

# Cámara Virtual de Referencia: Una Aproximación para el Guiado Combinado de Robots Manipuladores mediante una Única Cámara

J. Pomares\*, G. J. García, I. Perea, C. Jara, F. Torres

*Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, Universidad de Alicante, Apdo. Correos 99, 03080, Alicante, España*

## Resumen

En este artículo se presenta el modelado, diseño y control visual de una estructura articular de 3 grados de libertad que dispone de una cámara en su extremo. Para su guiado se presenta una nueva estrategia de control visual directo que permite realizar el seguimiento de caminos o trayectorias no dependientes del tiempo definidas en el espacio de la imagen. Esta estructura articular a su vez se encuentra fijada al extremo de un robot manipulador Mitsubishi PA-10. Este último robot se desea aplicar a tareas de manipulación en las que no se puede emplear una cámara fija, ya que las necesidades de visualización dependen de la tarea. Para evitar este problema, la estructura articular posiciona la cámara, siguiendo la trayectoria previamente establecida que proporciona una visualización correcta de la tarea. La estrategia de control definida es capaz, no sólo de realizar el guiado de la estructura articular, sino también de guiar al robot manipulador haciendo uso de las características visuales extraídas. Para conseguir esto último se ha definido el concepto de cámara virtual de referencia, que simulando una cámara real ubicada en el extremo del manipulador, permite realizar su guiado mediante un sistema de control visual clásico basado en imagen. *Copyright © 2012 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.*

## Palabras Clave:

robótica, control de robots, visión por computador, control visual, control automático.

## 1. Introducción

El uso de los denominados sistemas de control visual permite el posicionamiento de un robot respecto a un objeto del espacio de trabajo mediante el uso de información visual en la realimentación del sistema. Es bien conocido que estos sistemas de control visual presentan un comportamiento aceptable ante incertidumbres en valores tales como ciertos parámetros de la cámara, la posición inicial del objeto o el modelo cinemático (Chaumette y Hutchinson, 2006). La clasificación más habitual para este tipo de sistemas los divide en dos grandes grupos, basados en posición y basados en imagen. Los primeros hacen uso de información tridimensional del espacio de trabajo para realizar el guiado del robot mientras que los segundos emplean la información visual 2D que es proporcionada por la cámara. Esta última aproximación será la estrategia de control básica empleada en este artículo.

Los sistemas de control visual son capaces de realizar el guiado de un robot haciendo uso de información visual extraída de las imágenes obtenidas por una cámara ubicada, bien en el extremo del robot (“eye-in-hand”), o bien en el entorno, externa al robot (“eye-to-hand”). Existe gran cantidad de trabajos en los que se emplea alguno de estos sistemas de cámara para el guiado de robots. Para obtener un guiado más robusto, se han realizado trabajos que combinan ambos al mismo tiempo (Flandin *et al.*, 2000; Wen-Chung y Chia-Kai, 2010), e incluso trabajos que combinan varios controladores empleando una única cámara con el mismo objetivo (López-Nicolás *et al.*, 2010). Sin embargo, los sistemas “eye-in-hand” han venido empleándose con más asiduidad, al mantener una relación cinemática constante entre el robot y la cámara. Además, permiten evitar las oclusiones que se producen en los sistemas “eye-to-hand” debido a que el robot puede interponerse entre la cámara y el objeto del que se extraen las características. Una de las aplicaciones en las que se ha venido

\* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: {jpomares, gjgg, Ivan.Perea, Carlos.Jara, Fernando.Torres}@ua.es

utilizando con éxito los sistemas de control visual en los últimos años es el guiado de robots en tareas de manipulación (Vahrenkamp *et al.*, 2008; Pomares *et al.*, 2010). En estos casos, las características visuales son extraídas del objeto manipulado. Cuando el manipulador se encuentra cerca de la posición de agarre del objeto, la herramienta puede ocluir algunas de las características. Para conseguir el guiado del robot por control visual en tareas de manipulación evitando este problema, en este artículo se propone la ubicación de la cámara en el extremo de una estructura articular con 3 articulaciones de rotación. Esta estructura articular, denominada COOPER (“COupled OPERation Robot”) se encuentra ubicada en el extremo del robot manipulador de forma que permite en todo momento posicionar el sistema de visión en la localización desde la cual se obtiene una mejor perspectiva para la extracción de las características visuales, evitando de esta manera las posibles oclusiones de una o varias características visuales extraídas por una supuesta cámara ubicada en el extremo del robot manipulador. COOPER ha sido diseñado y construido por los autores siendo su modelado, construcción y control aportaciones de este artículo.

Sin embargo, no sólo el robot COOPER es guiado haciendo uso de la información visual extraída por la cámara de su extremo, sino que también se utiliza esta información para realizar un guiado por control visual del robot manipulador. El control visual combinado de ambos robots constituye otra aportación del artículo. Para conseguir el guiado del robot manipulador no es posible emplear estrategias de control visual clásicas, ya que la posición relativa entre la cámara (ubicada en el extremo de COOPER) y el robot manipulador varía a lo largo de la tarea. Además, la configuración articular del robot COOPER para el aprendizaje de las características deseadas no es relevante, ya que la posición final de agarre en el manipulador podría darse con una configuración final de COOPER diferente. Estos problemas pueden evitarse con el concepto de Cámara Virtual de Referencia (CVR). Esta cámara virtual se emplea para simular la presencia de una cámara en el extremo del robot manipulador, observando unas características virtuales en la escena. De esta manera, el robot principal puede guiarse empleando un sistema de control visual basado en imagen en el que las características extraídas y deseadas son obtenidas mediante la CVR. Para poder aplicar esta aproximación se parte de las premisas de que tanto la cinemática del robot COOPER como el modelo geométrico del objeto observado son conocidos. La definición de CVR propuesta en este artículo permitirá en trabajos futuros que el robot manipulador se guíe mediante control visual con una cámara real ubicada en su extremo ante oclusiones temporales. Para ello, sólo en el momento que se produzca la oclusión de alguna de las características extraídas por esta última cámara, se empleará la información visual correspondiente extraída por la cámara del robot COOPER para complementar la información visual perdida y, de esta manera, evitar la oclusión. Para el propósito de este artículo, el robot manipulador será guiado completamente mediante la información visual extraída por el robot COOPER.

En los sistemas de control visual clásicos, se calcula la velocidad que se debe aplicar al extremo del robot para posicionar la cámara respecto a un objeto de referencia. Para ello, se hace uso del controlador interno del robot, que traduce esas velocidades en el extremo a pares y fuerzas sobre las articulaciones. Otros autores han desarrollado diseños de sistemas de control visual basados en las propiedades de pasividad (Soria *et al.*, 2008). También se han implementado algoritmos de control directo considerando la dinámica del manipulador (Kelly *et al.*,

2008) que hacen uso de la teoría de Lyapunov para analizar la estabilidad. Los sistemas de control visual directo permiten obtener directamente las fuerzas y pares a aplicar a cada articulación del robot. De esta forma, se elimina el retardo que introduce el uso de un controlador adicional como es el controlador interno del robot. El resultado es un control más rápido y preciso, ya que se reduce el tiempo de envío de órdenes al robot, consiguiendo que éste reaccione más rápidamente ante cambios bruscos de trayectorias. Los trabajos existentes en la literatura en los que se describe el control visual dinámico de un robot se aplican, en la mayoría de los casos, a robots de pocos grados de libertad (GDL). Uno de los primeros trabajos de control visual donde se tiene en cuenta la dinámica del robot es el realizado en (Miyazaki y Masutani-1990). El controlador propuesto por Miyazaki y Masutani se fundamenta en la aproximación de controlador basado en la Jacobiana traspuesta, técnica desarrollada por primera vez en (Takegaki y Arimoto-1981).

El conocimiento de los parámetros dinámicos del robot COOPER permite utilizar un controlador visual directo para su guiado. Sin embargo, los controladores directos propuestos en la literatura no permiten el seguimiento de trayectorias definidas en la imagen, únicamente permiten un posicionamiento punto a punto del robot. En (Pomares *et al.*, 2011) se describe una estrategia de control visual directo para el seguimiento de trayectorias en la imagen, pero en esta aproximación las referencias visuales en cada instante del seguimiento dependen del tiempo. Los sistemas de seguimiento de trayectorias que presentan este carácter temporal no permiten interrupciones en la tarea, no siendo aptos para tareas de interacción del robot con su entorno como las aplicaciones de manipulación. En (García *et al.*, 2009) se describe un sistema de seguimiento intemporal mediante el uso de control visual indirecto para el guiado del robot. La principal novedad de la aproximación que se describe en este artículo para el guiado de COOPER es que presenta un comportamiento intemporal en el seguimiento de las trayectorias definidas en la imagen a partir de los pares articulares que proporciona un controlador directo.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera: en el Apartado 2 se describe la arquitectura del sistema, indicando la configuración cinemática de ambos robots. El Apartado 3 describe distintos aspectos relacionados con la construcción del robot COOPER, así como la estrategia de control utilizada para su guiado. En el Apartado 4 se muestra el método seguido para el guiado del robot manipulador a partir de las características visuales extraídas por la cámara ubicada en el extremo de COOPER. Por último, los Apartados 5 y 6 muestran los resultados y conclusiones obtenidas.

## 2. Arquitectura del sistema

La Figura 1 muestra los distintos componentes que integran la arquitectura del sistema. El robot manipulador es un robot Mitsubishi PA-10 con 7 GDL. Este robot dispone de una mano Barrett de 3 dedos en su extremo. También se observa que el robot COOPER, se ha ubicado en el extremo del robot manipulador y presenta una cámara en su extremo (Gigabit Ethernet TM6740GEV). El robot COOPER dispone de 3 GDL que se han considerado suficientes para permitir el posicionamiento del sistema de visión realizando el seguimiento de trayectorias empleando el algoritmo descrito en el Apartado 3.3.

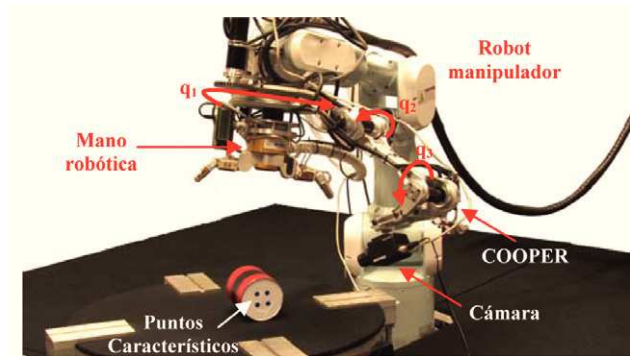


Figura 1: Arquitectura del sistema.

La primera articulación rotacional posee un movimiento,  $q_1$ , independiente al del robot manipulador, que permite situar al robot COOPER en cualquier ángulo o punto alrededor de la tarea. Las otras dos articulaciones,  $q_2$  y  $q_3$ , permiten orientar la cámara hacia dicho punto. De esta forma, la estructura RRR se considera la configuración óptima para conseguir el objetivo buscado con el desarrollo de este robot.

En la Figura 1 se han representado también los 4 puntos característicos del objeto ubicado en el espacio de trabajo,  $P_p^O = (p_{1p}^O, p_{2p}^O, p_{3p}^O, p_{4p}^O)$ . Como se mostrará posteriormente, estos puntos serán los extraídos por el sistema de visión para el guiado de ambos robots.

### 3. Modelado, simulación y control del robot COOPER

Una de las aportaciones del presente artículo es el modelado, construcción y control de COOPER, diseñado para ser ubicado en el extremo del robot manipulador. Como se ha indicado anteriormente, el fin del robot COOPER es aumentar la capacidad de visualización dentro de entornos dinámicos, pudiendo así emplear las características visuales extraídas para guiar al robot manipulador en tareas de manipulación complejas.

#### 3.1 Modelado y simulación

Para la selección de los distintos dispositivos físicos del robot COOPER, tanto mecánicos como eléctricos, se ha empleado la herramienta Virtual Lab de LMS un software que permite simular el comportamiento dinámico de mecanismos multi-cuerpo. Este programa ha permitido el diseño de COOPER por partes mediante un modelo basado en sólidos (CATIA). Esta herramienta permite modelar los parámetros del sistema (masas, rozamientos, gravedad y curvas de velocidades requeridas), de modo que ha facilitado la simulación dinámica de la estructura para determinar los pares de accionamiento necesarios.

La motivación principal del diseño es disponer de una estructura cinemática y dinámica robusta con un modelo conocido, pudiendo así realizar su guiado mediante control visual directo. El robot manipulador es capaz de soportar un peso límite de 10 Kg en su extremo, convirtiendo la ligereza del robot COOPER en un factor determinante de su diseño. Por este motivo se han empleado materiales ligeros y resistentes en su construcción, incorporando fundamentalmente duraluminio y plásticos técnicos que permiten tener un peso total del robot que sobrepasa por poco los 5 Kg. Otro aspecto que se tuvo en cuenta fue conseguir un anclaje robusto y firme, que no requiriera realizar modificaciones sobre la estructura del robot manipulador.

Como se observa en la Figura 1 y en la Figura 2.a, se ha diseñado una primera articulación que realiza el giro del robot sobre sí mismo independientemente del giro de la última articulación del robot manipulador. Además, esta articulación ha sido diseñada con un espacio interior que permite introducir en el extremo del robot manipulador la herramienta correspondiente. La Figura 2.a muestra tanto los componentes que conforman la primera articulación como el resultado obtenido una vez realizado su ensamblaje. La Figura 2.b muestra lo mismo para la segunda articulación. Las articulaciones segunda y tercera comparten un mismo modelo ya que han sido diseñadas para poder utilizar una amplia gama de motores, con el cambio de una sencilla pieza interna. En la Figura 2.c se muestra el diseño completo.

Estudiando la dinámica del robot COOPER, con las características de los accionamientos seleccionados, se determinó el par medio  $\tau$  que debe proporcionar cada conjunto motor-reductor,  $\tau_1=21.2$  Nm,  $\tau_2=6$  Nm y  $\tau_3=2.2$  Nm. En el caso de la primera articulación, se ha incorporado una primera transmisión mediante un par de engranajes planos con una reducción 110:40 y una eficiencia de 72%. Por lo tanto, el par medio  $\tau$  resultante para la salida de la reductora planetaria del motor ha de ser  $\tau_1=10.7$  Nm. La Tabla 1 muestra las características de los motores seleccionados, donde  $M_b$  es el valor de par,  $N_b$  es la velocidad nominal, y  $\eta_m$  la eficiencia. La Tabla 2 muestra las características de las reductoras seleccionadas, donde  $R$  es la reducción,  $M_{cont}$  es el par continuo soportado,  $M_{int}$  es el par intermitente máximo soportado por la reductora y  $\eta_r$  la eficiencia de transmisión.

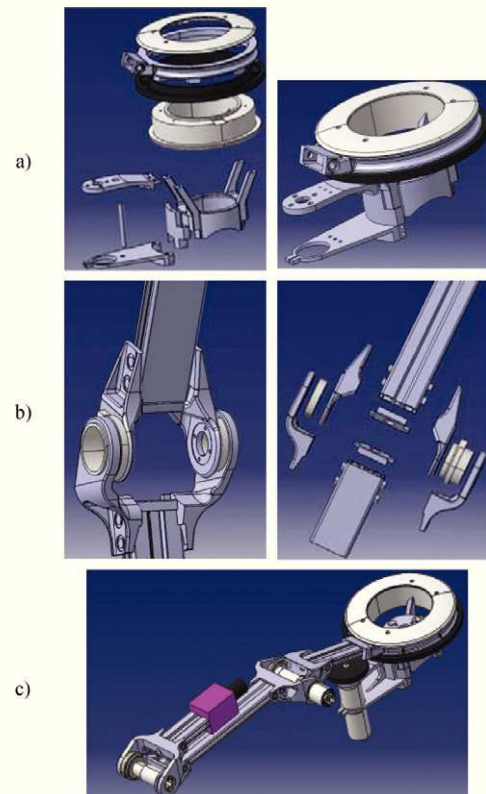


Figura 2: a) Componentes de la primera articulación y articulación ensamblada. b) Componentes de la segunda articulación y articulación ensamblada. c) Modelo completo del robot COOPER.

Tabla 1: Parámetros de los motores

Motor	$M_b$ (Nm)	$N_b$ (rpm)	$\eta_m$ (%)
Articulación 1	0.17	6930	91
Articulación 2	0.0933	6910	84
Articulación 3	0.0258	10100	83

Tabla 2: Parámetros de las reductoras planetarias

Reductora	R	$M_{cont}$ (Nm)	$M_{int}$ (Nm)	$\eta_r$ (%)
Articulación 1	113	15	21.5	72
Articulación 2	111	8	12	70
Articulación 3	159	6	7.5	70

El par final de cada grupo motor-reductor se ha calculado considerando  $N_f = M_b \cdot R \cdot \eta_r \cdot \eta_m$ . Por tanto, los resultados obtenidos para los pares son  $\tau_{1f}=12.58$  Nm,  $\tau_{2f}=6.09$  Nm,  $\tau_{3f}=2.38$  Nm, excediendo el valor medio obtenido. En el caso de la primera articulación, al aplicar la relación de reducción correspondiente a la última transmisión de los engranajes se obtiene un valor de  $\tau_{1f2}=24.908$  Nm, que también supera el par medio obtenido en las simulaciones para la misma.

### 3.2 Control visual directo

Como se ha indicado en el Apartado 3.1, el robot COOPER es de construcción propia por lo que se conoce en detalle las características cinemáticas y dinámicas del robot. Esto facilita que pueda emplearse control visual directo para su guiado. En concreto, se ha empleado control basado en Jacobiana traspuesta (García *et al.*, 2010; Kelly *et al.*, 2008). La principal novedad respecto a trabajos previos del método desarrollado es el hecho de que la estrategia definida permite no solo el posicionado del robot, sino también el seguimiento de trayectorias con comportamiento intemporal, pudiendo guiar simultáneamente al robot manipulador.

El modelo dinámico de un robot tiene por objeto conocer la relación entre el movimiento del robot y las fuerzas que actúan sobre el mismo:

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

Para un robot con  $n$  articulaciones, en esta ecuación,  $\mathbf{q} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$  es el conjunto de posiciones articulares,  $\dot{\mathbf{q}} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$  representa el conjunto de velocidades articulares y  $\ddot{\mathbf{q}} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$  son las aceleraciones articulares. Además,  $\mathbf{M} \in \mathcal{R}^{n \times n}$  es una matriz simétrica definida positiva que representa la matriz de inercia,  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$  es el vector de fuerzas de Coriolis y centrífugas,  $\mathbf{G} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$  es el vector de pares gravitacionales y  $\boldsymbol{\tau} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$  son los pares articulares.

Haciendo uso de control visual directo aplicado a tareas de posicionamiento, el sistema de control se encarga de determinar los pares articulares adecuados para alcanzar la posición deseada. En control visual basado en Jacobiana traspuesta se emplea la siguiente ley de control:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}(\mathbf{q}, \mathbf{s}, \mathbf{Z})^T K_p \mathbf{e} - K_v \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) \quad (2)$$

donde  $K_p \in \mathcal{R}^{2M \times 2M}$  y  $K_v \in \mathcal{R}^{n \times n}$  son las ganancias proporcionales y derivativas respectivamente ( $M$  es el conjunto de características visuales extraídas de la imagen). Estas matrices son

simétricas y definidas positivas. En el primer término de (2) aparece una función de error en el espacio imagen,  $\mathbf{e} = (\mathbf{s} - \mathbf{s}_d)$  donde  $\mathbf{s}$  representa el conjunto de las  $M$  características visuales extraídas en la posición actual del robot y  $\mathbf{s}_d$  indica el conjunto de  $M$  características visuales que se obtendrían en la posición final deseada del robot. Un estudio acerca de la estabilidad de este regulador puede verse en (Kelly *et al.*, 2008).  $\mathbf{J}(\mathbf{q}, \mathbf{s}, \mathbf{Z})^T$  se define como la traspuesta de la matriz Jacobiana y se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}, \mathbf{s}, \mathbf{Z}) = \mathbf{L}_s(\mathbf{s}, \mathbf{Z}) \cdot \mathbf{J}_g(\mathbf{q}) \in \mathcal{R}^{2M \times n} \quad (3)$$

donde  $\mathbf{L}_s(\mathbf{s}, \mathbf{Z})$  representa la matriz de interacción (Chaumette y Hutchinson, 2006) y  $\mathbf{J}_g(\mathbf{q})$ , la matriz Jacobiana del robot (Sciviaci *et al.*, 2000) que representa la relación entre la velocidad articular y la del extremo del robot:

$$\mathbf{v}^C = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_t^C \\ \omega^C \end{bmatrix} = \mathbf{J}_g(\mathbf{q}) \cdot \dot{\mathbf{q}} \quad (4)$$

El controlador indicado en (2) presenta estabilidad local cuando las características actuales y deseadas están suficientemente cercanas (Kelly *et al.*, 2008). Esta aproximación permite realizar el posicionamiento del robot respecto al objeto observado. Sin embargo, si es necesario realizar el seguimiento de trayectorias se aplicará el algoritmo que se describe en el siguiente apartado.

### 3.3 Control visual para el seguimiento de trayectorias

Los sistemas de control visual basados en imagen emplean la posición de las características visuales en las imágenes captadas por una cámara para minimizar el error entre dos posiciones del robot (Chaumette y Hutchinson, 2006). Estos sistemas sólo garantizan que el robot alcanzará la posición final a partir de la inicial pero no se conoce de antemano la trayectoria que se seguirá entre ambas posiciones. Sin embargo, en muchas ocasiones surge la necesidad de realizar el seguimiento de trayectorias, debido, por ejemplo, a que se ha de evitar un obstáculo, por las características cinemáticas de la tarea a desarrollar o, como es el caso de este artículo, para mantener en el campo de visión el objeto manipulado. Por lo tanto, es necesario modificar los sistemas clásicos basados en imagen para permitir el seguimiento de caminos o trayectorias. Es posible encontrar trabajos previos que permiten extender los sistemas de control visual al seguimiento de trayectorias empleando sistemas temporales (Chesi y Hung, 2007; Pomares *et al.*, 2011) e intemporales (García *et al.*, 2009). Los sistemas intemporales surgen con el objetivo de evitar los problemas que presentan los temporales en entornos en los que el robot puede interaccionar con el espacio de trabajo y, por lo tanto, no se puede garantizar mantener las referencias temporales. En esta sección se describe un nuevo sistema de control intemporal para el seguimiento de trayectorias cuya principal novedad es su posibilidad de extensión a control directo.

La trayectoria en la imagen que debe seguir el robot COOPER está compuesta por un muestreo de  $N$  conjuntos de características visuales. No es objetivo de este artículo la planificación de trayectorias, de forma que se supone conocida la trayectoria en el espacio imagen que habría de seguir el robot. Esta trayectoria se va a representar con  $\rho = \left( {}^k \mathbf{s} \mid k \in 1 \dots N \right)$ , siendo  ${}^k \mathbf{s}$  el conjunto de  $M$  puntos o características visuales observadas por la cámara en el instante  $k$ ,  ${}^k \mathbf{s} = \left( {}^k f_i \mid i \in 1 \dots M \right)$ . En la Figura 3 se ha representado



un ejemplo de trayectoria en la imagen para ilustrar la notación empleada (en este caso  $M = 4$ ).

Siguiendo la notación indicada, el conjunto de características observadas por la cámara al inicio de la trayectoria es  $^1s$ . A partir de estas características iniciales, el primer paso del algoritmo propuesto consiste en encontrar en  $\rho$  un conjunto de características  $^k s$  tales que al aplicar control directo basado en imagen se obtenga una velocidad de módulo cercano al de la velocidad deseada,  $|\mathbf{v}_d^C|$ . Para ello, se parte de  $^1s$  y se va iterando por  $\rho$  hasta que se encuentre un  $^k s$  tal que  $|\mathbf{v}_d^C| \approx |\mathbf{v}^C|$ . La velocidad de la cámara en cada iteración,  $^k \mathbf{v}^C$ , se obtiene a partir de los pares articulares necesarios para guiar al robot desde la posición actual de la cámara,  $^i s$ , hasta la posición definida por el conjunto de características  $^k s$ :

$$\tau = \mathbf{J}(\mathbf{q}, \mathbf{s}, \mathbf{Z})^T \mathbf{K}_p (\mathbf{s} - \mathbf{s}^k) - \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) \quad (5)$$

donde  $^i s = ^1 s$  en la primera iteración. A partir de estos pares articulares, se aplica la dinámica directa para obtener las velocidades articulares  $\dot{\mathbf{q}}$  (Walker y Orin, 1982). Finalmente, se obtiene la velocidad lineal y angular de la cámara utilizando la Ecuación (4) que define la Jacobiana del robot.

Los pares que permiten obtener una velocidad  $|\mathbf{v}^C| \approx |\mathbf{v}_d^C|$  serán los que se aplicarán al robot en la siguiente iteración del algoritmo. Se procederá de esta manera hasta que se consiga el seguimiento de la trayectoria completa.

Como se muestra en (Pomares et al., 2010) este tipo de controladores, en los que en cada iteración se aplica una ley de control para la disminución de la función de error  $\mathbf{e}$ , son estables cuando las características extraídas ( $\mathbf{s}$ ) y las deseadas ( $^k s$ ) se encuentran suficientemente cercanas. Hasta la actualidad, esta región de convergencia no ha sido nunca firmemente establecida por lo que simplemente se considera un entorno de vecindad en el que no exista mínimos locales y se garantice la estabilidad asintótica (ver por ejemplo (Deng et al., 2002)).

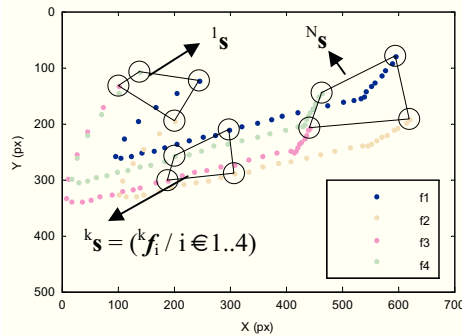


Figura 3: Trayectoria deseada en el espacio imagen.

#### 4. Guiado del robot manipulador

Como se ha indicado anteriormente, ambos robots son guiados haciendo uso de la información visual extraída por la cámara ubicada en el extremo del robot COOPER. El objetivo de los movimientos llevados a cabo por el robot manipulador es

aproximarse de forma adecuada al objeto que se pretende manipular con la mano robótica, mientras que el objetivo del robot COOPER es el seguimiento de trayectorias previamente establecidas que le permitan ubicarse en la localización más adecuada para poder extraer las características visuales sin oclusiones. En este apartado se describe la manera en la que se consigue guiar al robot manipulador mediante la información visual extraída por el robot COOPER a pesar de que este último se encuentre en movimiento.

##### 4.1 Cámara virtual de referencia

En los sistemas de control visual clásicos basados en imagen la ubicación del sistema de visión es conocida de antemano (bien se emplea un sistema eye-in-hand o bien eye-to-hand). Sin embargo, en el caso que se describe en este artículo, la ubicación del sistema de visión varía dependiendo de la posición del robot COOPER. Para evitar este problema se ha definido el concepto de Cámara Virtual de Referencia (CVR). Esta cámara virtual, es empleada para simular la presencia de una cámara en el extremo del robot manipulador (ver Figura 4). De esta manera, el robot manipulador puede guiarse empleando un sistema de control visual basado en imagen en el que las características extraídas y deseadas son obtenidas mediante la CVR. Para simular la presencia de la CVR se utilizan las imágenes obtenidas por la cámara del robot COOPER. Mediante la aproximación descrita en el Apartado 4.2, se reconstruyen las características observadas por la CVR. Así, se independiza el guiado del robot manipulador, de la posición desde la que se extraigan las características visuales. Por lo tanto, la CVR tendrá unos parámetros extrínsecos correspondientes al extremo del robot manipulador y unos intrínsecos que habrán de determinarse de manera online ya que se considera iguales a los de la cámara real ubicada en el extremo del robot COOPER.

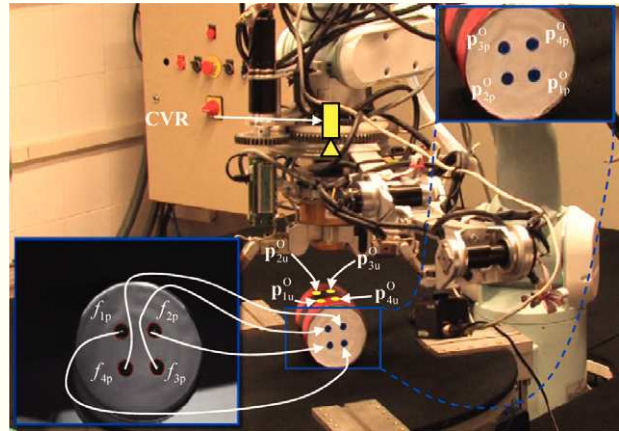


Figura 4: Cámara virtual de referencia.

##### 4.2 Algoritmo de guiado

Haciendo uso de la CVR, la ley de control empleada para realizar el guiado del robot manipulador es la siguiente:

$$\mathbf{v}^{CVR} = -\lambda_1 \mathbf{L}_s^+ (\mathbf{s}_u - \mathbf{s}_u^*) \quad (6)$$

donde  $\mathbf{s}_u$  y  $\mathbf{s}_u^*$  son las características visuales extraídas y deseadas consideradas por la CVR,  $\lambda_1$  es una ganancia positiva y

$\mathbf{v}^{CVR}$  es la velocidad a aplicar al robot respecto al sistema de coordenadas de la CVR. Como el sistema de coordenadas de la CVR coincide con el del extremo del robot manipulador, la velocidad a aplicar en cada iteración respecto al sistema de coordenadas del extremo del robot manipulador será la obtenida en la Ecuación (6). Por otro lado,  $\mathbf{L}_s^+$  es la pseudoinversa de la matriz de interacción. Para tener completamente definida la ley de control (6) es necesario determinar los valores de las características  $\mathbf{s}_u$  y  $\mathbf{s}_u^*$ . En primer lugar, para determinar el valor de  $\mathbf{s}_u$  a partir de las características  $\mathbf{s}$  extraídas por la cámara se siguen los siguientes pasos:

1. Determinar la localización del sistema de coordenadas del objeto observado, O, con respecto al sistema de coordenadas de la cámara de COOPER,  $\mathbf{M}_O^{MC}$ . Para calcular esta posición se ha de determinar también los parámetros intrínsecos  $\xi = (f_u, f_v, u_0, v_0)$ , es decir, focal y punto principal de la cámara real de COOPER. Para ello se parte de unos parámetros extrínsecos e intrínsecos iniciales  $(\mathbf{M}_O^{MC})_i, \xi_i$ . También se supone conocido un modelo 3D del objeto. Este modelo almacena la posición de los puntos característicos  $\mathbf{P}_p^O = (\mathbf{p}_{1p}^O, \mathbf{p}_{2p}^O, \dots, \mathbf{p}_{Mp}^O)$  que serán los extraídos por el sistema de visión ubicado en el extremo de COOPER. Además, el modelo del objeto también almacena otros puntos característicos,  $\mathbf{P}_u^O = (\mathbf{p}_{1u}^O, \mathbf{p}_{2u}^O, \dots, \mathbf{p}_{Mu}^O)$ , que serán empleados para reconstruir la información visual capturada por la CVR. En la Figura 4 se ha indicado la posición de los puntos característicos  $\mathbf{P}_p^O$  extraídos por la cámara de COOPER y los puntos,  $\mathbf{P}_u^O$ , extraídos por la CVR. A partir de los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara de COOPER y el conjunto  $\mathbf{P}_p^O$  es posible proyectar en la imagen dónde se encontrarían las características del objeto O (los valores de esta proyección se representan como  $\mathbf{s}_p$ ). Para determinar de forma simultánea la localización del objeto que está siendo visualizado y los parámetros intrínsecos se aplica la siguiente ley de control para anular la función de error  $\mathbf{e}_2$ :

$$\mathbf{v}_a = -\lambda_2 \left( \mathbf{L}_s \frac{\partial \mathbf{s}_p}{\partial \xi} \right)^+ \mathbf{e}_2 \quad (7)$$

donde  $\lambda_2$  es una ganancia positiva,  $\mathbf{e}_2 = \mathbf{s}_p - \mathbf{s}$  y el vector  $\mathbf{v}_a$  está compuesto por dos términos. El primer término representa la variación a aplicar a los parámetros extrínsecos,  $(\mathbf{M}_O^{MC})_i$ , en cada iteración. Cuando el error  $\mathbf{e}_2$  se anule, el valor de  $(\mathbf{M}_O^{MC})_i$  coincidirá con los parámetros extrínsecos de la cámara de COOPER. El segundo componente de  $\mathbf{v}_a$  es la variación a aplicar en cada iteración en los parámetros intrínsecos,  $\xi_i$ . De esta manera, el uso de la CVR permite, no sólo el guiado de forma simultánea del conjunto de ambos robots, sino también realizar la calibración de la cámara real ubicada en el extremo del robot COOPER.

2. Al ser el robot de construcción propia se conoce con exactitud sus parámetros cinemáticos. En concreto, se supone conocida la matriz de transformación homogénea que relaciona la cámara real con la base del robot COOPER

( $\mathbf{M}_{MC}^{COP}$ ). Suponiendo también conocida la relación entre la base de COOPER y la CVR se puede concluir que la relación entre el objeto O y la CVR viene dada por la siguiente relación  $\mathbf{M}_O^{CVR} = \mathbf{M}_{COP}^{CVR} \mathbf{M}_{MC}^{COP} \mathbf{M}_O^{MC}$ .

3. Como se ha indicado anteriormente, las características que se emplean para el guiado del robot manipulador se almacenan en el modelo 3D conocido y se han denominado  $\mathbf{P}_u^O$ . Haciendo uso de esta información y la matriz  $\mathbf{M}_O^{CVR}$  obtenida en el paso 2, es posible calcular la posición de los puntos característicos respecto a la CVR,  $\mathbf{p}_u^{CVR} = \mathbf{M}_O^{CVR} \mathbf{P}_u^O$ . Por último, las posiciones anteriores se pueden proyectar en el espacio imagen para así poder obtener el valor de las características visuales,  $\mathbf{s}_u$ . Para realizar esta proyección se emplean los parámetros intrínsecos  $\xi$  que han sido previamente calculados en el paso 1.

Habitualmente, en los sistemas de control visual basados en imagen clásicos, las características deseadas son obtenidas mediante un proceso de aprendizaje en el cual el robot que va a ser guiado se posiciona en la ubicación final deseada. Una vez el robot se encuentra en esa ubicación, se realiza la extracción de características y éstas serán las que se emplearán para guiar al robot considerándolas como deseadas en cada iteración del bucle de control. Sin embargo, en este caso, se desea calcular las características deseadas empleadas para guiar al robot manipulador independientemente de la posición final del robot COOPER. Las características deseadas (entendiendo como éstas las que se extraen una vez que el robot manipulador ha alcanzado la ubicación final) varían dependiendo de la posición del robot COOPER. Por lo tanto, no basta con un proceso de aprendizaje clásico para determinar las características deseadas  $\mathbf{s}_u^*$  que se emplearán en cada iteración. Para solventar este problema se vuelve a emplear el concepto de CVR. En concreto, para obtener las características deseadas, en primer lugar se posiciona el robot manipulador en su ubicación deseada. Independientemente de la posición final alcanzada por el robot COOPER se extraen las características y siguiendo los pasos 1-3 anteriores se determina el valor de  $\mathbf{s}_u^*$ .

## 5. Resultados

En este apartado se describen tres experimentos con el objetivo de ilustrar el correcto comportamiento de los distintos controladores y aproximaciones descritas en el artículo. En primer lugar, para mostrar el correcto funcionamiento de las estrategias descritas en los Apartados 3.2 y 3.3, se describe en detalle un experimento en el que es empleado el robot COOPER para el seguimiento de una trayectoria utilizando control directo. A continuación se muestran otros dos experimentos de posicionamiento en el que el robot manipulador describe una determinada trayectoria hasta alcanzar la posición deseada de agarre. Además, estos experimentos muestran como el robot COOPER describe una determinada trayectoria con el objetivo de mantener el objeto observado en el campo de visión. En estos dos últimos experimentos ambos robots son guiados con las características visuales extraídas por el robot COOPER.

### 5.1 Experimento 1

Este primer experimento ilustra un ejemplo en el que el robot COOPER realiza el seguimiento de una trayectoria deseada especificada en el espacio de la imagen, mostrando el correcto comportamiento de las estrategias descritas en los Apartados 3.2 y 3.3. Los parámetros intrínsecos de la cámara ubicada en el extremo de COOPER son obtenidos con el proceso de calibración descrito en el Apartado 4.2, obteniendo los siguientes valores ( $u_0, v_0$ ) = (152, 118) px, y ( $f_u, f_v$ ) = (389.9, 385.5) px (véase en la Figura 5 la evolución de los parámetros intrínsecos durante la calibración). Las características extraídas por dicha cámara son las esquinas de un cuadrado de lado 10 cm. En este caso, la trayectoria a seguir no es una simple línea recta sino que debe describir una trayectoria curva durante su recorrido. Además, se desea realizar el seguimiento a una velocidad cuyo módulo sea aproximadamente 40 mm/seg. Aplicando la estrategia descrita en los Apartados 3.2 y 3.3, se obtiene el comportamiento indicado en la Figura 6. En esta figura se ha representado la trayectoria deseada de la cámara en el espacio 3D y la obtenida. Se observa que el robot realiza un correcto seguimiento de la trayectoria. Lo mismo se aprecia en la Figura 7 en la que se puede comprobar que las características extraídas en la imagen van siguiendo la trayectoria deseada durante todo el experimento. La trayectoria deseada presenta un cambio de dirección como se puede observar en las dos figuras.

Otro aspecto importante del método propuesto de seguimiento de trayectorias basado en control visual es la posibilidad de especificar la velocidad de seguimiento. En la Figura 8 se observa que el error entre el módulo de la velocidad durante el seguimiento y el módulo de la velocidad deseado (40 mm/seg) es residual. Además, en la Figura 9 se ha representado la evolución de las velocidades de traslación y rotación durante el seguimiento. Como se ha indicado en la Ecuación (2), la acción de control genera los pares articulares necesarios para realizar el seguimiento de la trayectoria deseada. En este experimento, los pares articulares son los indicados en la Figura 10. Se observa claramente el punto en las gráficas de las Figuras 9 y 10 donde la trayectoria deseada implica un cambio en el sentido de desplazamiento del robot básicamente realizado por su primera articulación.

De este experimento se puede concluir que, dada una trayectoria deseada, el método propuesto es capaz de realizar un correcto seguimiento, obteniendo un correcto comportamiento tanto de las características extraídas en la imagen como del propio robot en el espacio cartesiano 3D.

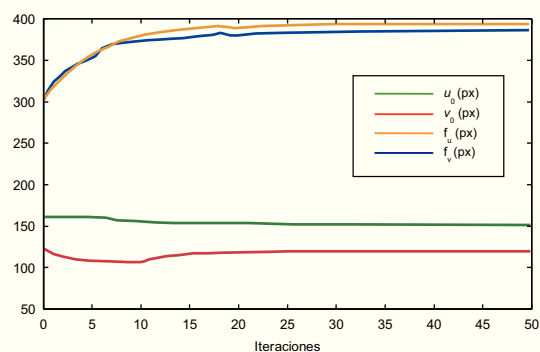


Figura 5: Evolución de los parámetros intrínsecos durante la calibración.

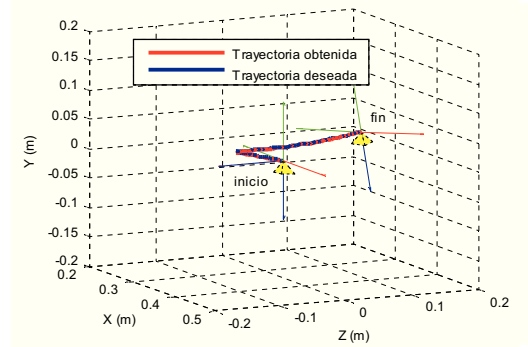


Figura 6: Trayectoria 3D deseada y seguida durante el experimento.

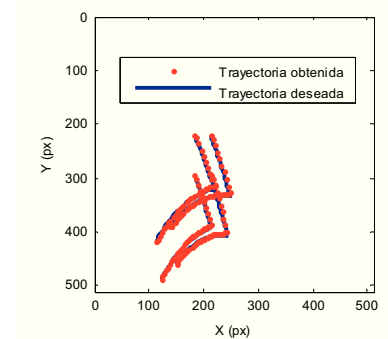


Figura 7: Trayectoria de las características en la imagen deseada y seguida durante el experimento.

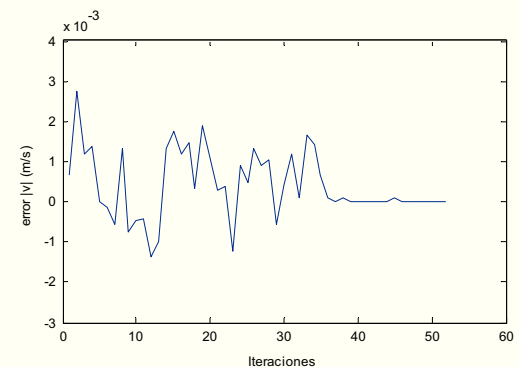


Figura 8: Error entre el módulo de la velocidad de seguimiento durante el experimento y el módulo de la velocidad deseada.

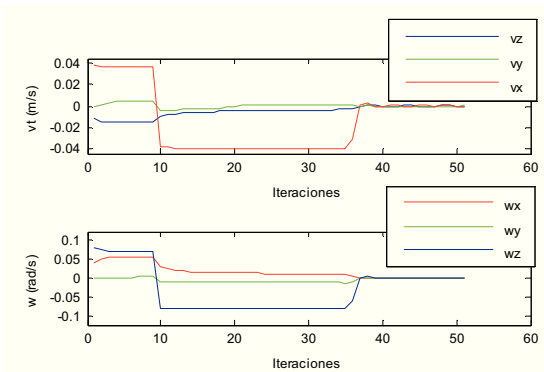


Figura 9: Evolución de la velocidad de traslación y angular del extremo de robot durante la trayectoria.

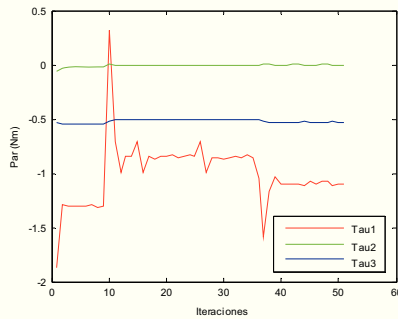


Figura 10: Pares articulares durante el seguimiento.

### 5.2 Experimento 2

Con el objetivo de mostrar el interés práctico de la aproximación descrita en el artículo, en este experimento se muestra su aplicación a una tarea de manipulación. En concreto, el robot manipulador se aproxima al agarre del objeto representado en la Figura 4. En el momento en el que se produce el agarre, una cámara en el extremo del robot no sería capaz de extraer características visuales del objeto manipulado. Sin embargo, empleando el robot COOPER, la cámara es capaz de mantener en el campo de visión la información visual empleada para el guiado de ambos robots. En concreto, las características extraídas se corresponden con las indicadas en la Figura 4 ( $f_{1p}, f_{2p}, f_{3p}, f_{4p}$ ). El experimento consiste en una tarea de posicionamiento en la que la posición deseada del robot manipulador y de COOPER son las representadas en la Figura 11. La Figura 11.a representa las características deseadas en la imagen empleadas para guiar el robot manipulador y COOPER respectivamente. Para el manipulador se representan las características extraídas por la CVR (su posición coincide con la posición del extremo del robot manipulador). La Figura 11.b indica la localización deseada para ambos robots, en concreto se representa la localización deseada para la CVR y la cámara de COOPER respectivamente. En este primer experimento, COOPER no ha de seguir una trayectoria deseada, sino que únicamente se indican unas características deseadas a alcanzar (tanto la posición inicial de ambos robots como las características extraídas por las cámaras correspondientes en dichas posiciones se indican en la Figura 12).

Para el guiado de COOPER se hace uso de una estrategia de control basada en imagen. Sin embargo, para el guiado del robot manipulador, se emplea el algoritmo detallado en el Apartado 4.2. Haciendo uso de ambas aproximaciones se obtienen las trayectorias 3D que se han representado en la Figura 13. En esta figura se ha representado en azul los puntos característicos del objeto que son extraídos por la CVR ( $P_u^O$ ) y en rojo los extraídos por la cámara de COOPER ( $P_p^O$ ). Se observa que ambos robots convergen a las localizaciones deseadas. En la Figura 14 se representa la trayectoria de las características visuales extraídas por las cámaras de ambos robots. De nuevo se observa un correcto comportamiento convergiendo ambas trayectorias a las características deseadas correspondientes.

La Figura 15 muestra la velocidad de la cámara situada en el extremo de COOPER durante el experimento. En la Figura 16 se han representado los pares enviados por el sistema de control visual directo para el posicionamiento de la cámara real situada en el extremo de COOPER. Estos pares articulares consiguen guiar de manera correcta la cámara hasta la posición final deseada.

Por último, en la Figura 17 se muestra una secuencia de imágenes con la trayectoria real descrita por ambos robots durante

el experimento. En el momento en el que se realiza el agarre, una cámara ubicada en el extremo del robot manipulador no sería capaz de extraer características visuales del objeto manipulado, ya que serían ocluidas por la mano robótica. Sin embargo, haciendo uso de COOPER, la cámara de su extremo es capaz de mantener en el campo visual las características del objeto manipulado y, de esta manera, permitir el guiado simultáneo de ambos robots.

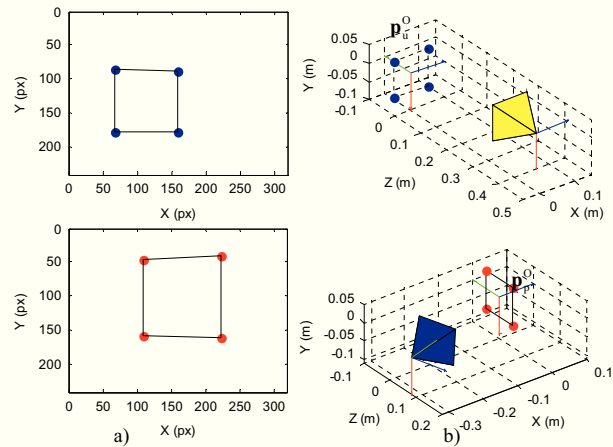


Figura 11: a) Características deseadas en la imagen empleadas para guiar el robot manipulador empleando la CVR y COOPER respectivamente. b) Localización final deseada para la CVR y COOPER.

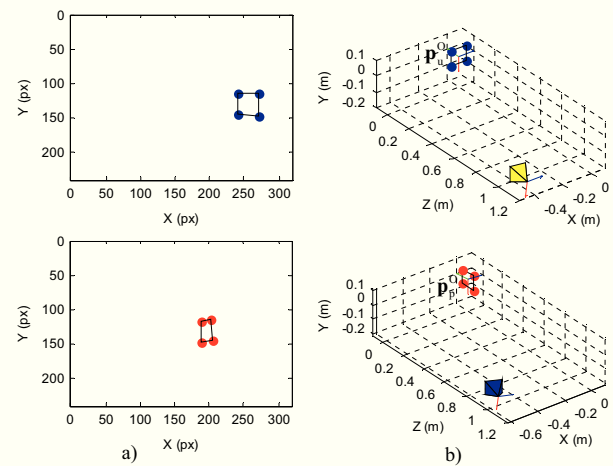


Figura 12: a) Características iniciales extraídas en la imagen por la CVR y COOPER respectivamente. b) Localización inicial de la CVR y COOPER.

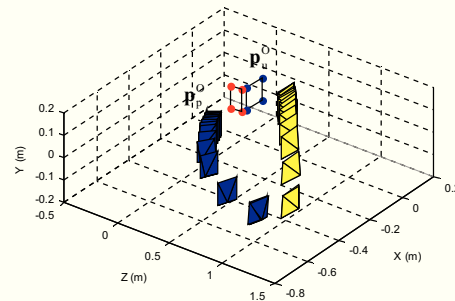


Figura 13: En azul se representa la trayectoria de la cámara ubicada en el extremo de COOPER. En amarillo se indica la localización de la CVR.



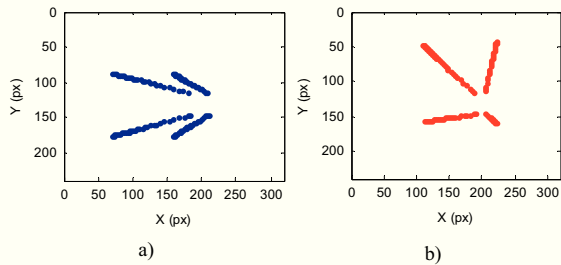


Figura 14: Trayectoria de las características en la imagen durante el experimento. a) Características extraídas por la CVR. b) Características extraídas por la cámara ubicada en el extremo de COOPER.

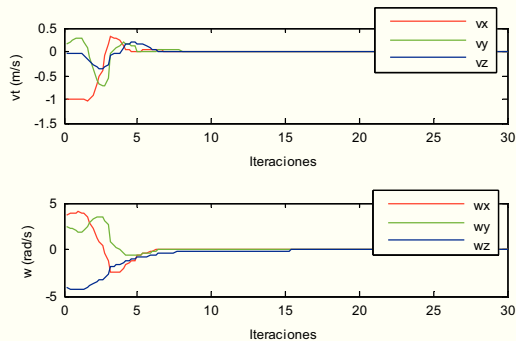


Figura 15: Velocidad de la cámara ubicada en el extremo de COOPER durante el experimento.

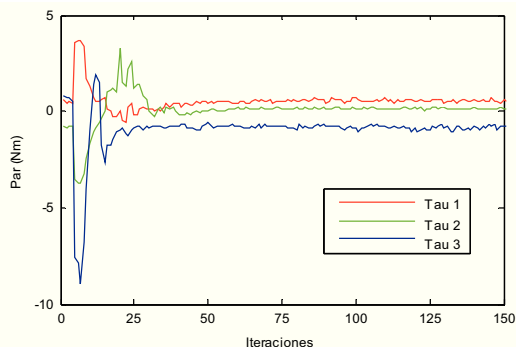


Figura 16: Pares articulares de COOPER durante el experimento.

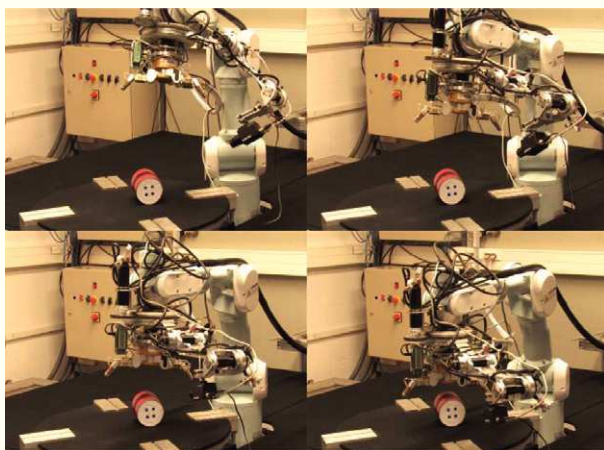


Figura 17: Secuencia de imágenes del experimento 2.

### 5.3 Experimento 3

Este tercer experimento parte de las posiciones que fueron alcanzadas al finalizar el experimento 2. A lo largo de esta última prueba, el robot manipulador desciende unos pocos centímetros mientras que el robot COOPER ha de realizar el seguimiento de una trayectoria deseada. En este tercer experimento se ilustra una nueva ventaja del sistema de seguimiento de trayectorias propuesto, ya que, haciendo uso de este sistema, es posible alcanzar localizaciones finales que no son alcanzables empleando sistemas de control visual clásicos basados en imagen. En concreto, en artículos como (Chaumette, 1998; Gans y Hutchinson, 2007) se muestra que si se aplica un enfoque tradicional basado en imagen, la cámara puede realizar movimientos innecesarios para alcanzar la posición deseada. Un ejemplo es el caso que ocurre cuando entre las características iniciales y las deseadas hay una rotación pura de 180 grados alrededor del eje óptico de la cámara. En este caso idealmente las acciones de control que aplicarían el controlador llevarían la cámara al infinito.

En este tercer experimento, la trayectoria deseada que ha de seguir el robot COOPER no sólo pretende describir una rotación en el eje óptico, sino que, simultáneamente, ha de realizar un descenso en profundidad. Si se aplica una estrategia de control clásico basado en imagen, la cámara comienza a alejarse del objetivo y no puede alcanzarse la posición final ya que se sobrepasa el límite de una de las articulaciones. La trayectoria de la cámara lleva al robot en dirección contraria a la que se encuentra el objetivo, y este es incapaz de adaptarse a dicho movimiento.

Aplicando el método propuesto, en la Figura 18 se ha representado la evolución de la posición de la CVR y de la cámara del robot COOPER durante el experimento. Se observa cómo la cámara ubicada en el extremo de COOPER es capaz de realizar el seguimiento correctamente de la trayectoria indicada, realizando la rotación anteriormente comentada. A su vez, la información visual extraída es utilizada para realizar el guiado del robot manipulador durante su descenso en profundidad. Para ilustrar con mayor claridad el experimento, en la Figura 19 se indican las trayectorias de las características visuales extraídas por ambas cámaras durante el experimento.

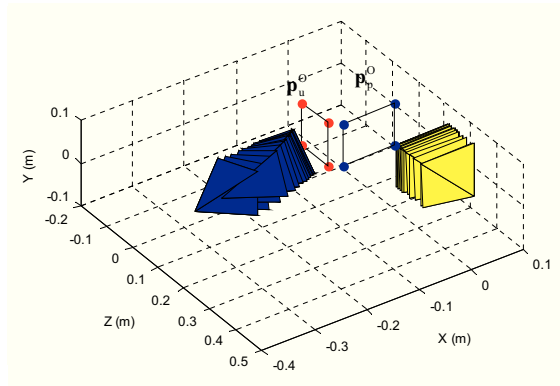


Figura 18: Trayectoria 3D durante el tercer experimento. En azul se representa la trayectoria de la cámara ubicada en el extremo de COOPER. En amarillo se indica la localización de la CVR.

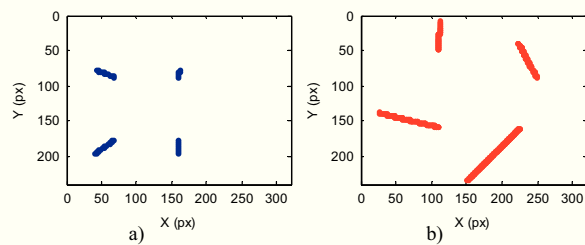


Figura 19: Trayectorias descritas por las características durante el experimento. a) Características extraídas con la CVR. b) Características extraídas por la cámara ubicada en el extremo de COOPER.

## 6. Conclusión

En este artículo se ha descrito un sistema de control visual basado en imagen empleado para el guiado de forma combinada de dos robots acoplados. La información visual extraída por la cámara es empleada para el guiado de COOPER de forma que es capaz de realizar el seguimiento de trayectorias en el espacio imagen. Además, la misma información visual es empleada para el guiado del robot manipulador. El esquema de control visual para el guiado de ambos robots descrito en el artículo permite el posicionamiento del robot COOPER siguiendo las trayectorias especificadas en el espacio imagen. Además, el robot manipulador es guiado haciendo uso de esa misma información visual. Actualmente se está trabajando en mejorar distintos aspectos dinámicos de COOPER así como en implementar nuevos esquemas de control visual directo para permitir su guiado de forma más óptima y eficiente. Asimismo, actualmente se está desarrollando una ley de control visual para permitir el guiado del robot manipulador empleando una cámara real ubicada en el extremo. Esta ley de control permite, ante la oclusión de una o varias características, emplear la información visual correspondiente reconstruida a través de la cámara de COOPER.

## English Summary

### Reference Virtual Camera: An approach to guide several manipulator robots using only one camera

#### Abstract

This paper presents the modeling, design and visual control of a 3 degrees of freedom joint structure with an eye-in-hand camera. For the structure guidance, the paper presents a new direct visual servoing strategy that allows the tracking of time-independent paths defined in the image space. This joint structure is attached at the end of a robotic manipulator Mitsubishi PA-10. This last robot will be applied to manipulation tasks in which a fixed camera cannot be used. To avoid this problem, the joint structure positions the camera following the path previously established that provides a proper visualization of the task. The defined control strategy is able, not only to make the guidance of the joint structure, but also to guide the robot manipulador using the extracted visual features. To do this, we have defined the concept of virtual reference camera, which simulates a real camera at the end of the manipulator. This virtual camera allows the manipulator guidance by using a classical image based visual servoing system.

#### Keywords:

Robotics; robot control; computer vision; visual servo automatic control.

#### Agradecimientos

Este trabajo está financiado por el Ministerio de educación (Proyecto DPI2011-22766).

#### Referencias

- Chaumette, F., Hutchinson, S. 2006. Visual Servo Control, Part I: F Approaches. IEEE Robotics and Automation Magazine, 13 (4), 82-90.
- Chaumette, F. 1998. Potential problems of stability and convergence in ir based and position-based visual servo En: de los editores D. Kriegman, G. Hager, A.S. Morse. The Conflu of Vision and Control. LNCIS Series, Springer-Verlag, 237, 66-78.
- Chesi, G., Hung, Y. S. 2007. Global path-planning for constrained optimal visual servoing. IEEE Transactions on Robotics, 23, 1050-106
- Deng, L., Janabi-Sharifi, F., Wilson, W. 2002. Stability and robustness of visual servoing methods. En ICRA '02, Washington, DC, USA, 16 1609.
- Flandin, G., Chaumette, F., Marchand, E. 2000. Eye-in-hand/eye-to- cooperation for visual servoing. En ICRA'00, San Francisco, CA, US. 2741 – 2746.
- Gans, N. R., Hutchinson, S. A. 2007. Stable visual servoing through hy switched-system control, IEEE Transactions on Robotics, 23(9), 530-5
- García, G. J., Jara, C. A., Pomares, J., Torres, F. 2010. Direct visual s control of a robot to track trajectories in supervision tasks. Internati Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Sing: Diciembre, 1434-1439.
- García, G. J., Pomares, J., Torres, F. 2009. Automatic robotic task unstructured environments using an image path tracker. Co Engineering Practice, 17(5), 597-608.
- Kelly, F., Cervantes, I., Alvarez-Ramirez, J., Bugarin, E., Monroy, C. 2 On Transpose Jacobian Control for Monocular Fixed-Camera 3D D Visual Servoing. Robot Manipulators, M. Ceccarelli Ed., InTech, 243- López-Nicolás, G., Guerrero, J. J., Sagüés, 2010. C. Visual control of veh using two-view geometry. Mechatronics, 20, 315–325.
- Miyazaki, F. y Masutani, Y. 1990. Robustness of sensory feedback co based on imperfect Jacobian. en Proceedings of the fifth internati symposium on Robotics research, 201-208.
- Pomares, J., Candelas, F. A., Torres, F., Corrales, J. A., García, G. J. 2 Safe Human-Robot Cooperation Based on an Adaptive Time-Indeper Image Path Tracker. International Journal of Innovative Compu Information and Control, 6 (9), 3819–3842.
- Pomares, P., Corrales, J. A., García, G. J., Torres, F. 2011. Direct V Servoing to Track Trajectories in Human-Robot Cooperation. Internati Journal of Advanced Robotic Systems, 8 (4), 129–138.
- Sciavicco, L.; Siciliano, B.; Sciavicco, B., 2000. Modelling and contr robot manipulador. Springer-Verlag: London, United Kingdom, pp. 40.
- Soria, C., Roberti, F., Carelli, R., Sebastian, J. M. (2008) Control S Visual de un Robot Manipulador Planar Basado en Pasividad. Re Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 5 (4). 54 - 61.
- Takegaki, M., y Arimoto, S. 1981. A New Feedback Method for Dyn Control of Manipulators, J. of Dyn. Syst., Meas., and Control, 103 119-125.
- Vahrenkamp, N., Wieland, S., Azad, P., Gonzalez, D., Asfour, T., Dillr R. 2008. Visual servoing for humanoid grasping and manipulation t IEEE-RAS International Conference In Humanoid Robots, 406-412.
- Walker, M. W., Orin, D. E. 1982. Efficient dynamic computer simulatic robotic mechanisms. ASME Journal of Dynamic Systems, Measure and Control, 104, 205–211.
- Wen-Chung, C., Chia-Kai, S. 2010. Hybrid eye-to-hand and eye-in- visual servoing for autonomous robotic manipulation. SICE Ar Conference, Taipei, 415-422.