamiento. Esto, sin lugar a dudas, eleva considerablemente el costo de implementación, volviendo al sistema robotizado poco rentable para ciertas industrias, lo cual, teniendo en cuenta que el costo de una célula de manufactura, generalmente, es cuatro veces más el precio del propio robot. Un elemento útil para reducir el nivel de estructuración del entorno puede ser el control visual, ya que al agregar la visión a un robot, este podría operar con piezas y herramientas sin que cuenten con una forzosa y específica orientación, prescindir del uso de efectores finales altamente especializados e incluso, trabajar en diferentes líneas de ensamble a la vez, en pocas palabras, necesitaría de dispositivos periféricos menos complejos y en menor cantidad. También sería posible reducir el tiempo necesario para programar una tarea al robot, programación generalmente manual, que debe realizarse cada vez que las especificaciones del producto a manipular cambien.

Aparte de las ventajas mencionadas y entre muchas otras, el control visual puede incrementar notablemente la precisión de un robot sin necesitar de diseños avanzados y sin importar los efectos de inexactitud generados por conjuntos mecánicos entre engranes, bandas o cadenas. En el contexto industrial, muchas son las tareas donde el control visual ha encontrado aplicación: el ensamble de piezas, la manipulación de objetos, el maquinado y la realización de tareas conjuntas humano-robot. Son también comunes las investigaciones para controlar robots paralelos planares y no planares mediante la observación de la plataforma y los brazos (Tahri et ál., 2009).

De la misma manera, existen otros campos en los cuales el uso de robots manipuladores guiados visualmente se considera con gran potencial, uno de ellos es el de la medicina (Martinet, 2004). En esta área se analizan y estudian las cirugías robotizadas de cerebro, huesos, corazón y aquellas donde la invasión mínima de los instrumentos es necesaria. Las ventajas principales radican en mayor precisión, aplicación de fuerzas mejor controladas e incremento de la destreza. Por otra parte, es importante mencionar que no sólo los robots industriales pueden ser controlados visualmente; en general, se puede controlar cualquier otro sistema mecánico, ya sea un vehículo, un robot móvil, etc. Fuera de la robótica se han realizado experimentos para controlar visualmente el movimiento de vehículos no tripulados (Guenard

et ál., 2009). En aeronáutica se pretende controlar el aterrizaje sin la intervención de los pilotos, mientras que en agricultura, realizar de manera automática la recolección de frutos. En biología se han llevado a cabo pruebas en las cuales el sensor consiste en un sistema de visión formado por un microscopio especial capaz de entregar una cantidad elevada de cuadros por segundo, cerca de mil, mientras que los actuadores se constituyen de electrodos que aplican un voltaje variable, el cual obliga a los microorganismos a moverse hacia determinada dirección. En general, el campo de aplicación del control visual es muy extenso, ya que son bastantes los sistemas en los cuales la visión puede representar un avance significativo; sin embargo, en la mayoría de los casos, particularmente aquellos externos a la robótica, el desarrollo se encuentra aún en la fase experimental.

En la mayoría de las leyes de control de trayectoria para robots manipuladores, las mediciones necesarias son obtenidas a partir de *encoders* ubicados en las articulaciones (Tayebia, 2006; Hutchinson y Chaumette, 2007). Cuando este opera en un ambiente no estructurado, una alternativa es emplear sistemas de visión para obtener la posición del efector final requerida por el controlador, como lo mencionan (Hager y Corke, 1996; Chaumette y Hutchinson, 2006). El uso de cámaras en el control de robots manipuladores se ha incrementado en los últimos años debido a su buen comportamiento (ejemplo de esto son las publicaciones de Lizarralde et ál., 2008; Lian, 2006; Weng et ál., 2010).

En Lizarralde et ál. (2008) se propone un controlador adaptable para robots manipuladores planares empleando servovisión. El algoritmo es desarrollado para sistemas visuales basados en imagen y permite el seguimiento de una trayectoria deseada cuando la calibración de la cámara y la dinámica del robot son inciertas. En Weng et ál. (2010) se presenta un controlador adaptable para seguimiento de trayectoria basado en la imagen sin medición de velocidad; los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara no son calibrados. Para evitar el pobre comportamiento causado por errores en las mediciones de velocidad, un estimador en coordenadas de imagen es propuesto. Otra aplicación del control servovisual es presentada en Tonet et ál. (2008), donde se propone un control adaptable; esta es una de las técnicas más utilizadas en el área del control visual de robots manipuladores. En la industria es cada vez común encontrar plantas y líneas de producción completamente automatizadas, en estas los robots ocupan un papel importante. En septiembre de 2011 la Federación Internacional de Robótica (IFR) reportó un máximo histórico de robots industriales alimentado por un alza de 18 % en ventas

durante ese año. Se espera que la cantidad robots industriales a finales de 2014 sea de 1,3 millones. En Latinoamérica, México y Brasil dominan el mercado. Un 16 % menos de robots fueron enviados en 2009 a México (900 unidades). La mayoría de estos robots fueron enviados a la industria automotriz. A pesar de la disminución de la oferta de robots en 2010, México comenzó a ganar importancia como un centro de producción para la industria, debido a menores costos. En 2010, 640 robots industriales fueron suministrados a Brasil, el 29 % más que en 2009. Múltiples industrias emplean robots manipuladores en sus procesos de producción, algunos ejemplos son los siguientes:

*FlexPicker (ABB)*. La empresa especializada en robots ABB ofrece un producto que promete ser una base para implementar aplicaciones de recolección a alta velocidad fácilmente y con un mínimo de programación. La unidad básica del sistema consta de una o dos bandas transportadoras, una cámara y un robot IRB360 (paralelo) todos orquestados por el *software* PickMaster, en la figura 3 se observa esta plataforma. El *software* ofrece la facilidad de agregar elementos a la línea de producción de manera gráfica e integrarlos sin necesidad de programación, cuenta con una cámara perfectamente integrada al sistema que encuentra los objetos de interés, pudiendo diferenciarlos de otros objetos en la misma banda y le permite al robot conocer el punto exacto en el espacio tridimensional al cual se tiene que dirigir para recolectarlo. La calibración de la cámara se hace, de un modo muy sencillo, utilizando una cuadrícula especial que permite conocer el origen de los ejes  $x$  y  $y$ , el tamaño real de los objetos y su posición en la banda transportadora. Gracias a estas características, poner en marcha aplicaciones de colección y colocación a alta velocidad es sencillo. Este tipo de aplicaciones es muy común en líneas de producción que se dedican a empaque de productos.

*Sellado (Mercedes-Benz)*. En la planta de coches de Mercedes-Benz en Alemania se utilizan robots KUKA articulados guiados por visión que emplean un modelo cámara ojo en mano para aplicar sellador al chasis de los automóviles o ensamblar estos de una manera más eficiente, en la figura 4 se observa este proceso.

*Recubrimiento de aspas (Enercon)*. La empresa alemana Enercon se dedica a la fabricación de turbinas de viento para generadores eólicos que van desde los 800 hasta los 7580 KVA. Para aplicar el recubrimiento que protege a las aspas del deterioro por factores ambientales, utilizan una cámara de recubrimiento y secado automatizada con dos robots articulados montados sobre rieles que les permiten

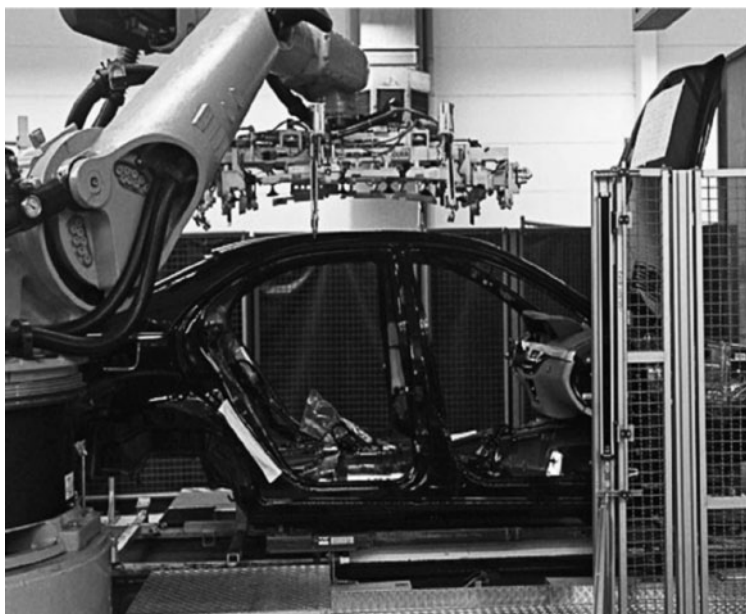


---

Figura 3. FlexPicker (ABB)

Fuente: <http://www.abb.com>

---



---

Figura 4. Ensamblaje de vehículos

Fuente: <http://www.businessweek.com>

---

desplazarse a lo largo de la cámara. Dado que la empresa produce una variedad de rotores y, por tanto, de aspas, era necesario lograr flexibilidad en la automatización de esta cámara de pintura. Esta flexibilidad se logró implementando un sistema de servocontrol (figura 5) en el que se utilizan varias cámaras, debido a la longitud del espacio de trabajo, para detectar la posición del aspa y dirigir los robots pintores. Mediante este sistema es posible lograr un excelente control de calidad y gracias a su precisión, también se logra optimización, ya que se logra que el recubrimiento sea tan grueso como se necesita pero al mismo tiempo tan delgado como sea posible.



Figura 5. Aplicación de recubrimiento en una turbina

Fuente: <http://www.enercon.de/de-de/>

## Problemas en desarrollo

A pesar de que la historia en este tema comenzó a principios de los años setenta, la aplicación de los sistemas de control servovisual se encuentra, principalmente, en las áreas experimentales y de investigación, ya que las soluciones de múltiples problemas, que permitan llevarla al “mundo real”, no han sido dadas de manera definitiva. La problemática parece centrarse en los terrenos de las ciencias computacionales, donde se trabaja arduamente en la visión por computadora, el diseño de “cabezas” robóticas y de sistemas de visión inspirados biológicamente (Tayebia, 2006).

En el campo del control automático queda mucho trabajo por hacer. El desarrollo de dicho trabajo se irá beneficiando en la medida en que los sensores y el *hardware* disponibles continúen ofreciendo mayores prestaciones. En primer lugar, la mayoría de los sistemas presentados en la literatura están desarrollados en el espacio de imagen, ante lo cual queda la pregunta si es posible especificar las tareas comunes que realiza un robot cotidianamente en este espacio. De ser así, el estudio para definir trayectorias en espacio de imagen ha sido poco investigado. Faltaría además desarrollar herramientas virtuales e interfaces de operación que permitan programar tareas a los robots visualmente controlados. Por un lado, es latente el problema de la pérdida de información visual cuando se ejecuta una tarea, es decir, qué hacer cuando por los propios movimientos del robot o por los de algún objeto involucrado las características de imagen elegidas desaparecen momentáneamente o por un periodo largo. Para afrontar esta dificultad se han venido probando diferentes ideas. En García et ál. (2005) se presenta un esquema de control que utiliza el cambio de visibilidad en las características de imagen. Las estrategias que utilizan predictores de oclusiones y estimadores de los parámetros de imagen ocluidos, basados en el filtro de Kalman, son también investigadas (Lipiello et ál., 2007). Otro problema de considerable importancia es el hecho de contar con una adecuada calibración del sistema de visión, ya que el desempeño del sistema completo depende en buena medida de la aproximación que se haga de la matriz de interacción y de la forma en que se elija a esta, particularmente en los sistemas monoculares. Por esta razón, es mejor disponer de esquemas de control que no requieran de un procedimiento de calibración. Al respecto, en Wang et ál. (2008) se diseña un sistema de cámara móvil no calibrado, mientras que en Liu et ál. (2006a) se expone un sistema de cámara fija igualmente no calibrado, ambos esquemas utilizan leyes de control adaptable para estimar los parámetros del sistema de visión. Además de los problemas citados, un factor importante para el diseño de controladores servovisuales es el hecho de modelar de manera precisa la dinámica del robot.

Son pocos los trabajos que no emplean el modelo del robot en la ley de control o que consideran las incertidumbres de dicho modelo. En Akella (2005) se exhibe un controlador adaptable para manejar la incertidumbre en el modelo dinámico de un sistema formado por un robot planar de dos eslabones que emplea una cámara fija. En ese esquema se utiliza además un segundo lazo de control adaptable para estimar los parámetros del sistema de visión. Por último, es importante mencionar la necesidad de trabajar en el desarrollo de nuevas y mejores estrategias de control que permitan a los sistemas servovisuales gozar de mayor desempeño. Son varias

las técnicas novedosas de control con las cuales se ha experimentado. Gans (2007) presenta un esquema de control conmutado que se apoya en las estructuras de control servovisual de imagen y de posición. El cambio entre una estructura u otra se realiza con base a la más adecuada para determinado momento de la tarea que se ejecuta, a diferencia del control servovisual híbrido, en el que ambos esquemas se utilizan de manera conjunta.

El control servovisual de robots continúa teniendo muchos retos; no se sabe cuándo quedarán resueltos la mayoría de sus problemas en los que hoy trabaja la comunidad científica interesada en el tema. Sin embargo, se augura un futuro prometedor, en el cual esta técnica, para controlar robots, quedará bien establecida como cualquiera de las ya conocidas, ofreciendo mejores prestaciones y con esto incrementando notoriamente las aplicaciones de la robótica.

## **Importancia de la robótica en el desarrollo de la automatización**

El sector de la robótica y la automatización es uno de los sectores tecnológicos más importantes, puesto que en él no solamente se producen sistemas, equipos, *hardware* y *software*, sino que también se diseñan e integran sistemas para soluciones. Su rapidez para incorporar nuevas tecnologías en los productos y llevarlos al mercado lo hace uno de los sectores más dinámicos siendo, en muchos casos, el motor del desarrollo de muchas de esas tecnologías capaces de incorporar de inmediato la experiencia acumulada en el uso de sus sistemas. Una de sus mayores diferencias con otros sectores es la adaptación de los sistemas a las necesidades de las empresas que, en muchos casos, son dinámicas y reconfigurables. La actualización, la diversificación y la continua relación con el usuario son otras de las características importantes del sector.

Se pueden destacar cuatro ventajas principales de los sistemas robotizados:

- **Productividad:** la introducción de robots en operaciones como soldadura, manipulación de productos, pintura, ensamblado, almacenaje o control de calidad, permite reducir sustancialmente el tiempo de las operaciones, aumentando la productividad y reduciendo los costos.



- Flexibilidad: los sistemas robotizados actuales destacan por ser máquinas y sistemas flexibles que pueden adaptarse a la fabricación de una familia de productos sin la necesidad de que se modifique o se detenga la cadena de producción.
- Calidad: la repetitividad de las tareas realizadas por los robots y el control de productividad en todos los ámbitos de la industria permiten asegurar un alto nivel de calidad del producto final. Además, los sistemas robotizados no solo se emplean para la fabricación sino también para medir la calidad del producto final mediante sistemas mecánicos u ópticos.
- Seguridad laboral: la introducción de robots en operaciones tales como soldadura y pintura o manipulados de sustancias peligrosas o de materiales a altas temperaturas permiten la eliminación de tareas laborales penosas y la disminución de accidentes laborales.

## Algoritmos de control servovisual

En la actualidad la mayoría de algoritmos de control empleados en la industria están basados en la conocida estrategia PID; sin embargo, se hace interesante empezar a probar otras técnicas más avanzadas que permitan obtener mejores resultados en las aplicaciones desarrolladas. Cuando se va a controlar de manera visual un robot manipulador, se define previamente cómo se realizará la detección del efector final que es el lugar donde se ubicará la herramienta que finalmente realizará la acción de interés. El control puede ser en 2D o 3D, teniendo para esto diferentes alternativas de ubicación de las cámaras como ya se mencionó previamente.

Los controladores adaptables se convierten en una interesante alternativa ya que permiten manejar la incertidumbre que se tiene en los parámetros de la cámara y del robot, algunos aportes en este campo se encuentran en Parra-Vega et ál. (2003) y Zergeroğlu et ál. (2001). Otra de las técnicas interesantes en esta área es la lógica difusa, puesto que permite, a partir del conocimiento de un experto, modelar sistemas complejos como el conformado por el robot y la cámara. En esta área no se encuentran muchos trabajos y es un tema en pleno desarrollo. Arteaga et ál. (2009) presenta otra alternativa que está basada en un controlador PID con un término deslizante que permite suavizar la trayectoria a seguir y además tiene un observador de velocidad. Para obtener los resultados experimentales de algunos algoritmos



servovisuales que se presentarán a continuación fue necesario realizar la puesta a punto de dos plataformas con sus respectivos sistemas de visión y adquisición.

Se utilizó el robot A465 de *CRS Robotics*. Este tiene seis grados de libertad; no obstante, para las pruebas en 2D y 3D se utilizaron solo dos y tres articulaciones, respectivamente. Los primeros experimentos se realizaron utilizando la cámara *UNIC UF-1000CL*, la cual tenía una tasa máxima de adquisición de 400 fps a una resolución de  $320 \times 240$  (cámara fija). En el efector final se fijó un objeto de circular de color negro, el cual presentaba problemas para su detección debido a las condiciones de luminosidad. El sistema de visión se cambió y se utilizó la cámara monocromática CCD (*Pike F-505B*). A máxima resolución se obtienen imágenes a una tasa de 15 fps y  $2452 \times 2054$  píxeles. Los datos se envían a través de FireWire (IEEE-1394). Un objeto circular luminoso se fija en el efector final para las pruebas en 2D y un objeto esférico para las pruebas en 3D. La imagen adquirida es procesada utilizando *Microsoft Visual C++ 6.0* para obtener el centroide del objeto luminoso. La configuración para las pruebas en 2D es mostrada en la figura 6. La inclusión del objeto luminoso permitió realizar con una mejor precisión el centroide del elemento fijo en el efector final. Para las pruebas en 3D se utilizó la configuración mostrada en la figura 7. Los algoritmos en 2D fueron también probados en el robot LAW3 de SCHUNK el cual está disponible en Laboratorio de



Figura 6. Robot A465 de *CRS Robotics* con sistema de visión en 2D

Fuente: robot ubicado en el Laboratorio de Robótica de la UNAM.



Figura 7. Robot A465 de CRS Robotics con sistema de visión en 3D

Fuente: robot ubicado en el Laboratorio de Robótica de la UNAM.

Controle e Automação, Engenharia de Aplicação e Desenvolvimento de la Universidad Federal de Rio de Janeiro. En la figura 8 se muestra esta plataforma. Se han utilizado dos diferentes bancos de pruebas para demostrar la universalidad de los algoritmos.

## Resultados experimentales

Se ha realizado un experimento para probar tres tipos de algoritmos diseñados empleando control servovisual en 2D (algoritmo adaptable, algoritmo difuso y algoritmo PID). El objetivo es que el efector final del robot manipulador siga

una trayectoria circular en el plano de imagen que se denota como  $\gamma_1 - \gamma_2$ . En los experimentos se define como punto objetivo un elemento luminoso fijo en el efector final. La cámara esta aproximadamente a 1,50 m del plano de movimiento del robot. En la figura 9 se muestra la trayectoria deseada y las salidas de los tres controladores. Para tener un mejor punto de comparación las condiciones iniciales son iguales para todos. Se puede apreciar que la trayectoria deseada es seguida de manera correcta en los tres casos.

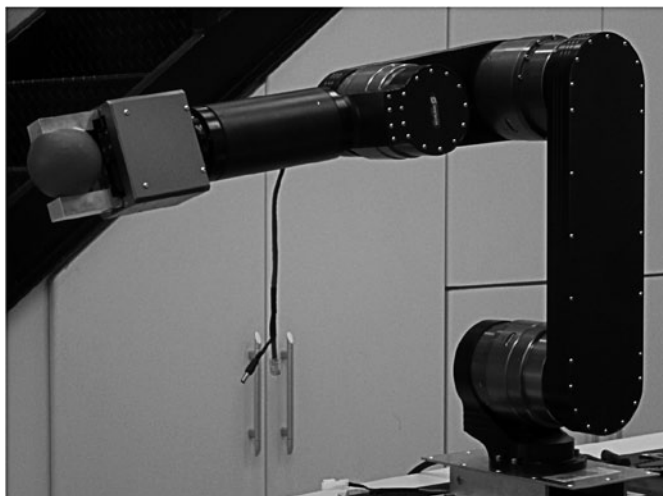


Figura 8. Robot LAW3

Fuente: robot ubicado en la Universidad Federal de Río de Janeiro.

El error de seguimiento y observación para los diferentes algoritmos es mostrado en las figuras 10 y 11. La ventaja de los modelos difusos T-S es su potente capacidad para representar una relación compleja no lineal, a pesar de un número menor de reglas difusas IF-THEN que el modelo Mamdani. El diseño es simple y no requiere mucho de matemáticas. Por el contrario, a los enfoques adaptables, donde se calcula el regresor  $y$ , por tanto, el modelo del robot es necesario. Obsérvese que esto hace que sea también menos sensible cuando la dinámica del motor no se considera. Por otro lado, con respecto a la finalización del experimento, en este artículo no se dan detalles de los algoritmos, ya que el objetivo consiste solo en mostrar su correcto funcionamiento y demostrar que incluir una cámara en el lazo de realimentación permite obtener un excelente comportamiento, si el lector está interesado en profundizar sobre estos puede consultar Arteaga et ál. (2009; Lizarralde et ál. (2008) y Bueno y Arteaga (2010).

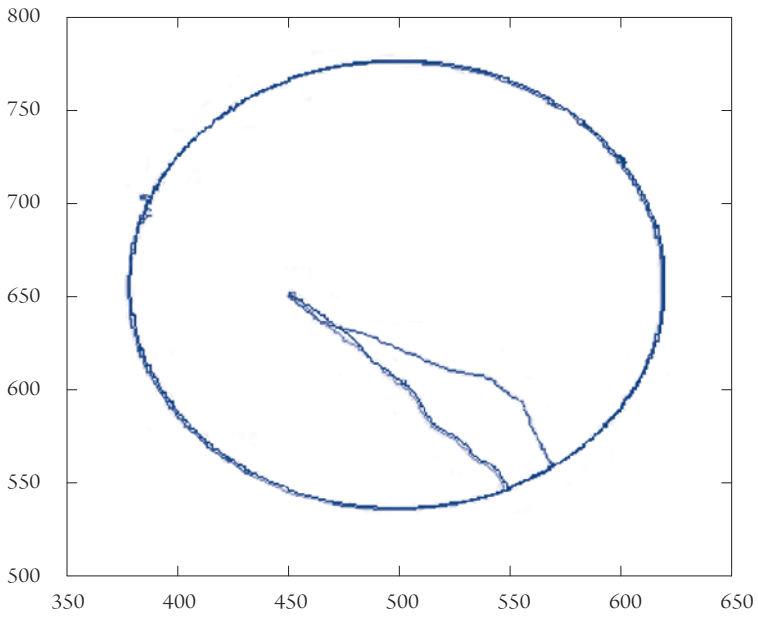


Figura 9. Trayectoria en coordenadas de imagen

Fuente: resultados obtenidos con robot CRS A465.

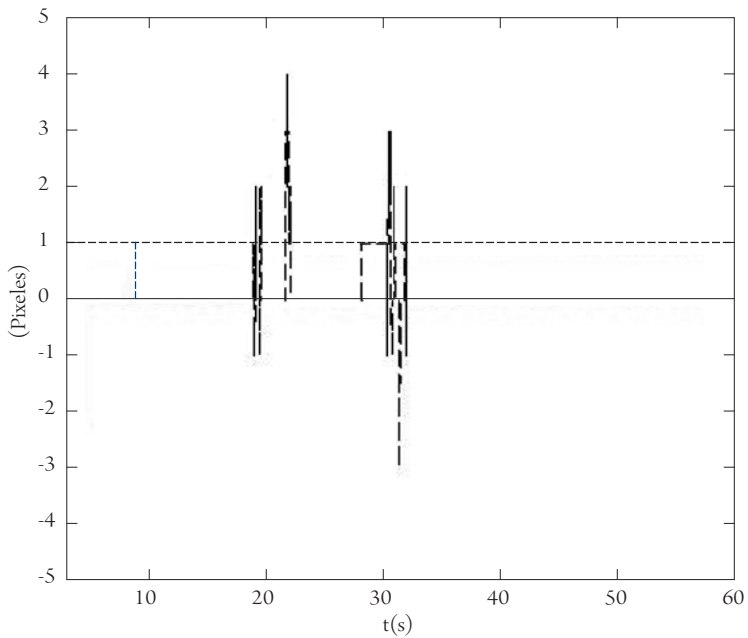


Figura 10. Error de seguimiento

Fuente: resultados obtenidos con el Robot CRS A465

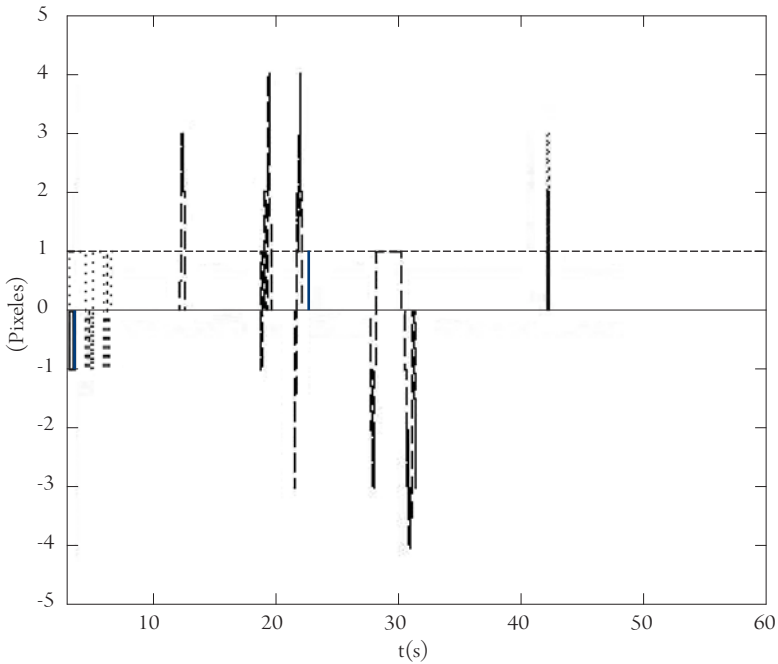


Figura 11. Error de observación

Fuente: resultados obtenidos con Robot CRS A465

## Conclusiones

En este artículo se ha hecho un resumen del estado del arte del control servovisual de robots manipuladores y, además, se han mencionado los principales aportes a través de la historia. Este trabajo se convierte en una alternativa interesante para aquellos que están comenzando a incursionar en esta temática, además se han presentado resultados de algoritmos propios, los cuales demuestran los beneficios de aplicar servovisión en el control de robots manipuladores. Los resultados pueden ser mejorados a partir de la sintonización de los parámetros que aparecen en las leyes de control y pueden compararse con otros algoritmos para concluir sobre la robustez de estos. Una alternativa a considerar para trabajos futuros es cambiar la configuración de las cámaras, es decir, su ubicación y obtener nuevos modelos que disminuyan las restricciones.

## Referencias

- Akella, M. (2005). Vision-based adaptive tracking control of uncertain robot manipulators. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(4), 748-753.
- Arteaga, M.; Bueno, M y Espinoza, A. (2009). A simple approach for 2D visual servoing. En 18<sup>th</sup> IEEE International Conference on Control Applications. Part of 2009 San Petesburgo: IEEE Multi-conference on Systems and Control.
- Bueno M. y Arteaga, M. (2010). Fuzzy logic control of a robot manipulator in 3D based on visual servoing. En 18th IFAC World Congress. Milán.
- Chaumette, F. y Hutchinson, S. (2006). Visual servo control. Part I: Basic approaches. *IEEE Robotics Automation Magazine*, 13(4), 82-90.
- Chong, M. (2003). *Visual servoing* [tesis de maestría en Ingeniería]. Singapur: National University of Singapore.
- Corke, P. (1996). *Visual Control of Robots: high performance visual servoing*. Australia: Research Studies Press LTDCSIRO. Division of Manufacturing Technology.
- Gans N. y Hutchinson, S. (2007). Stable visual servoing through hybrid switched-system control. *IEEE Transactions on Robotics*, 23(3), 530-540.
- García-Aracil, N.; Malis, E.; Aracil-Santoja, R. y Pérez-Vidal, C. (2005). Continuous visual servoing despite the changes of visibility in image features. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(6), 1214-1220.
- Guenard, N.; Hamel, T. y Mahony, R. (2008). A practical visual servo control for an unmanned aerial vehicle. *IEEE Transactions on Robotics*. 24(2), 331-340.
- Hager, G. y Corke, P. (1996). A tutorial on visual servo control. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(1), 651-670.
- Hill, J. y Park, W. (1979). Real time control of a robot with a mobile camera. En 9th International Symposium on Industrial Robots-ISIR. Washington, D.C.
- Hutchinson, S. y Chaumette, F. (2007). Visual servo control. Part II: Advanced approaches. *IEEE Robotics Automation Magazine*, 14(1), 109-118.
- Lian, K.; Tu, W. y Liou, J. (2006). Stability conditions for LMI based fuzzy control from viewpoint of membership functions. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 14(6), 874-884.
- Lipiello, V.; Siciliano, B. y Villani, L. (2007). Position-based visual servoing in industrial multirobot cells using a hybrid camera configuration. *IEEE Transactions on Robotics*, 23(1), 73-86.
- Liu, C.; Cheach, C. y Slotine, J. (2006). Adaptive Jacobian tracking control of rigid-link electrically driven robots based on visual task-space information. *Automática*, 9(42), 1491-1501.

- Liu, Y.; Wang, H. y Lam, K. (2006a). Uncalibrated visual servoing of robots using a depth-independent interaction matrix. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(4), 804-817.
- Lizarralde, F.; Hsu, L. y Costa, R. (2008). Adaptive visual servoing of robot manipulators without measuring the image velocity. En *17th World Congress The International Federation of Automatic Control*. Seúl, Corea.
- Martinet, P. (2004). *Tutorial on advanced visual servoing. Part I: Introduction to visual servoing*. Clermont-Ferrand: Blaise Pascal University.
- Morales, A.L. (2010). *Control de posición en 3D de un robot por retroalimentación visual*. México: Maestría en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ortmaier, T. (2005). *Medical applications of visual servoing*. Institute of Robotics and Mechatronics. German Aerospace Center (DLR), Munich, Alemania.
- Parra-Vega, V.; Fierro-Rojas, J. y Espinosa-Romero, A. (2003). Adaptive sliding mode uncalibrated visual servoing for finite-time tracking of 2D robot. *International Conference on Robotics and Automation*, 3(3), 3048-3054.
- Sanderson, A. y Weiss, L. (1980). Image-based visual servo control using relational graph error signals. En *IEEE International Conference on Cybernetics and Society*.
- Tahri, O.; Mezouar, Y.; Andreff, N. y Martinet, P. (2009). Omnidirectional visual-servo of a gough-stewart platform. *IEEE Transactions on Robotics*, 25(1), 178-183.
- Tayebia, A. y Islam, S. (2006). Adaptive iterative learning control for robot manipulators: Experimental results. *Control Engineering Practice*, 14(1), 843-851.
- Tonet, O.; Focacci, F.; Piccigallo, M.; Mattei, L. y Quaglia, C. (2008). Bioinspired robotic dual-camera system for high-resolution vision. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(1), 55-64.
- Wang, H.; Liu, Y. y Zhou, D. (2008). Adaptive visual servoing using point and line features with an uncalibrated eye-in-hand camera. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(4), 843-857.
- Weng, H.; Liu, Y. y Chen, W. (2010). Uncalibrated visual tracking control without visual velocity. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 18(6), 1359-1370.
- Zergeroglu, E.; Dawson, D.; Queiroz, S. y Behal, A. (2001). Vision based nonlinear tracking controllers with uncertain robot camera parameters. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 6(3), 332-337.

