



Control Visual de Robots

José María Sebastián

(jose.sebastian@upm.es)

*Departamento de Automática, Ingeniería
Eléctrica y Electrónica e Informática Industrial,
Universidad Politécnica de Madrid*

**Programas de Máster y Doctorado en Ingeniería
de Sistemas y de Control – UNED**

Madrid, 17 de mayo de 2019



Control Visual de Robots

- Introducción
- Estrategias de Adquisición de Imágenes
- Estrategias de Interpretación de Imágenes
- Ley de Control Cinemático
- Estabilidad
- Seguimiento de Objetos
- Estructuras de Control Visual
- Líneas de Investigación



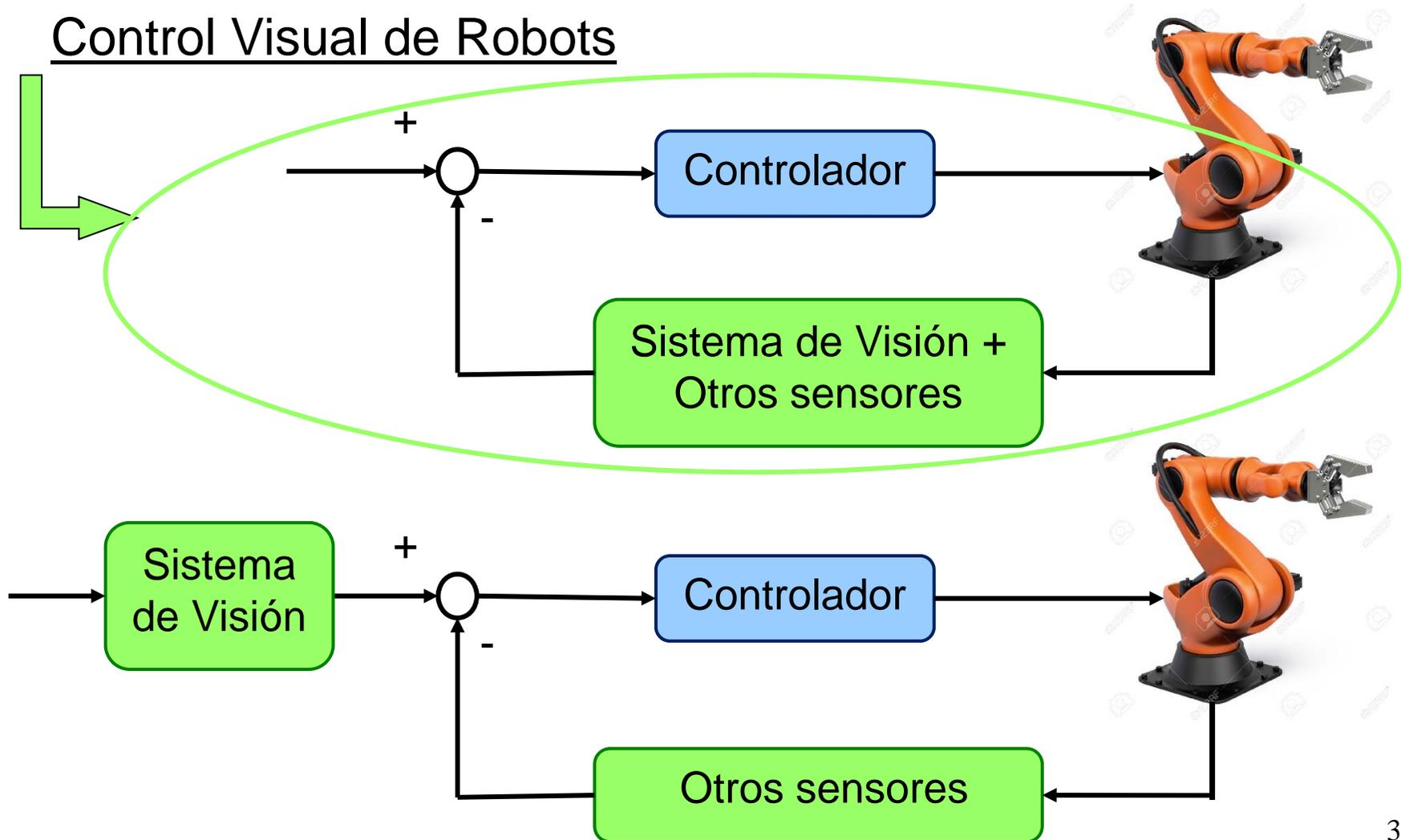
Introducción

INDUSTRIALES
ETSII | UPM

Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

CONTROL VISUAL DE ROBOTS

Control Visual de Robots





Introducción

- Control Visual de Robots: utilización de la información visual para el control del robot



*Fuente del vídeo:
Tokyo University.
Ishikawa Namiki
Laboratory*



INDUSTRIALES
ETSII | UPM

Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

Introducción

CONTROL VISUAL DE ROBOTS



Robots





Estrategias de Adquisición de Imágenes

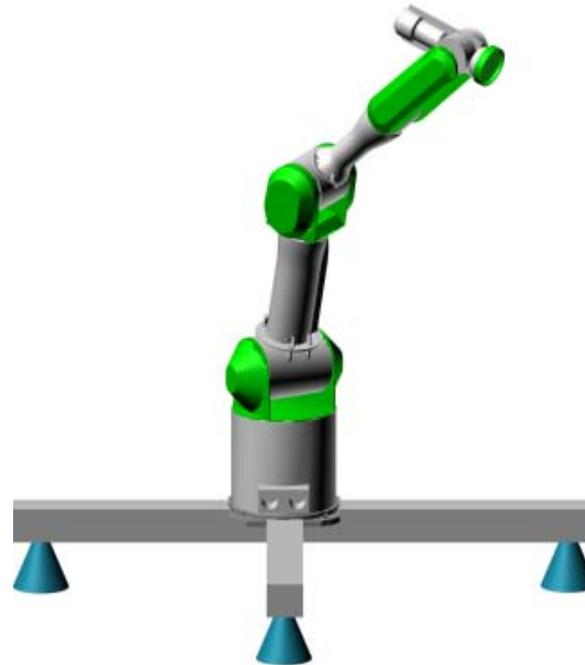
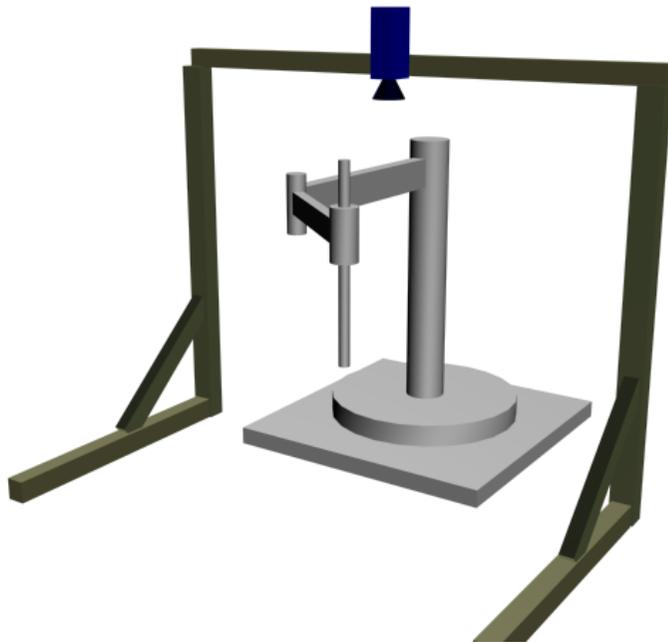
INDUSTRIALES
ETSII | UPM

Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

CONTROL VISUAL DE ROBOTS

Ubicación de la cámara. Cámara(s) externa(s) (eye-to-hand)

- Una cámara ubicada en el espacio de trabajo
- Dos cámaras ubicadas en el espacio de trabajo



Fuente de las imágenes: AUROVA - Universidad de Alicante



Estrategias de Adquisición de Imágenes

Ubicación de la cámara. Cámara(s) externa(s) (eye-to-hand)

- Múltiples cámaras ubicadas en el espacio de trabajo



Fuente del vídeo: Aerospace Controls Laboratory MIT



Estrategias de Adquisición de Imágenes

Ubicación de la cámara. Cámara(s) externa(s) (eye-to-hand)

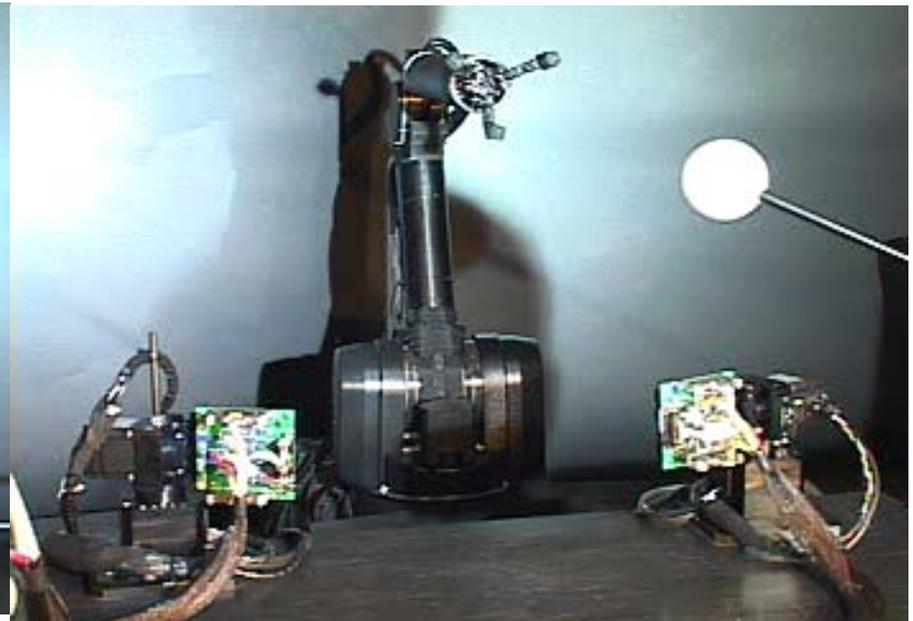
- No existe una relación mecánica entre la cámara y el robot (sin vibraciones, menor efecto difuminado)
- Puede ser necesario conocer la relación entre los sistemas de la cámara y del robot (calibración cinemática)
- El sistema de visión capta información del robot y del entorno de trabajo
- Es más sensible a los errores de calibración
- Si la óptica es fija, se emplea la misma resolución en toda la realización de la tarea, lo que implica mala precisión
- Se pueden emplear cámaras con movilidad (pan-tilt)
- Con una sola cámara, es más complicado obtener información 3D (salvo objetos conocidos, homografía)
- Con varias cámaras, se obtiene información 3D. Se aumenta la sensibilidad a los errores de calibración.



Estrategias de Adquisición de Imágenes

Ubicación de la cámara. Cámara(s) externa(s) (eye-to-hand)

- Una cámara pan-tilt
- Dos cámaras pan-tilt





Estrategias de Adquisición de Imágenes

Ubicación de la cámara. Cámara(s) en el robot (eye-in-hand)

- La cámara se encuentra solidaria al robot (problemas de vibraciones y difuminado por el movimiento): extremo de robot, cabeza humanoide
- Puede ser necesario conocer la relación entre la posición de las articulaciones del robot y la posición de la cámara (calibración cinemática)
- Incrementa la resolución efectiva, y evita la posible obstrucción del objeto de interés
- Campo visual reducido. Problemas de difuminado por la profundidad de campo
- Se puede optar por una o dos cámaras. Si el entorno es estático se puede aprovechar el movimiento del robot para obtener dos vistas
- El sistema de visión capta información del entorno de trabajo
 - La cámara observa únicamente el objeto destino (EOL) . La precisión depende de la calibración y de la reconstrucción realizada
 - La cámara observa el objeto y el extremo del robot (ECL). Mejor precisión, pero problemas de oclusiones y coste procesamiento de imágenes



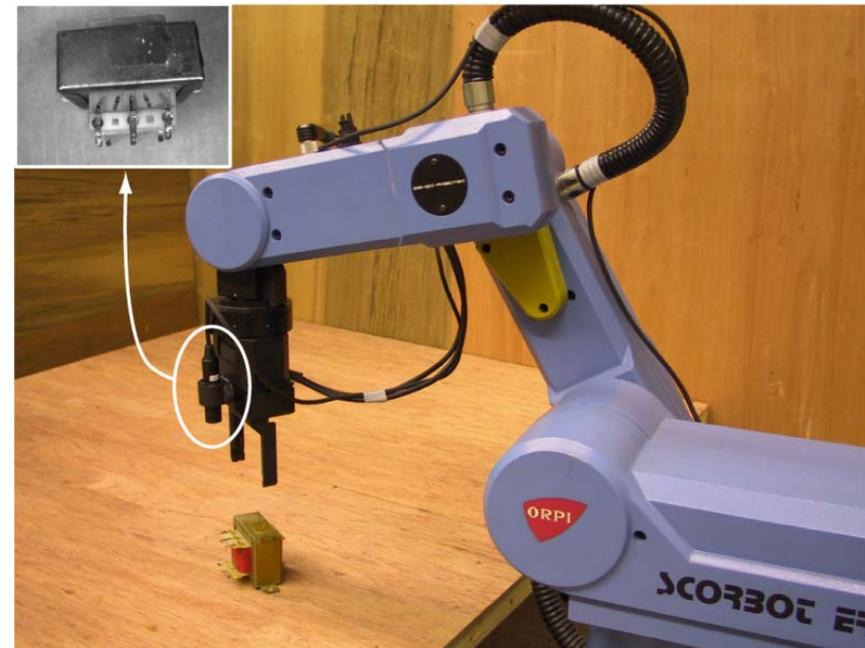
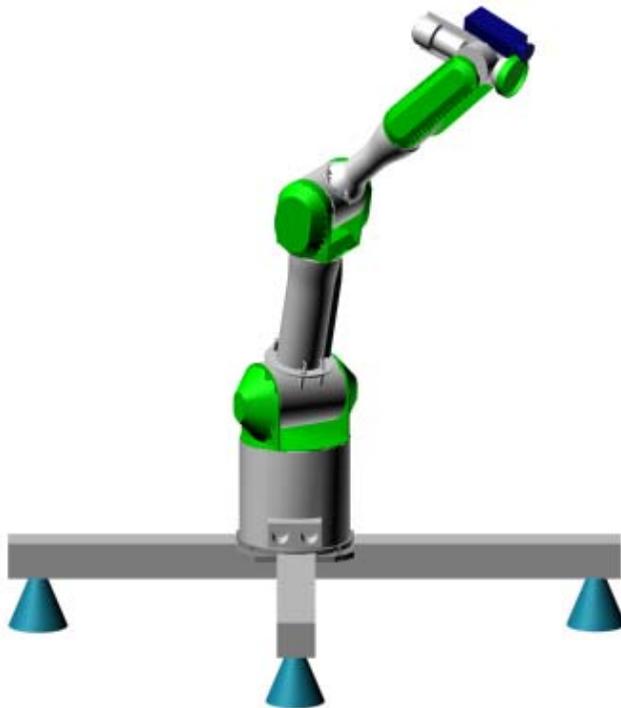
Estrategias de Adquisición de Imágenes

INDUSTRIALES
ETSII | UPM

Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

CONTROL VISUAL DE ROBOTS

Ubicación de la cámara. Cámara(s) extremo del robot (eye-in-hand)



Sistema EOL. La cámara no observa la pinza del robot

Fuente de las imágenes: AUROVA - Universidad de Alicante



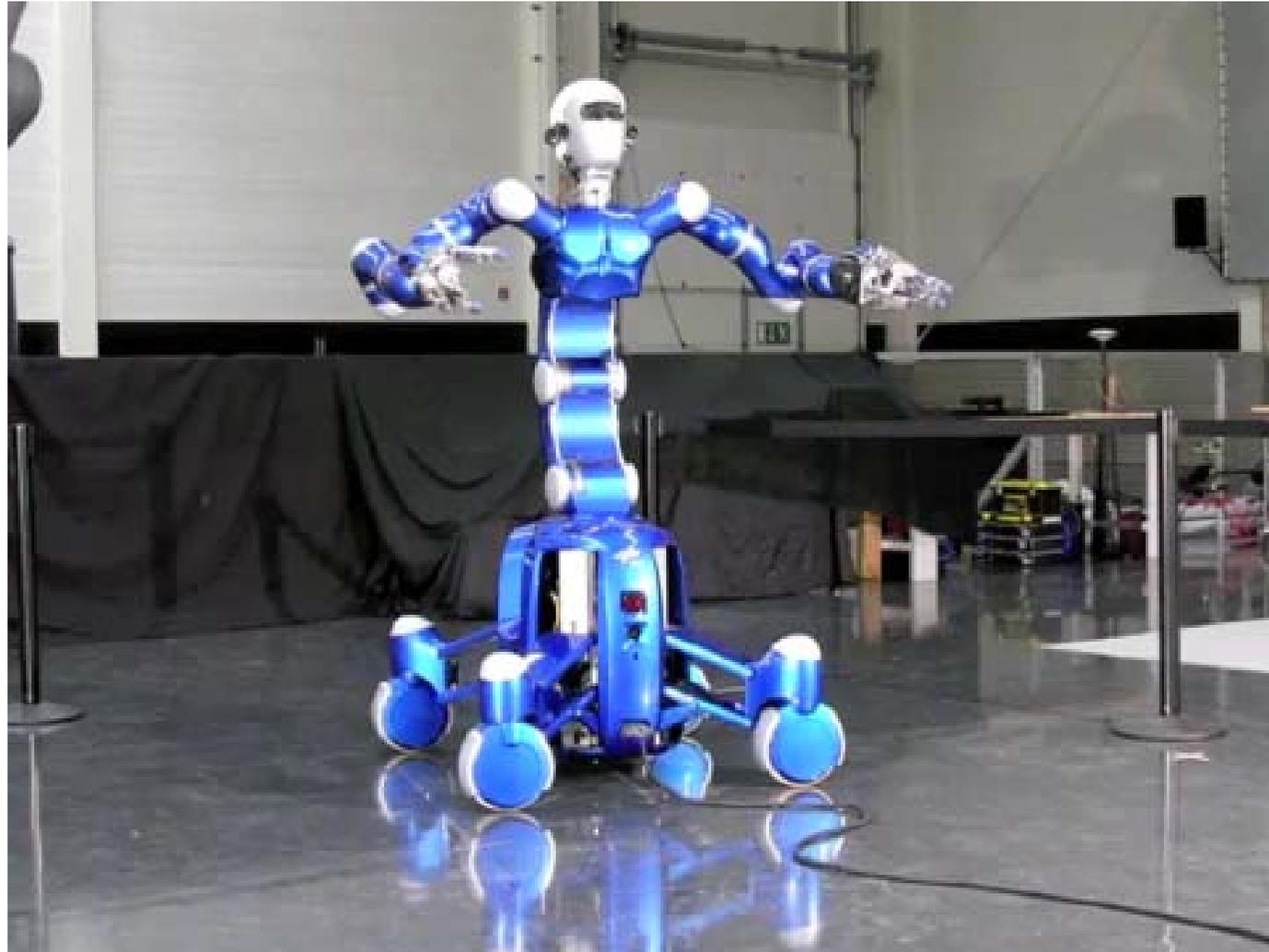
Estrategias de Adquisición de Imágenes

INDUSTRIALES
ETSII | UPM

Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

Ubicación de la cámara. Cámara(s) en el robot (eye-in-hand)

CONTROL VISUAL DE ROBOTS



*Fuente del video:
German Aerospace
Center (DLR)*



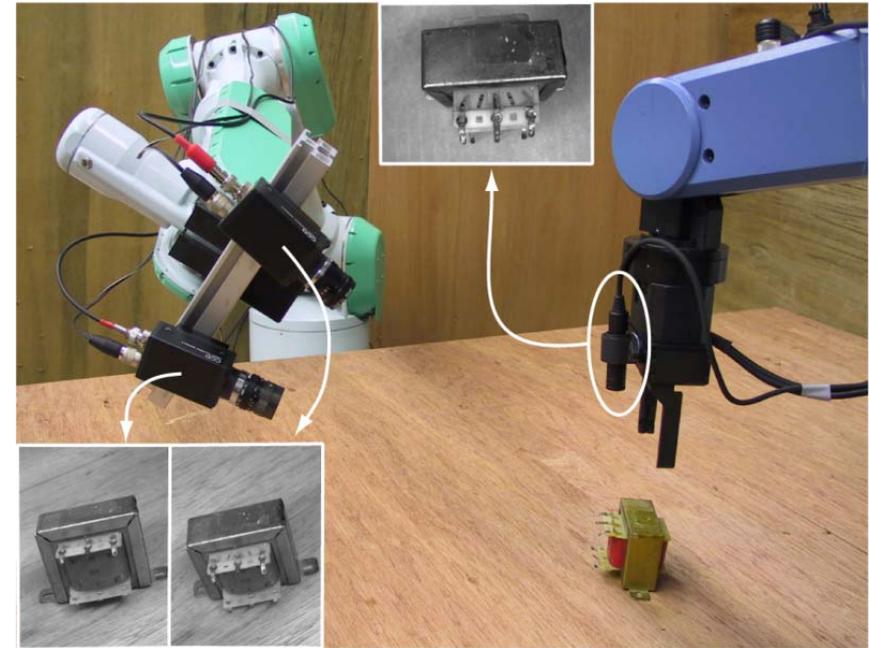
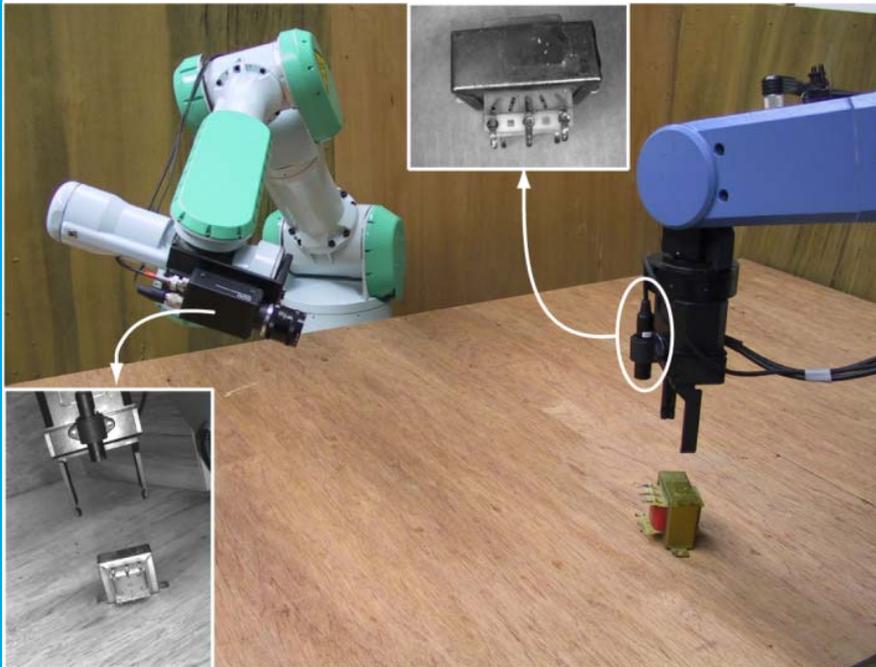
Estrategias de Adquisición de Imágenes

INDUSTRIALES
ETSII | UPM

Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

Ubicación de la cámara. Alternativas conjuntas

CONTROL VISUAL DE ROBOTS



Fuente de las imágenes: AUROVA - Universidad de Alicante



Estrategia híbridas con un par estéreo y una kinect



Hybrid Multi-camera Visual Servoing to Moving Target

Supplementary Video
Submission to IROS 2018

Hanz Cuevas-Velasquez, Nanbo Li, Radim Tylecek,
Robert B. Fisher (University of Edinburgh)
Marcelo Saval-Calvo (University of Alicante)



Consideraciones sobre las cámaras

- Cámaras ligeras y pequeñas para las ubicadas en el extremo del robot
- Con buen comportamiento ante el movimiento
- Cámaras B/N , RGB , RGB-D
- Cámaras calibradas, parcialmente calibradas (ajuste del zoom) o no calibradas
- Par estéreo calibrado proyectivamente (conocimiento de la matriz fundamental)



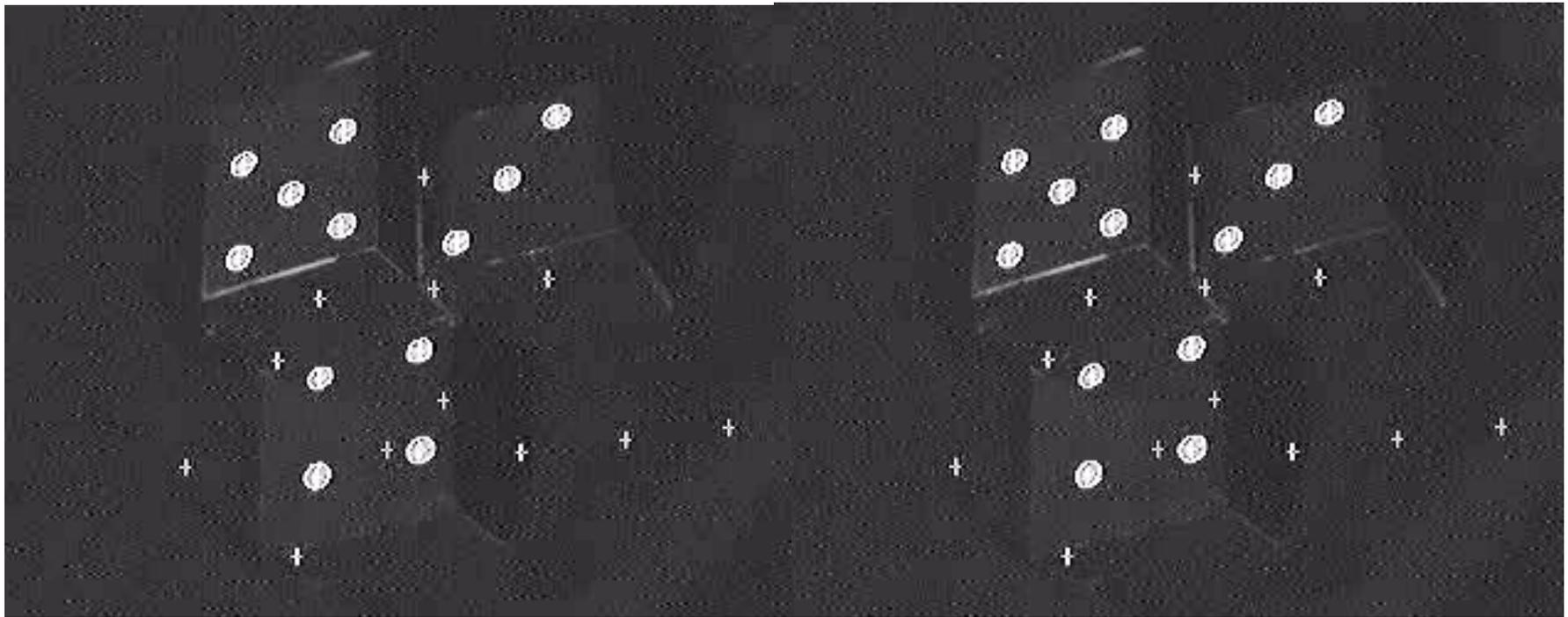
Estrategias de Adquisición de Imágenes

INDUSTRIALES
ETSII | UPM

Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

Control con cámaras calibradas o no calibradas

CONTROL VISUAL DE ROBOTS



Cámara calibrada

Cámara no calibrada

Fuente de los vídeos: Ezio Malis - INRIA



Control Visual de Robots

- Introducción
- Estrategias de Adquisición de Imágenes
- Estrategias de Interpretación de Imágenes
- Ley de Control Cinemático
- Estabilidad
- Seguimiento de Objetos
- Estructuras de Control Visual
- Líneas de Investigación



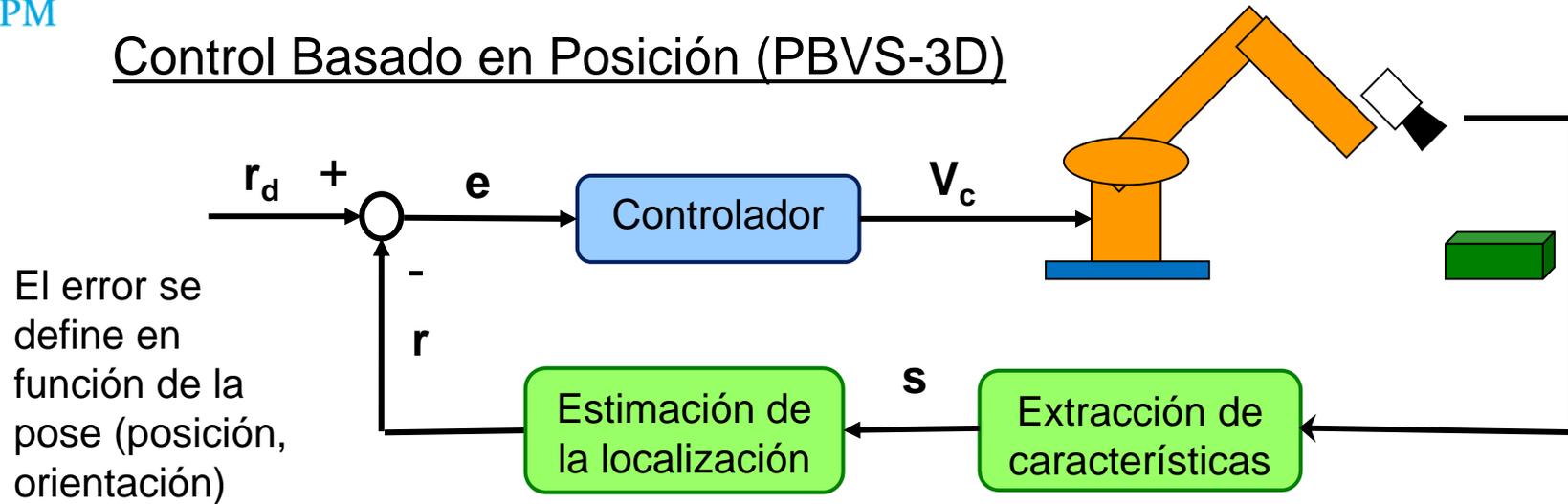
Estrategias de Interpretación de Imágenes

INDUSTRIALES
ETSII | UPM

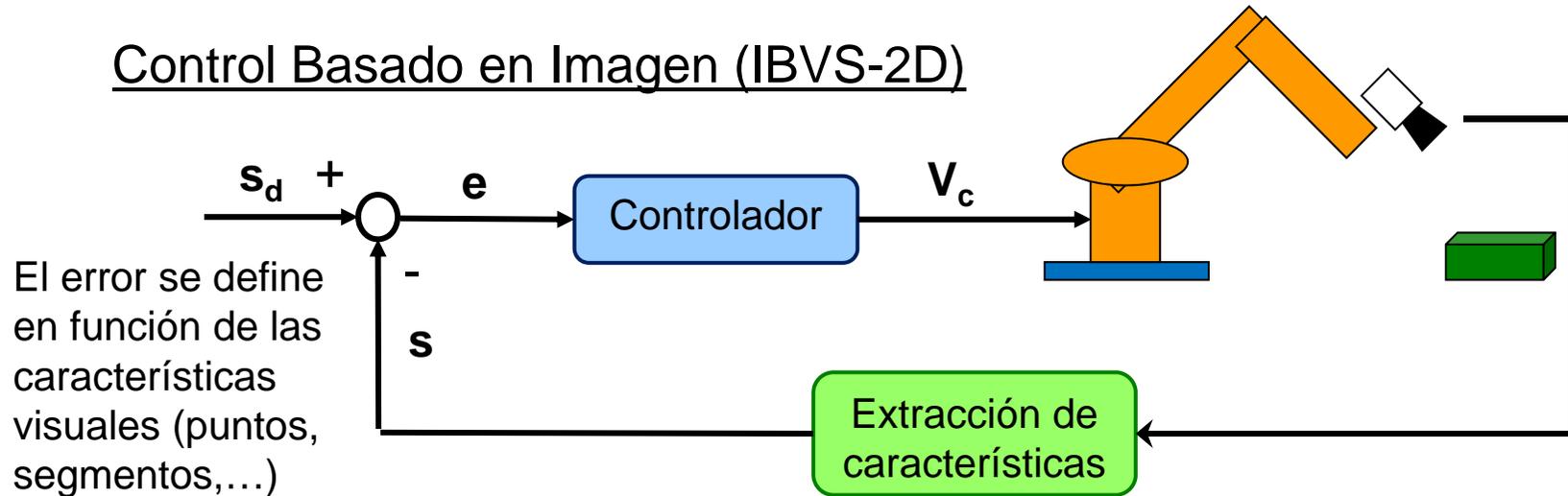
Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

CONTROL VISUAL DE ROBOTS

Control Basado en Posición (PBVS-3D)



Control Basado en Imagen (IBVS-2D)





- Control Basado en Posición (PBVS-3D)
 - El error se define en función de la pose (posición, orientación)
- Control Basado en Imagen (IBVS-2D)
 - El error se define en función de las características visuales (puntos, segmentos,...)
- Híbrido: Basado en Posición y en Imagen (2D $\frac{1}{2}$)
 - Mezcla componentes de la posición y la imagen
- Particionado
 - Intenta desacoplar las variables
- Basado en modelos



Control Basado en Posición (PBVS-3D)

- A partir de la información visual se estima la localización del objeto a alcanzar (posición y orientación)
- Mayores requerimientos geométricos. Se requiere información adicional: modelo del espacio de trabajo, modelo geométrico del objeto, calibración cinemática
- Trabaja en el espacio cartesiano. Se puede fijar la trayectoria del robot evitando colisiones
- Control desacoplado
- No se produce singularidades
- No se realiza un control en la imagen. Las características visuales pueden abandonar los límites de la imagen
- Sensible a los errores de calibración y estimación de la posición
- Estabilidad global asintótica (bajo buenas condiciones de estimación).



Estrategias de Interpretación de Imágenes

INDUSTRIALES
ETSII | UPM

Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

Control Basado en Posición (PBVS-3D)

Requerimientos geométricos con cámara ubicada en el entorno

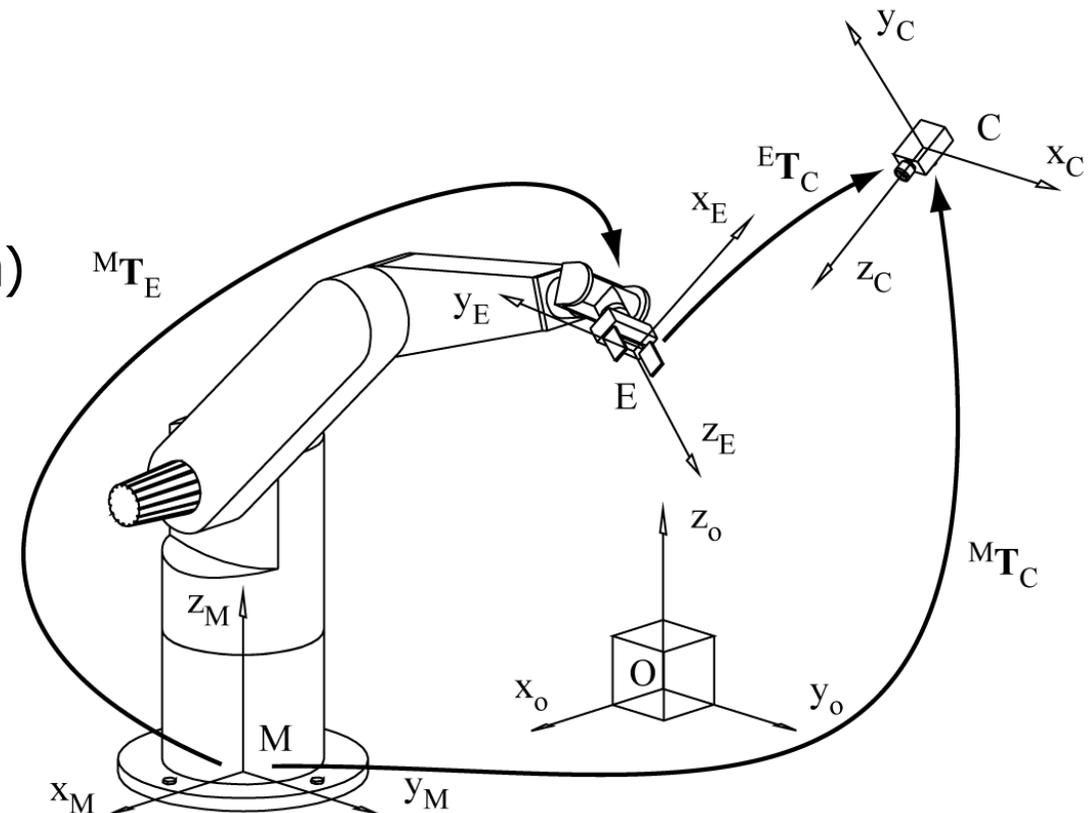
- Cinemática directa (base del robot \Rightarrow extremo del robot)
- Calibración cámara (mundo \Rightarrow cámara)
- Calibración cinemática (base robot \Rightarrow cámara)

La calibración cinemática implica resolver la ecuación

$$R_A R = R R_B$$

Con $R_A R_B$ conocidas

R incógnita



Fuente de las imágenes: AUROVA
- Universidad de Alicante



Estrategias de Interpretación de Imágenes

INDUSTRIALES
ETSII | UPM

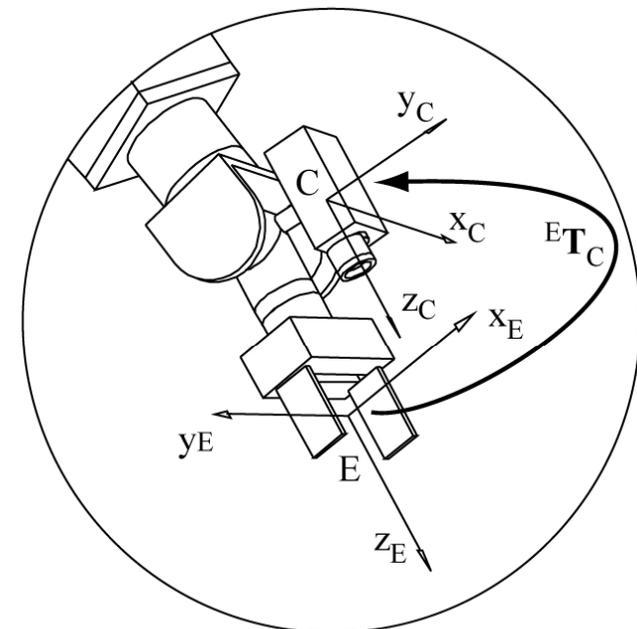
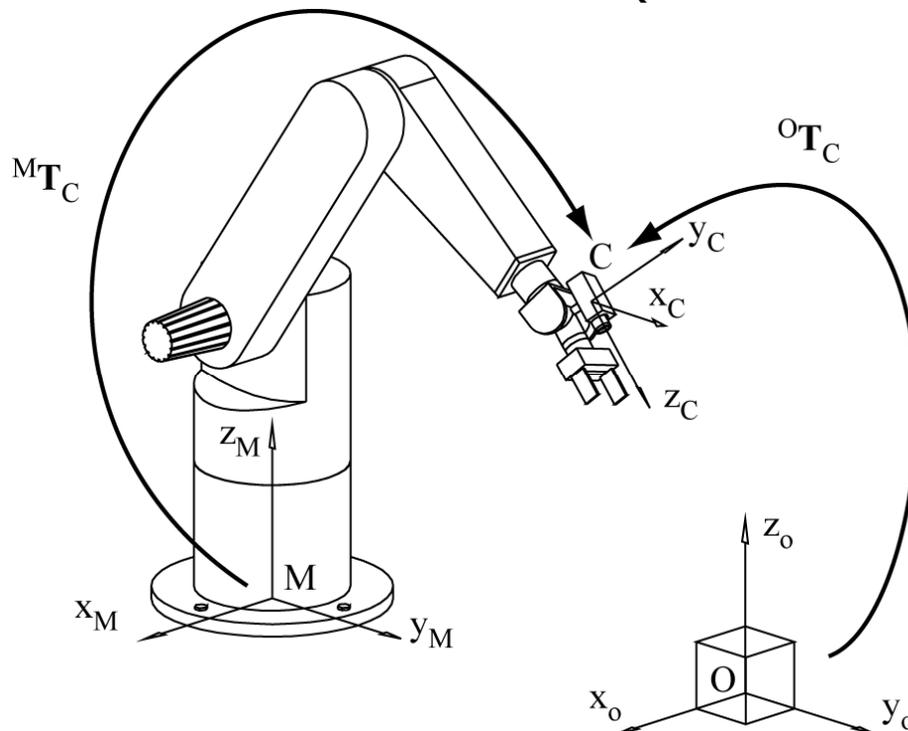
Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

Control Basado en Posición (PBVS-3D)

Requerimientos geométricos con cámara extremo del robot

- Cinemática directa (base del robot \Rightarrow extremo del robot)
- Calibración cámara (mundo \Rightarrow cámara)
- Calibración cinemática (extremo del robot \Rightarrow cámara)

$$R_A R = R R_B$$



Fuente de las imágenes: AUROVA
- Universidad de Alicante



Control Basado en Imagen (IBVS-2D)

- La información visual es utilizada directamente para estimar el movimiento del robot.
- Requiere una menor interpretación de la imagen.
- Se necesita menos conocimiento previo del entorno
- Más robusto a los errores de calibración y reconstrucción
- Mejor precisión en la ejecución de la tarea
- Diseño del controlador más complejo
- Posibles problemas de singularidades
- No estima la trayectoria del robot, posibles problemas de colisión
- El control se realiza en la imagen, por lo que es más fácil evitar que las características visuales abandonen los límites de la cámara
- Estabilidad local asintótica



Control Basado en Imagen (IBVS-2D)

- Implica el conocimiento de la Matriz de Interacción o Jacobiana de la Imagen: relaciona la velocidad (relativa cámara-objeto) de un objeto (punto, segmento, ...) en el espacio tridimensional con la velocidad de la proyección de dicho objeto (característica visual) en el espacio de la imagen
- Opciones para conocer la Jacobiana
 - Cálculo analítico. Implica conocer la calibración de la cámara y la calibración cinemática
 - Estimación "on-line" de la Jacobiana



Control Basado en Imagen (IBVS-2D)

- Se definen características visuales: Puntos (por ejemplo)
- Posición cartesiana del robot $\mathbf{r} = [r_1 \quad r_2 \quad \cdots \quad r_p]^T$
- Posición articular del robot $\mathbf{q} = [q_1 \quad q_2 \quad \cdots \quad q_n]^T$
- Jacobiana del robot (velocidad articular, velocidad cartesiana del extremo del robot) $\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{J}_{rq} \dot{\mathbf{q}}$

- Características de la imagen $\mathbf{s} = [s_1 \quad s_2 \quad \cdots \quad s_m]^T$
- Jacobiana de la imagen (velocidad cartesiana del extremo del robot, velocidad coordenadas de la cámara) $\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{J}_{sr} \dot{\mathbf{r}}$

- Visual-Motor
Jacobiana $\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{J}_{sq} \dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial s_1}{\partial q_1} & \cdots & \frac{\partial s_1}{\partial q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial s_m}{\partial q_1} & \cdots & \frac{\partial s_m}{\partial q_n} \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} ; \text{ con } \mathbf{J}_{sq} = \mathbf{J}_{sr} \mathbf{J}_{rq}$



Estrategias de Interpretación de Imágenes

INDUSTRIALES
ETSII | UPM

Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

Control Basado en Imagen (IBVS-2D)

- Posición de un punto en el espacio $\mathbf{p} = [x \quad y \quad z]^T$
- Características de la imagen $\mathbf{s} = [s_1 \quad s_2 \quad \dots \quad s_m]^T = [u \quad v]^T$
- Proyección en la imagen $u = f \frac{x}{z}$; $v = f \frac{y}{z}$
- Movimiento de un punto en el espacio

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z & -y \\ 0 & 1 & 0 & -z & 0 & x \\ 0 & 0 & 1 & y & -x & 0 \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} T_x & T_y & T_z & w_x & w_y & w_z \end{bmatrix}^T}_{\mathbf{V}}$$

- Jacobiana de la imagen $\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{J}_{sr} \mathbf{V}$

z : Reconstrucción 3D

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f/z & 0 & -u/z & -uv/f & (f^2 + u^2)/f & -v \\ 0 & f/z & -v/z & -(f^2 + v^2)/f & uv/f & u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ w \end{bmatrix}$$



Control Basado en Imagen (IBVS-2D)

- Para una línea, con representación polar en la imagen

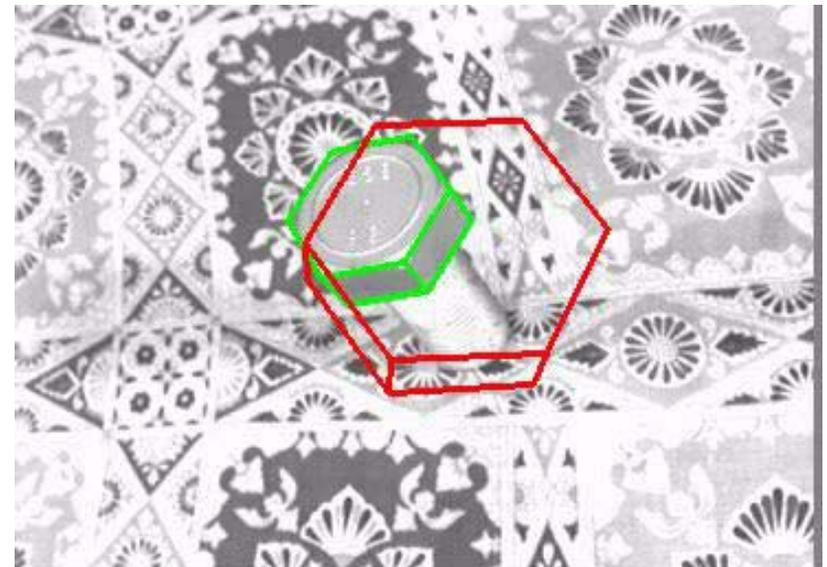
Características $s = [\theta \quad \rho]^T$

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\rho} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{\theta} \sin \theta & \lambda_{\theta} \cos \theta & -\rho \lambda_{\theta} & -\rho \sin \theta & -\rho \cos \theta & -1 \\ \lambda_{\rho} \sin \theta & \lambda_{\rho} \cos \theta & -\rho \lambda_{\rho} & -\cos \theta (1 + \rho^2) & \sin \theta (1 + \rho^2) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ w \end{bmatrix}$$

Con $\lambda_{\theta} = (a \cos \theta - b \sin \theta) / d$
 $\lambda_{\rho} = -(a \rho \sin \theta + b \rho \cos \theta + c) / d$

Sponiendo que se conoce un plano que contiene a la recta (información 3D)

$$aX + bY + cZ + d = 0$$





Control Basado en Imagen (IBVS-2D)

Algunas características visuales en la imagen

- Puntos
- Segmentos
- Líneas
- Cónicas
- Áreas
- Momentos
- SIFT
- SURF
- KAZE
- Esquinas Harris



Estrategias de Interpretación de Imágenes

INDUSTRIALES
ETSII | UPM

Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

CONTROL VISUAL DE ROBOTS

- Control Basado en Posición (PBVS-3D)
 - El error se define en función de la pose (posición, orientación)
- Control Basado en Imagen (IBVS-2D)
 - El error se define en función de las características visuales (puntos, segmentos,...)
- Híbrido: Basado en Posición y en Imagen (2D $\frac{1}{2}$)
 - Mezcla componentes de la posición y la imagen
- Particionado
 - Intenta desacoplar las variables
- Basado en modelos



Estrategias de Interpretación de Imágenes

Control Basado en Posición e Imagen (2D $\frac{1}{2}$)

- Parte de las características visuales se basan en la posición y otras en la imagen
- Solución intermedia, Comparte las ventajas y los inconvenientes de ambas métodos previos
- Se necesita menos conocimiento previo que en el PBVS
- Más robusto a los errores de calibración y adquisición que el PVBS
- Control en la imagen y en el espacio tridimensional. Evita que las características de la imagen se salga de la misma y las colisiones del robot
- Buena precisión en la ejecución de la tarea



Estrategias de Interpretación de Imágenes

INDUSTRIALES
ETSII | UPM

Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

CONTROL VISUAL DE ROBOTS

Control Basado en Posición e Imagen (2D $\frac{1}{2}$)

- Punto en la imagen (u, v) , pose $(X, Y, Z, \theta a_x, \theta a_y, \theta a_z)$

$$s = \begin{bmatrix} u \\ v \\ \log Z \\ \theta a_x \\ \theta a_y \\ \theta a_z \end{bmatrix} = \begin{array}{l} \text{Coordenada de la imagen} \\ \text{Coordenada de la imagen} \\ \text{Profundidad relativa} \\ \text{Rotación deseada} \end{array}$$

- Ventajas
 - Matriz Jacobiana triangular y nunca singular



Control Particionado

$$\begin{aligned}\dot{s} &= J V = J \begin{bmatrix} T_x & T_y & T_z & w_x & w_y & w_z \end{bmatrix}^T = \\ &= \boxed{J_{xy} \begin{bmatrix} T_x & T_y & w_x & w_y \end{bmatrix}^T} + \boxed{J_z \begin{bmatrix} T_z & w_z \end{bmatrix}^T} = \dot{s}_{xy} + \dot{s}_z\end{aligned}$$

- Ventajas
 - Permite incorporar mejor en el control características propias del robot o de la tarea



Estrategias de Interpretación de Imágenes

INDUSTRIALES
ETSII | UPM

Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

Control Basado en Modelos

Coordinates	Edge-based [13]	Texture-based [14]	Hybrid [15]
X	0.2245 μm	0.7861 μm	0.2551 μm
Y	0.7026 μm	0.8650 μm	0.6207 μm
Z	24.3304 μm	44.1736 μm	14.8640 μm
roll	0.0859 $^\circ$	0.1607 $^\circ$	0.0610 $^\circ$
pitch	0.0577 $^\circ$	0.1254 $^\circ$	0.0539 $^\circ$
yaw	0.0608 $^\circ$	0.0984 $^\circ$	0.0461 $^\circ$

Université de Franche-Comté/CNRS/ENSMM/UTBM
Besançon, France

*Fuente del vídeo:
Université de
Franche-Comté/
CBRS/EBSMM/
UTBM, Francia*

February 2015



Control Visual de Robots

- Introducción
- Estrategias de Adquisición de Imágenes
- Estrategias de Interpretación de Imágenes
- Ley de Control Cinemático
- Estabilidad
- Seguimiento de Objetos
- Estructuras de Control Visual
- Líneas de Investigación



Ley de Control Cinemática

- Se adopta la misma formulación para todas las estrategias de adquisición de imágenes: s ; ya sean características (imagen), la pose (posición) o mixto (híbrido)
- Para posición r_p la dimensión es 6 en el caso genérico
- Para imagen depende del número de características. Un número alto minimiza los errores de procesamiento de imágenes, pero puede conducir a mínimos locales o a la imposibilidad de cumplir el objetivo
- El entorno puede estar sin movimiento (estático) o en movimiento (dinámico). En el segundo caso suele ser necesario desarrollar un estimador del movimiento
- El error se define $e = s - s_d$
 - Si $s_d = cte$ y entorno estático, tarea de posicionamiento
 - Si $s_d = cte$ y entorno dinámico, tarea de seguimiento
 - Si $s_d \neq cte$ y entorno estático, tarea de seguimiento (de camino o trayectoria)
 - Si $s_d \neq cte$ y entorno dinámico, tarea de alcance o colisión



Ley de Control Cinemática

Control Basado en Imagen (IBVS-2D)

- Error: $e = s - s_d$ con $s_d = cte$
- Jacobiana de la imagen $\dot{s} = J_{sr} \dot{r} = J \dot{r} = J V = J [T \quad w]^T$
- Se cumple: $\dot{e} = J V$ con $J \in R^{m_x \times 6}$ (IBVS)
- Para asegurar que el error decrezca $\dot{e} = -\lambda e$
- Una opción: $V_c = -\lambda J^+ e$ con $\lambda > 0$, $J^+ = (J^T J)^{-1} J^T$

V : velocidad del extremo del robot V_c : velocidad de control del robot

- Se estima la matriz Jacobiana (si no se conoce Z se puede emplear Z_d)

$$V_c = -\lambda \hat{J}^+ e \quad \text{Opciones: } \hat{J}^+ = \begin{cases} J_e^+ \\ J_{e_d}^+ \end{cases}$$



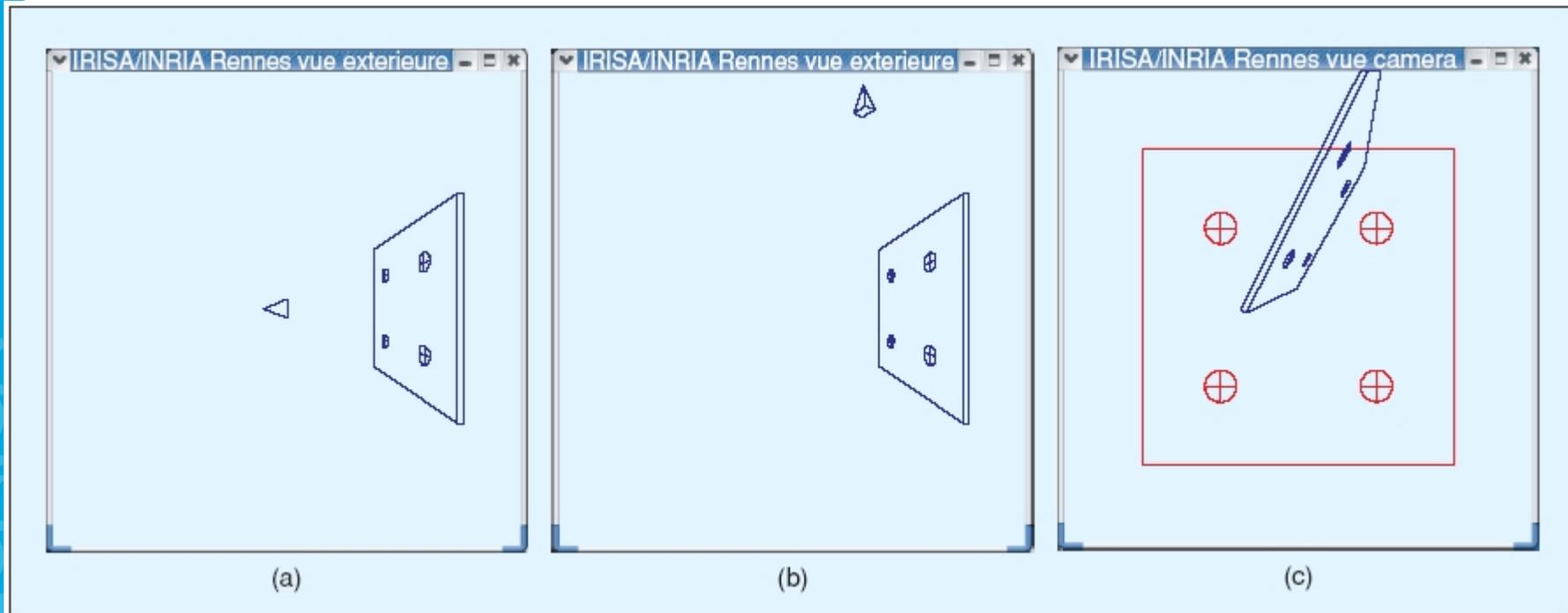
Ley de Control Cinemática

Control Basado en Imagen (IBVS-2D)

Posición Deseada

Posición Inicial

Imagen

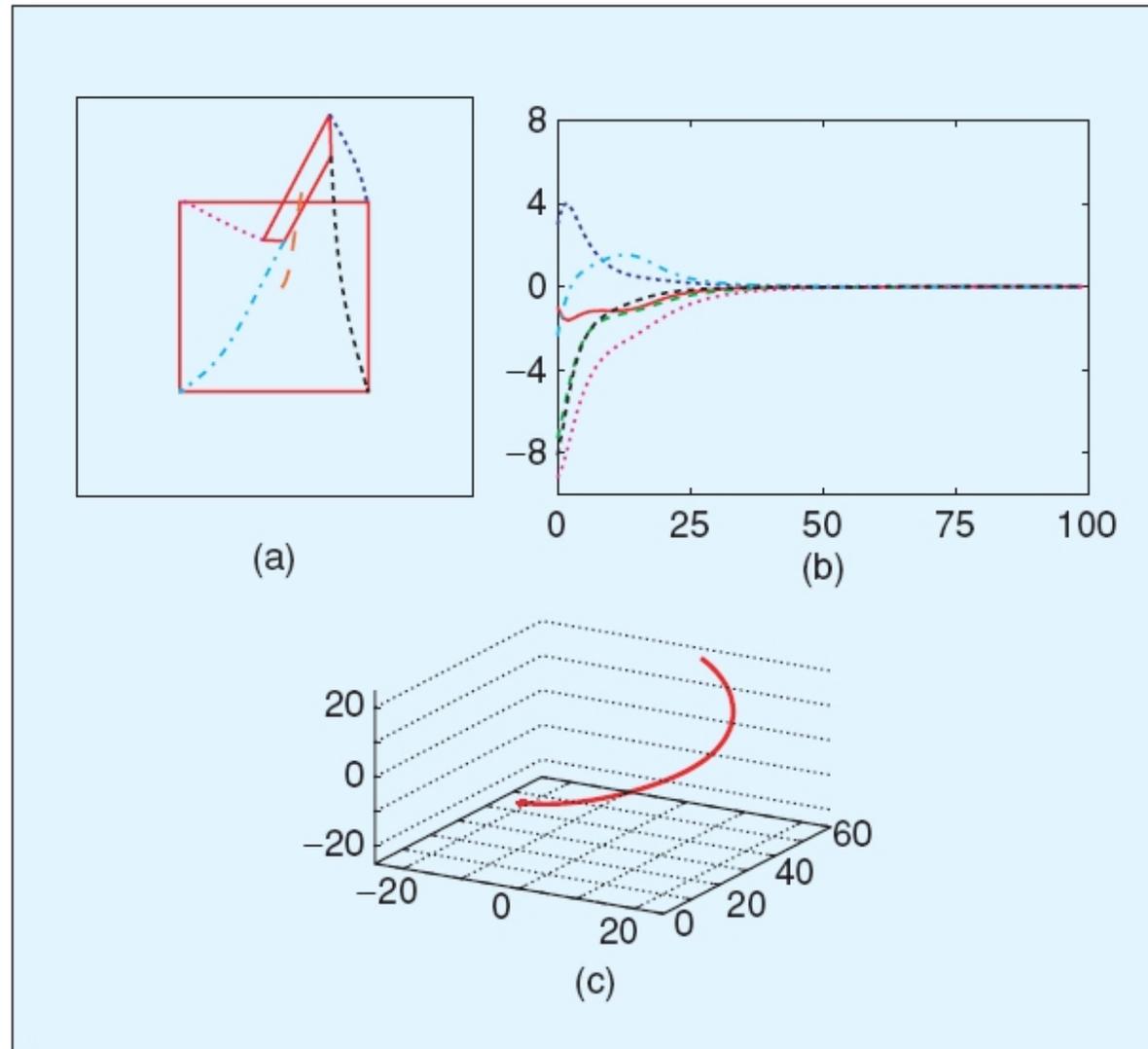


- *Visual Servo Control (I): Basic Approaches. IEEE Robotics & Automation Magazine. Dic 2006. F. Chaumette y S. Hutchinson*
- *Visual Servo Control (II): Advances Approaches. IEEE Robotics & Automation Magazine. Mar 2007. F. Chaumette y S. Hutchinson*



Ley de Control Cinemática

Control Basado en Imagen (IBVS-2D)



Fuente de la imagen:
F. Chaumette y
S. Hutchinson



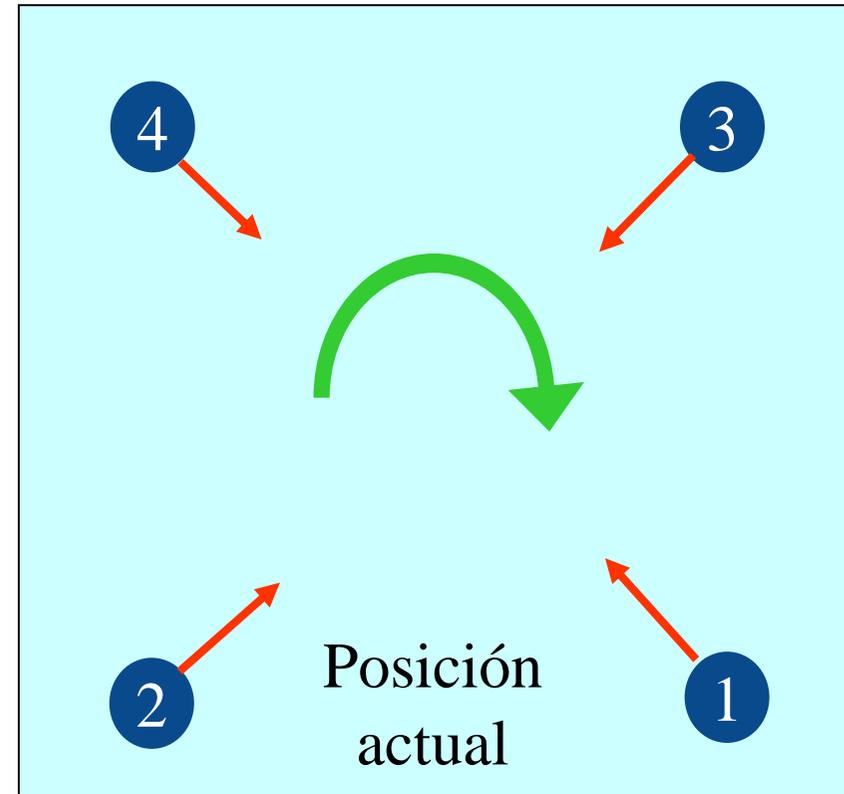
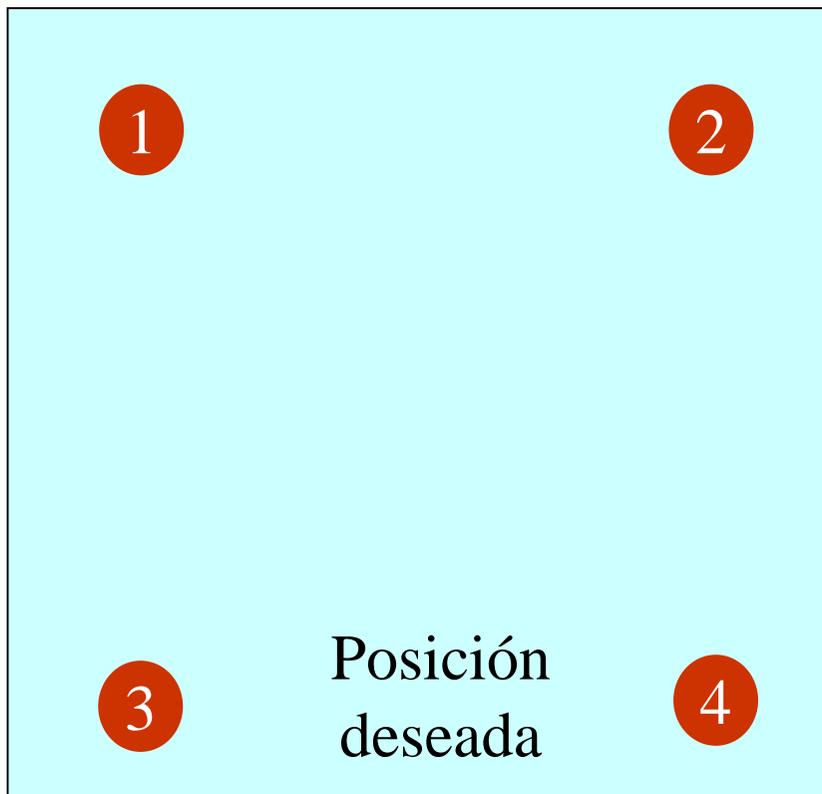
Ley de Control Cinemática

INDUSTRIALES
ETSII | UPM

Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

Control Basado en Imagen (IBVS-2D). Paradoja

CONTROL VISUAL DE ROBOTS



- ◆ El robot intenta disminuir la distancia entre características, alejándose del objeto
- ◆ Debería girar la cámara (el extremo del robot)



Ley de Control Cinemática

Control Basado en Imagen (IBVS-2D). Paradoja

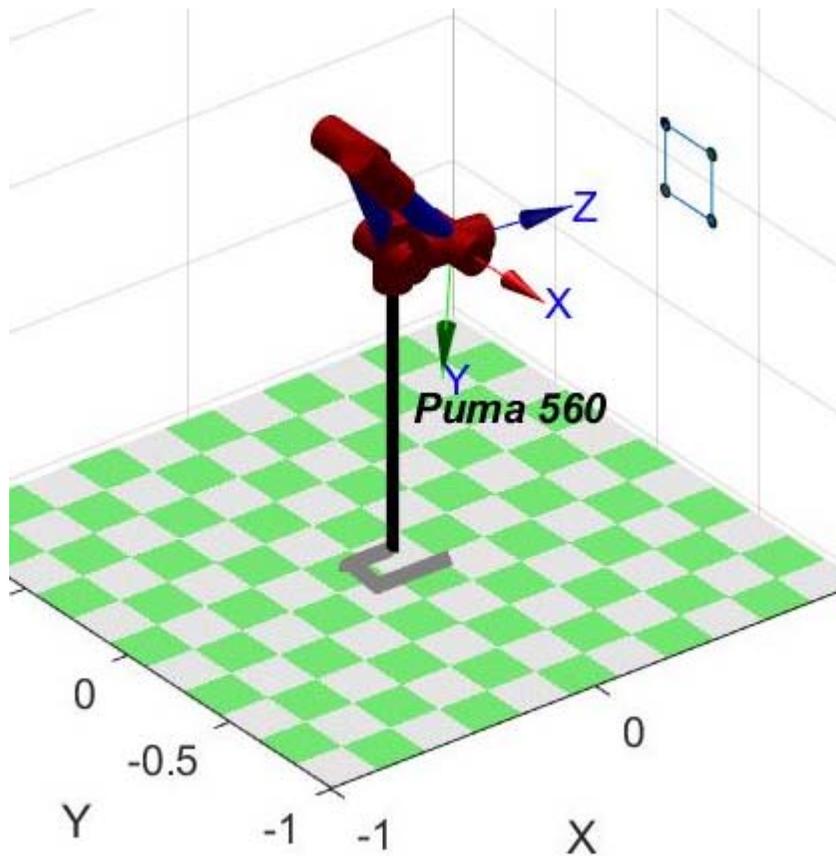
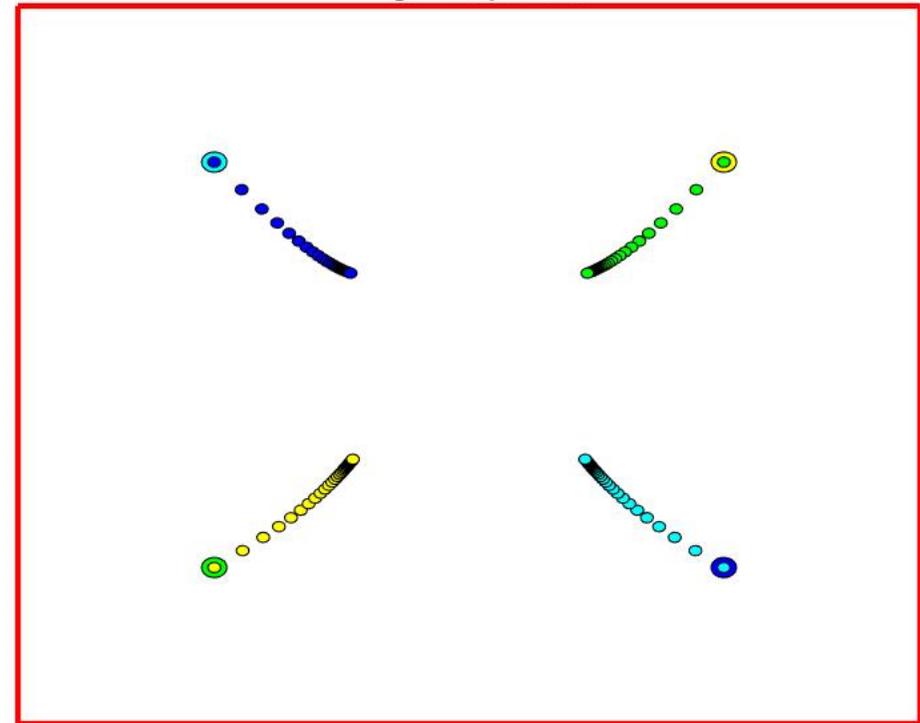


Imagen capturada



- ◆ El robot intenta disminuir la distancia entre características, alejándose del objeto



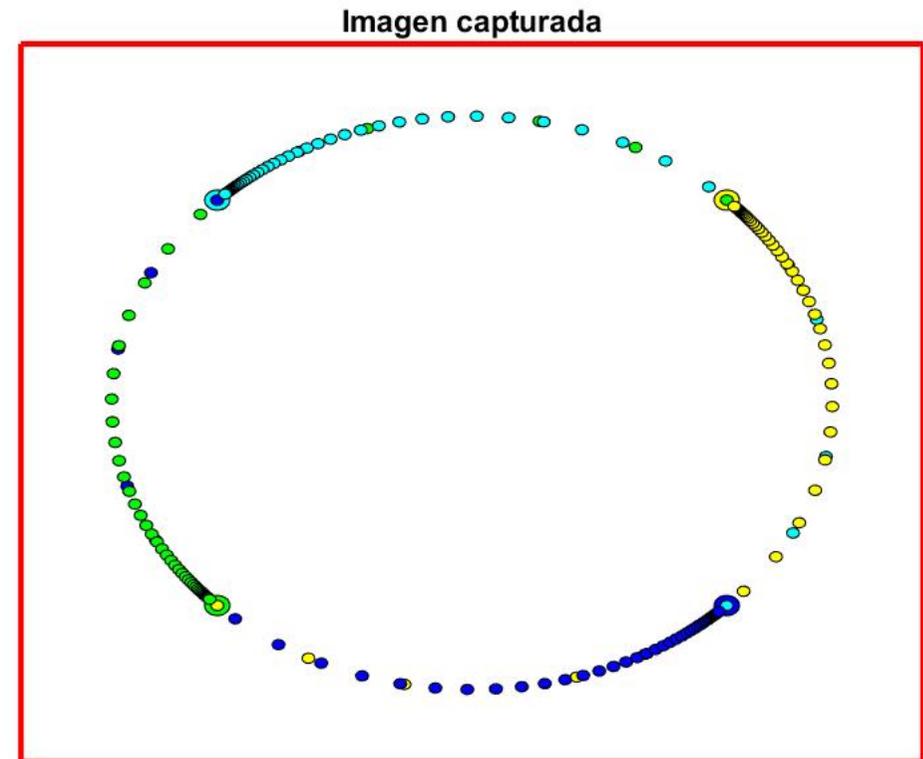
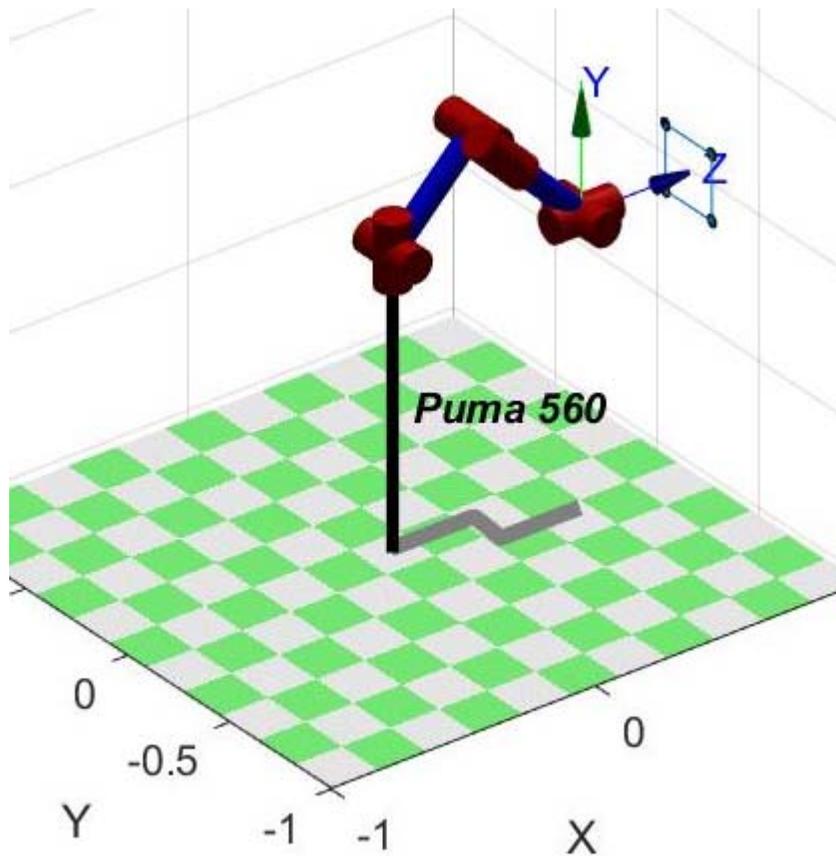
Ley de Control Cinemática

INDUSTRIALES
ETSII | UPM

Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

Control Basado en Imagen (IBVS-2D). Paradoja

CONTROL VISUAL DE ROBOTS



- ◆ Debería girar la cámara (el extremo del robot)



Ley de Control Cinemática

Control Basado en Posición (PBVS-3D)

- Relativo a la posición deseada de la cámara:

$$s = (t_c, \theta a) \quad ; \quad s = (0, 0) \quad ; \quad e = (t_c, \theta a)$$

- Jacobiana de la imagen

$$J = \begin{bmatrix} R_c & 0 \\ 0 & J_{\theta a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_c & 0 \\ 0 & J_{\theta a} \end{bmatrix} \quad ; \quad J \in R^{6 \times 6} \quad (PBVS)$$

$$J_{\theta a} = I_3 - \frac{\theta}{2} [a]_x + \left(1 - \frac{\text{sinc } \theta}{\text{sinc}^2 \frac{\theta}{2}} \right) [a]_x^2$$

- Ley de control

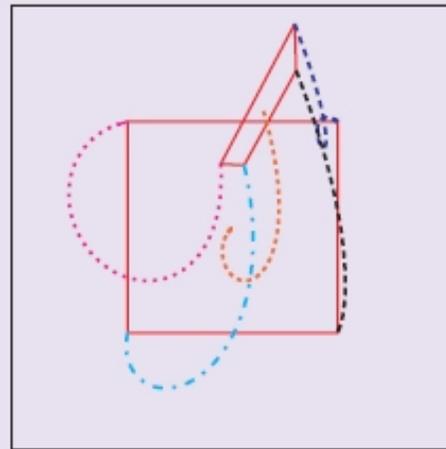
$$V_c = -\lambda \hat{J}^{-1} e = [T_c \quad w_c]^T$$

$$\begin{cases} T_c = -\lambda R_c^T t_c & ; & w_c = -\lambda \theta a \end{cases}$$

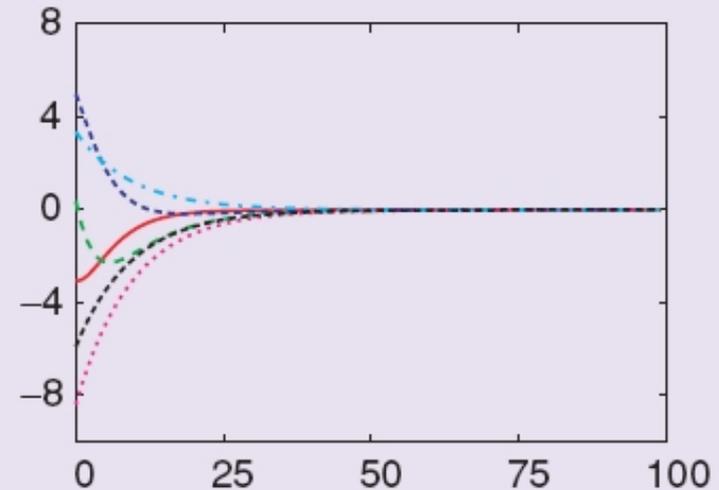


Ley de Control Cinemática

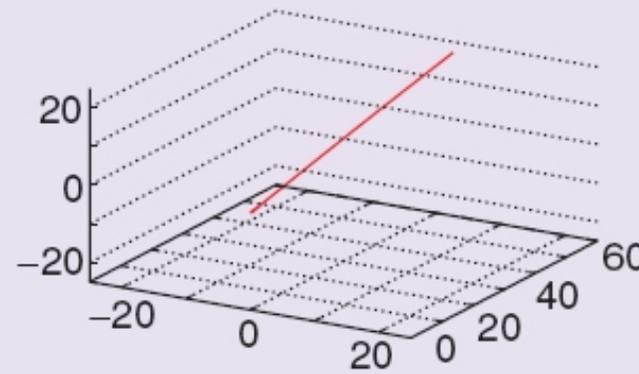
Control Basado en Imagen (PBVS-3D)



(a)



(b)



(c)

Fuente de la imagen:

F. Chaumette y

S. Hutchinson



Ley de Control Cinemática

INDUSTRIALES

Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

ETSII | UPM

Control Híbrido. Basado en Posición-Imagen(2½D)

$$s = (u_g, v_g, \log z_g, \theta a) \quad s_d = \left((u_g)_d, (v_g)_d, \log (z_g)_d, 0 \right)$$

$$J = \begin{bmatrix} J_T & J_w \\ 0 & J_{\theta a} \end{bmatrix} \quad J_{\theta a} = I_3 - \frac{\theta}{2} [a]_x + \begin{pmatrix} 1 - \frac{\text{sinc } \theta}{\text{sinc}^2 \frac{\theta}{2}} \end{pmatrix} [a]_x^2$$

$$J_T = \frac{1}{\rho(z)} \begin{bmatrix} -1 & 0 & u_g \\ 0 & -1 & v_g \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} ; \quad J_w = \begin{bmatrix} u_g v_g & -(1+u_g^2) & v_g \\ (1+v_g^2) & -u_g v_g & -u_g \\ -v_g & u_g & 0 \end{bmatrix}$$

Ley de control $V_c = -\lambda \hat{J}^{-1} e = [T_c \quad w_c]^T$

$$\begin{cases} T_c = -\hat{J}_T^{-1} (\lambda e_T + \hat{J}_w w_c) \\ w_c = -\lambda \theta a \end{cases}$$



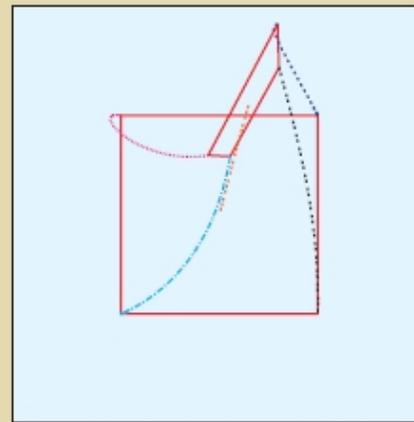
Ley de Control Cinemática

INDUSTRIALES
ETSII | UPM

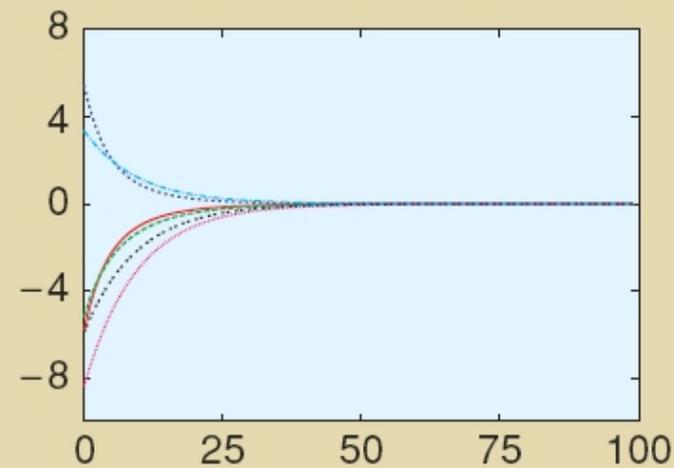
Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

Control Híbrido. Basado en Posición-Imagen(2½D)

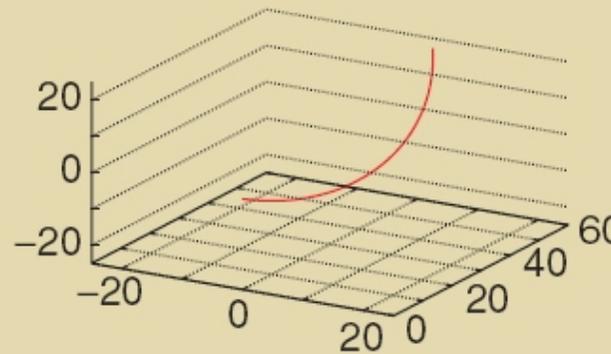
CONTROL VISUAL DE ROBOTS



(a)



(b)



(c)

Fuente de la imagen:
F. Chaumette y
S. Hutchinson



Ley de Control Cinemática

- Las posiciones o características deseadas tienen que ser realizables físicamente. Es normal que se aprendan bajo guiado supervisado.
- Las anteriores ecuaciones se expresan en función de la ley de control cartesiana. Sobre el robot se actúa con la ley de control articular, que se obtiene con la Jacobiana del Robot, o con la Cinemática Inversa.

$$\dot{q}_c = J_R^+ V_c = -\lambda J_R^+ J^+ e \quad \text{con } \lambda > 0$$

- En muchas aplicaciones es necesario incluir la dinámica del robot, añadiendo un controlador dinámico. Dicho controlador depende en exceso de las características de cada robot, por lo que es difícil su generalización.



Control Visual de Robots

- Introducción
- Estrategias de Adquisición de Imágenes
- Estrategias de Interpretación de Imágenes
- Ley de Control Cinemático
- Estabilidad
- Seguimiento de Objetos
- Estructuras de Control Visual
- Líneas de Investigación



Estabilidad

Control Basado en Imagen (IBVS-2D)

- Función candidata de Lyapunov $\mathcal{L} = \|e\|^2 / 2$
- Derivando $\dot{\mathcal{L}} = e^T \dot{e} = e^T J V \Rightarrow e^T J V_c = -\lambda e^T J \hat{J}^+ e$
- La estabilidad global asintótica depende de que $J \hat{J}^+ > 0$
- IBVS: $J \in R^{m_x \times 6} \Rightarrow J^+ \in R^{6 \times m}$
- Si $m > 6$ puede existir $\hat{J}^+ e = 0 \Rightarrow$ con $e \neq 0$
 - No se puede garantizar la estabilidad global. Tan solo la estabilidad local, pues puede caer en un mínimo local
 - Depende también de la calidad de la estimación



Estabilidad

Control Basado en Posición (PBVS-3D)

- Función candidata de Lyapunov $\mathbb{L} = \|e\|^2 / 2$
- Derivando $\dot{\mathbb{L}} = e^T \dot{e} = e^T J V \Rightarrow e^T J V_c = -\lambda e^T J \hat{J}^+ e$
- La estabilidad global asintótica depende de que $J \hat{J}^+ > 0$
- PBVS: $J \in R^{6 \times 6} \Rightarrow$ Existe inversa $J^{-1} \in R^{6 \times 6}$
- La estabilidad global dependerá solo de la calidad de la estimación de la Jacobiana

Control Híbrido. Basado en Posición-Imagen(2½D)

- $s = (u_g, v_g, \log z_g, \theta a)$ La estabilidad global dependerá solo de la calidad de la estimación de la Jacobiana



Estabilidad

- A fin de modelar más adecuadamente la inevitable saturación que se va a producir en los actuadores cuando el error es muy alto, se sustituye el error en la ley de control por una función que limite el error manteniendo el signo. Por ejemplo la tangente hiperbólica.

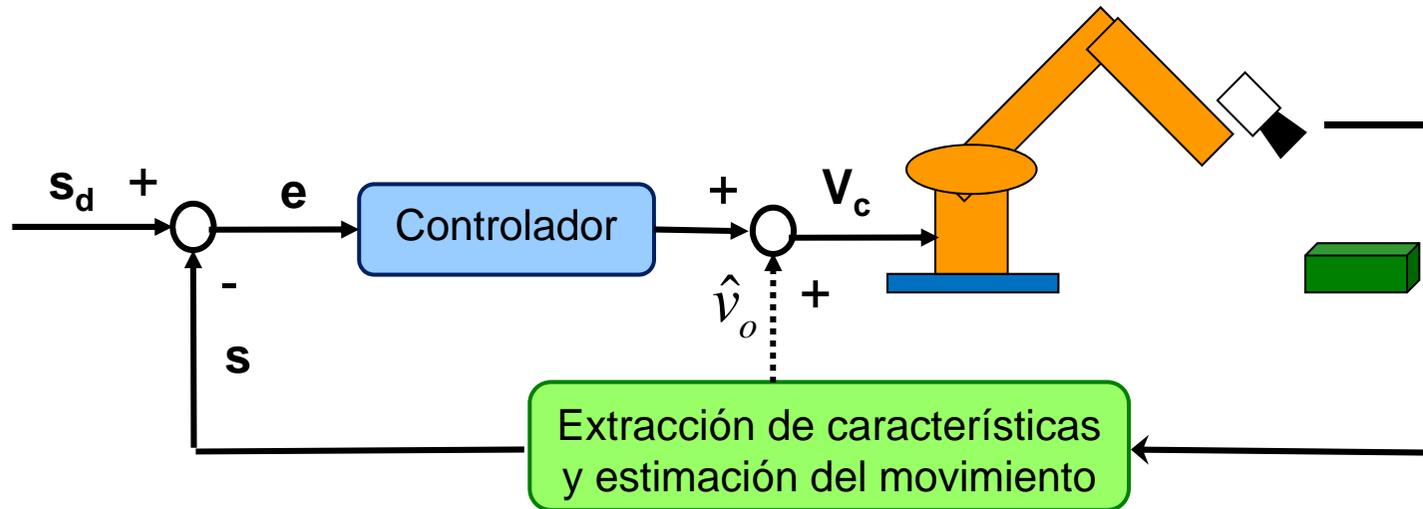
$$V_c = -\lambda \hat{J}^+ \tanh(\alpha e)$$

- En control basado en posición se puede afirmar que el error tenderá a disminuir hasta entrar en una hiperesfera de radio ρ (que depende de la estimación). Este radio puede cambiar a lo largo del tiempo. No se puede afirmar que el error tienda a cero, pero está acotado en función de la calidad de la estimación



Seguimiento de Objetos

Se desea que el robot siga a un objeto que se mueve, manteniéndose a una determinada distancia.



$$\text{Ley de control } V_c = -\lambda \hat{J}^+ e + \hat{v}_o$$

$$\text{Error seguimiento } \tilde{V} = V - V_c$$

$$\text{Error Vel. Obj } \tilde{v}_o = v_o - \hat{v}_o$$

$$\dot{L} = e^T \dot{e} \quad ; \quad \dot{e} = J(V - v_o)$$

$$\dot{L} = -\lambda e^T J \hat{J}^+ \dot{e} + e^T J (\hat{V} - \hat{v}_o)$$

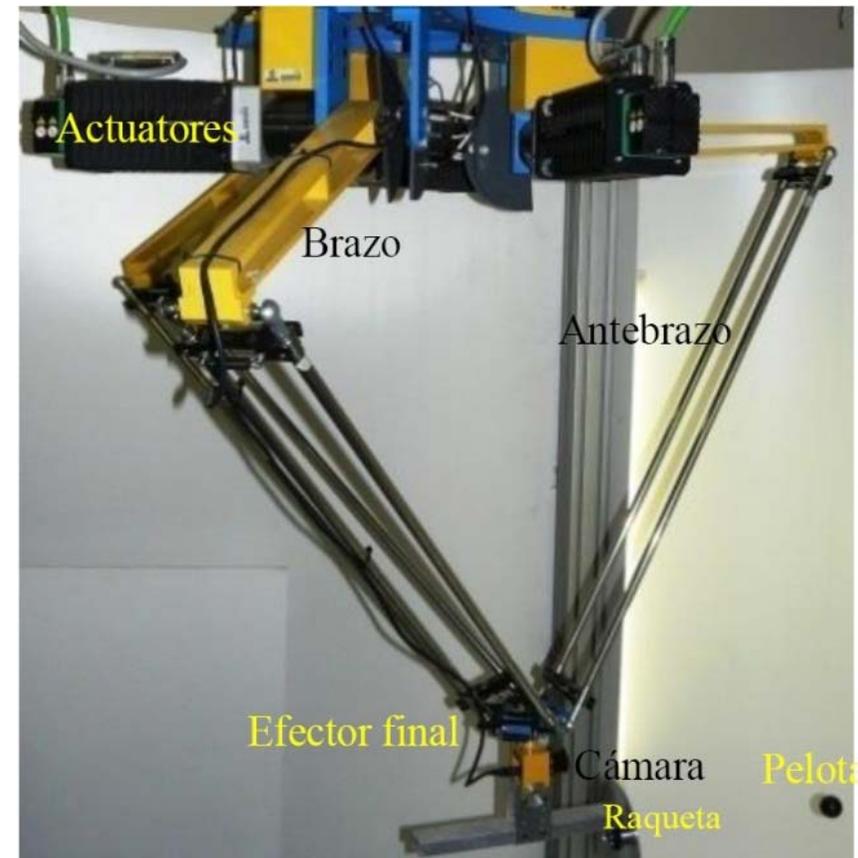


Seguimiento de Objetos

Control Basado en Imagen (IBVS). “Ver y Mover” Dinámico

Robotenis (DISAM-UPM 2010) . Robot Delta de tres grados de libertad de fabricación propia

- Cámara en extremo del robot
- Características visuales: posición de la pelota y diámetro de la misma
- Máxima velocidad en el extremo 3m/s
- Estructura de control abierta, con doble bucle de control: uno articular (0.5 ms) y otro visual (8.3ms)





Seguimiento de Objetos

Control Basado en Imagen (IBVS). Ejemplo Robotenis

Se desea que la pelota se mantenga a una distancia constante (600 mm) de la posición de la cámara en el eje Z. Movimiento caótico.

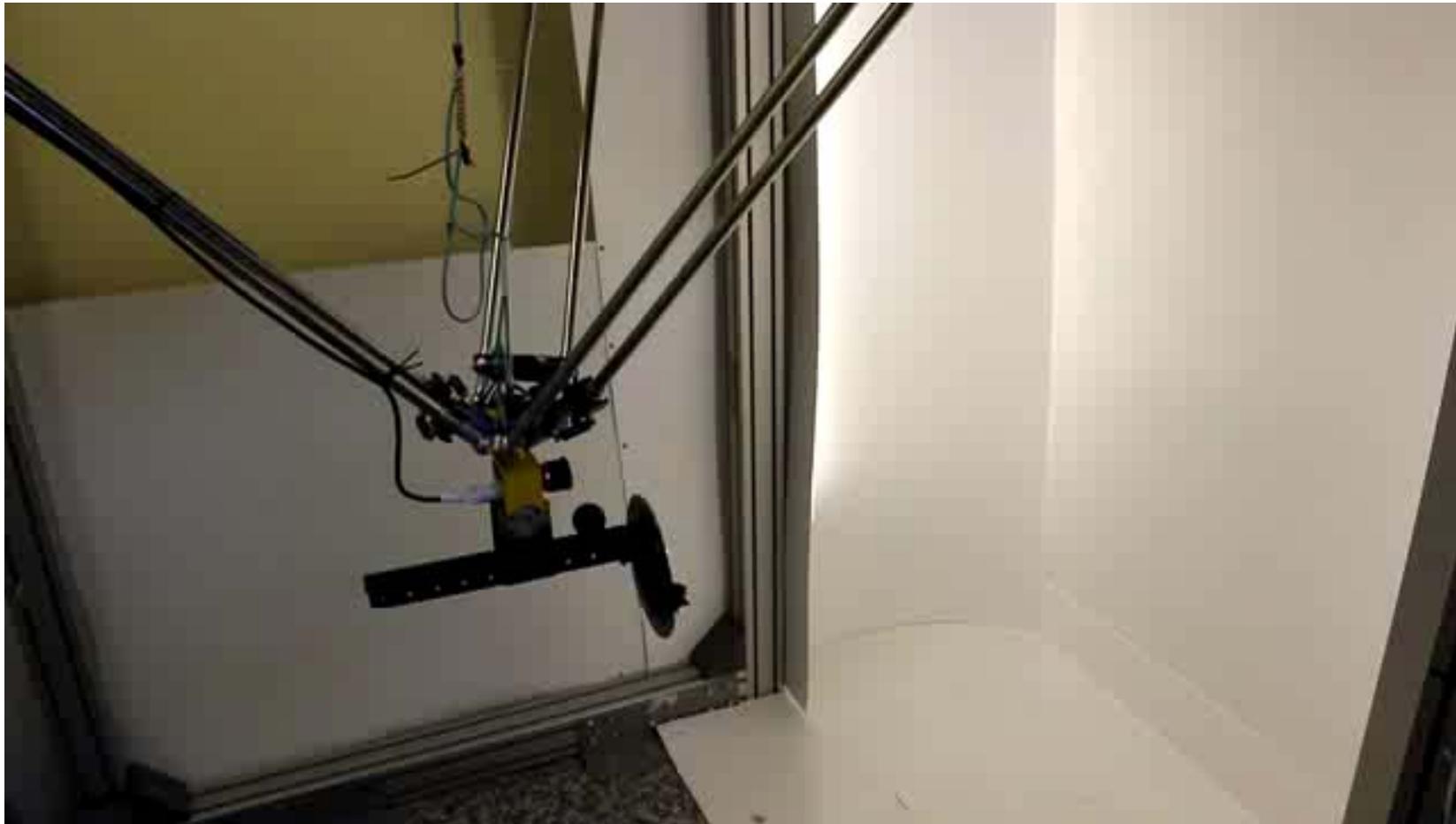




Seguimiento de Objetos

Control Basado en Imagen (IBVS). Ejemplo Robotenis

Se desea que el robot golpee a una pelota suspendida por un hilo. El robot posee una raqueta esférica para poder dirigir la dirección del golpeo y asegurar el rebote en el espacio de trabajo





Control Visual de Robots

- Introducción
- Estrategias de Adquisición de Imágenes
- Estrategias de Interpretación de Imágenes
- Ley de Control Cinemático
- Estabilidad
- Seguimiento de Objetos
- Estructuras de Control Visual
- Líneas de Investigación



Estructuras de Control Visual de Robots

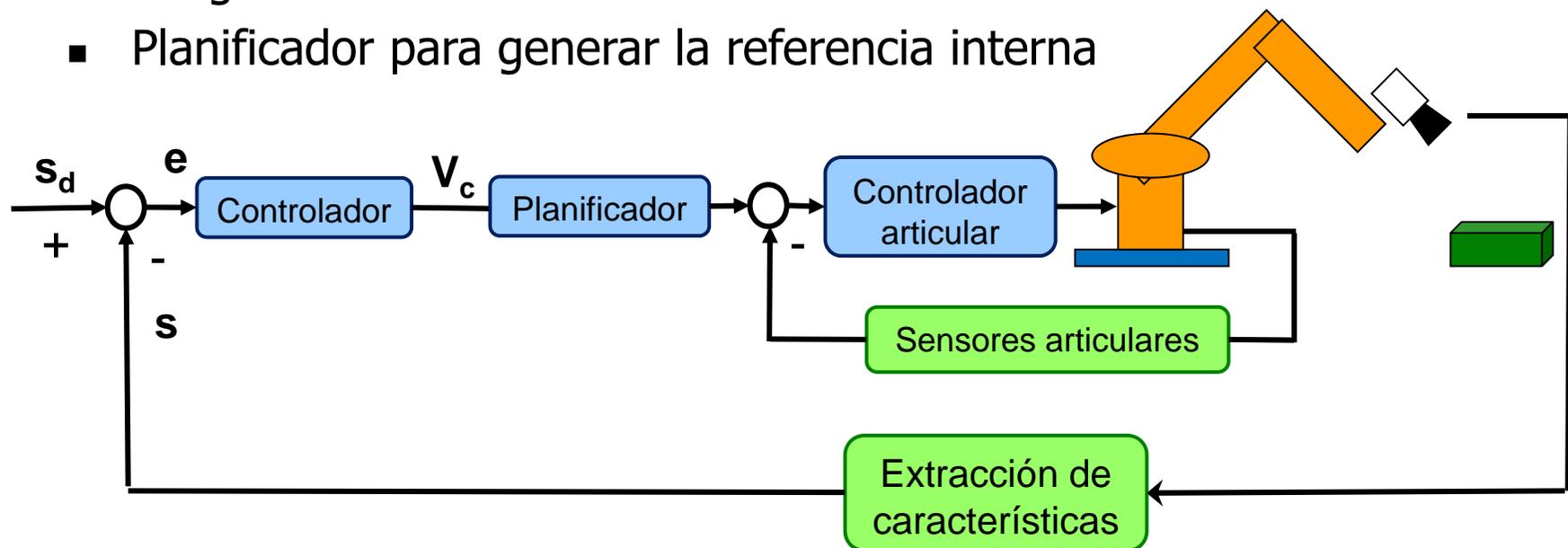
INDUSTRIALES
ETSII | UPM

Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

CONTROL VISUAL DE ROBOTS

Control Basado en Imagen (IBVS). “Ver y Mover” Dinámico

- El robot está en movimiento mientras se realiza la captura de imágenes
- Bucle interno (frecuencia elevada): Control articular
- Bucle externo (frecuencia menor): Captura y procesamiento de imágenes
- Planificador para generar la referencia interna

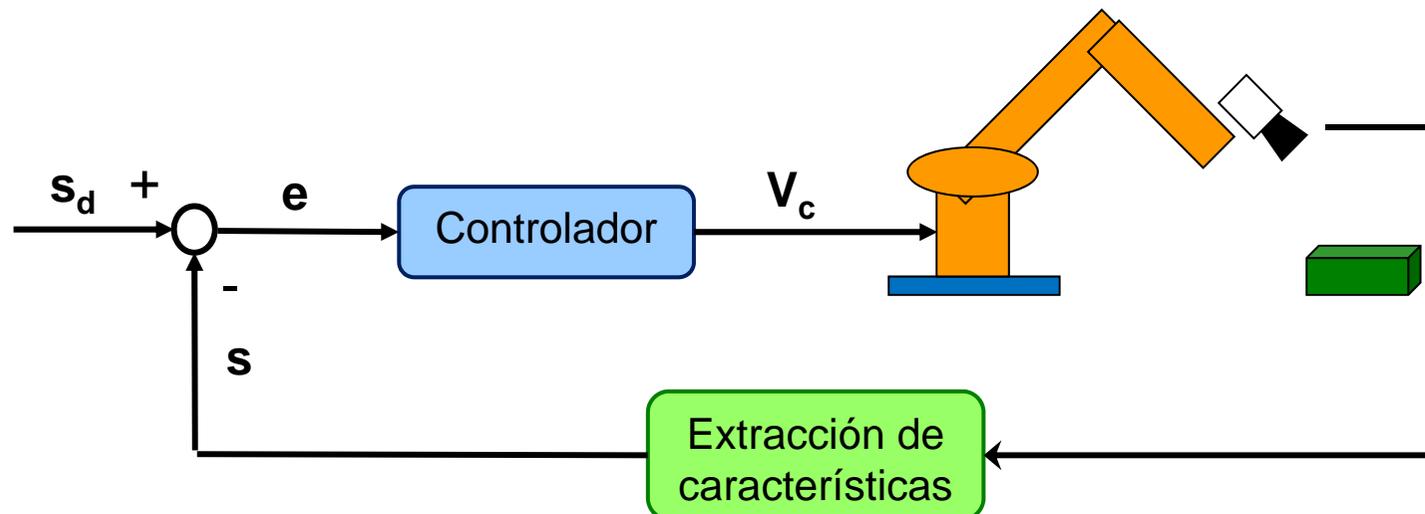




Estructuras de Control Visual de Robots

Control Basado en Imagen (IBVS). Control Visual Directo

- El robot está en movimiento mientras se realiza la captura de imágenes
- No existe bucle interno articular
- Se requiere la adquisición y el procesamiento de la imagen a frecuencia muy elevada



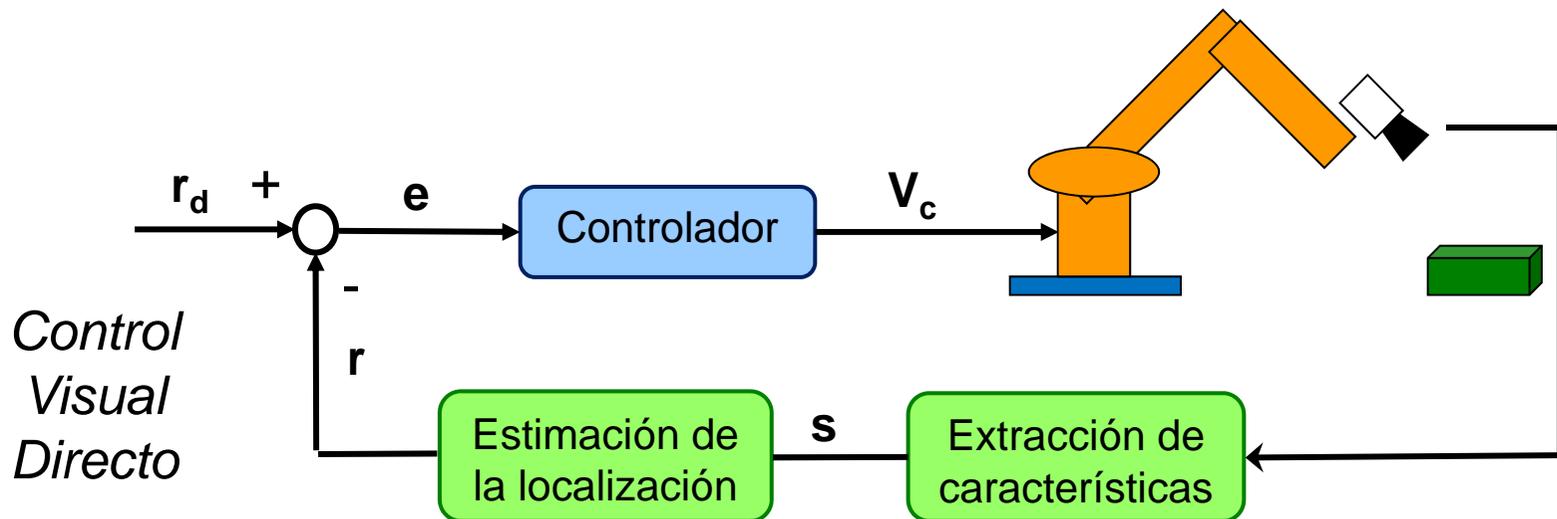
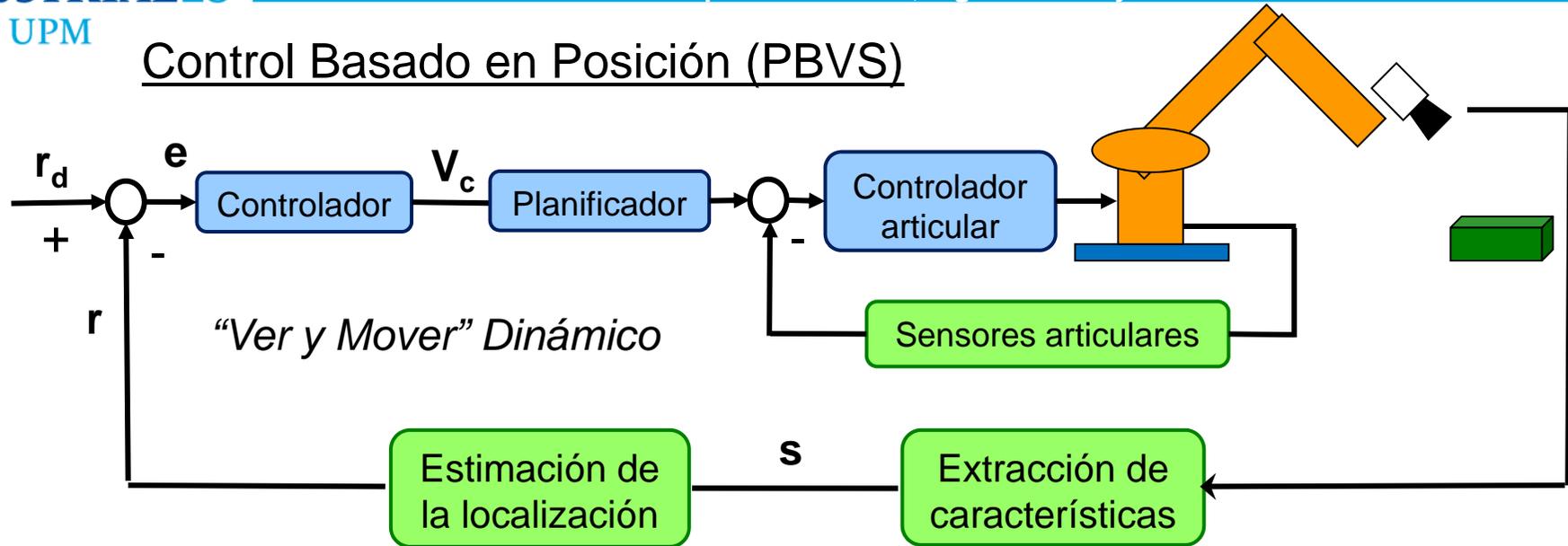


Estructuras de Control Visual de Robots

INDUSTRIALES
ETSII | UPM

Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

Control Basado en Posición (PBVS)



CONTROL VISUAL DE ROBOTS



Control Visual de Robots

- Introducción
- Estrategias de Adquisición de Imágenes
- Estrategias de Interpretación de Imágenes
- Ley de Control Cinemático
- Estabilidad
- Seguimiento de Objetos
- Estructuras de Control Visual
- Líneas de Investigación



INDUSTRIALES
ETSII | UPM

Líneas de Investigación

Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

Calibración cinemática on-line



CONTROL VISUAL DE ROBOTS



Fuente del vídeo: Istituto Italiano si Tecnologia – ICRA2018



INDUSTRIALES
ETSII | UPM

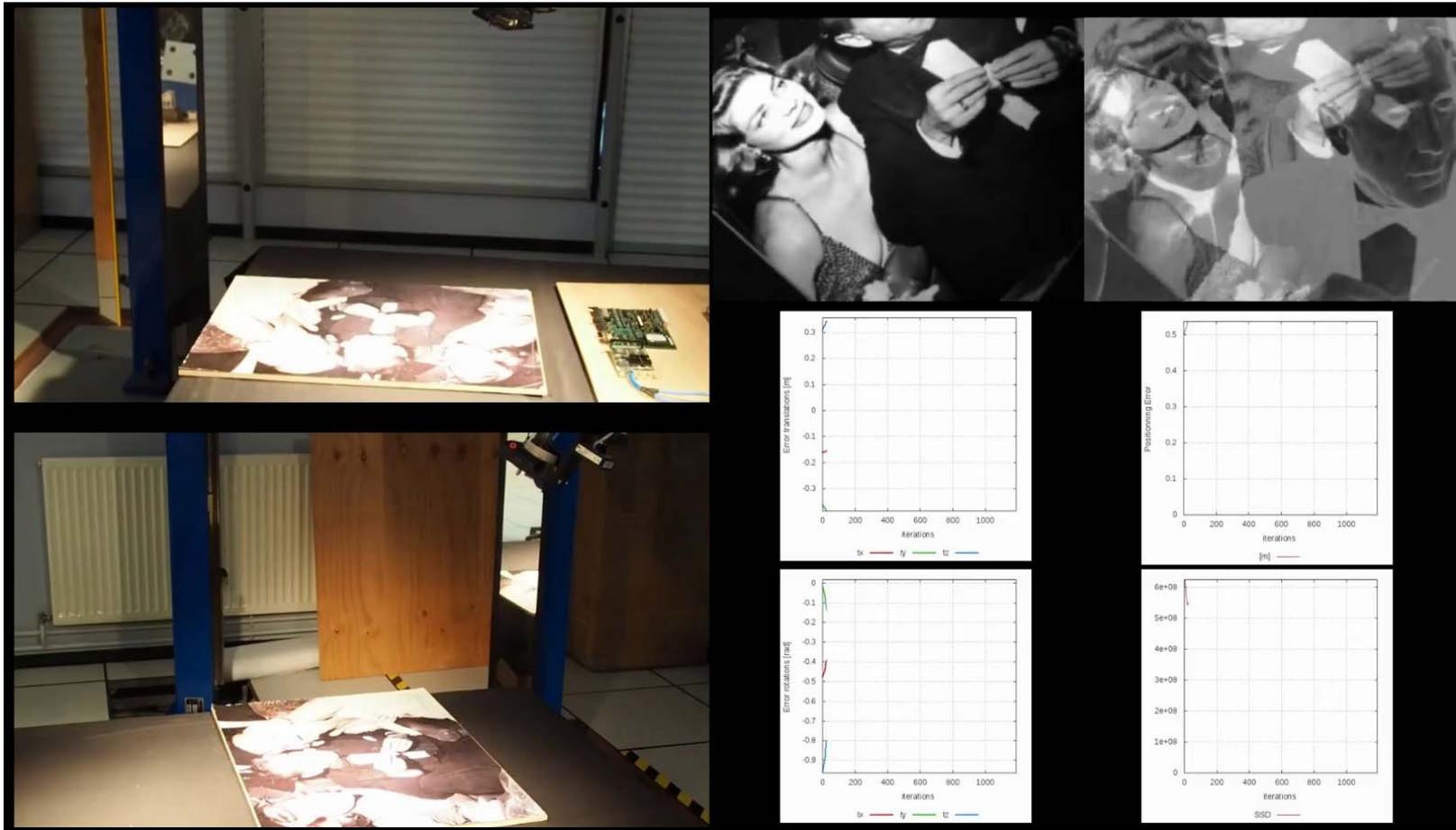
Líneas de Investigación



Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

Control Visual con aprendizaje mediante Deep Neural Networks

CONTROL VISUAL DE ROBOTS



Fuente del vídeo: Q. Bateux, E. Marchand, J. Leitner, F. Chaumette, P. Corke - ICRA2018

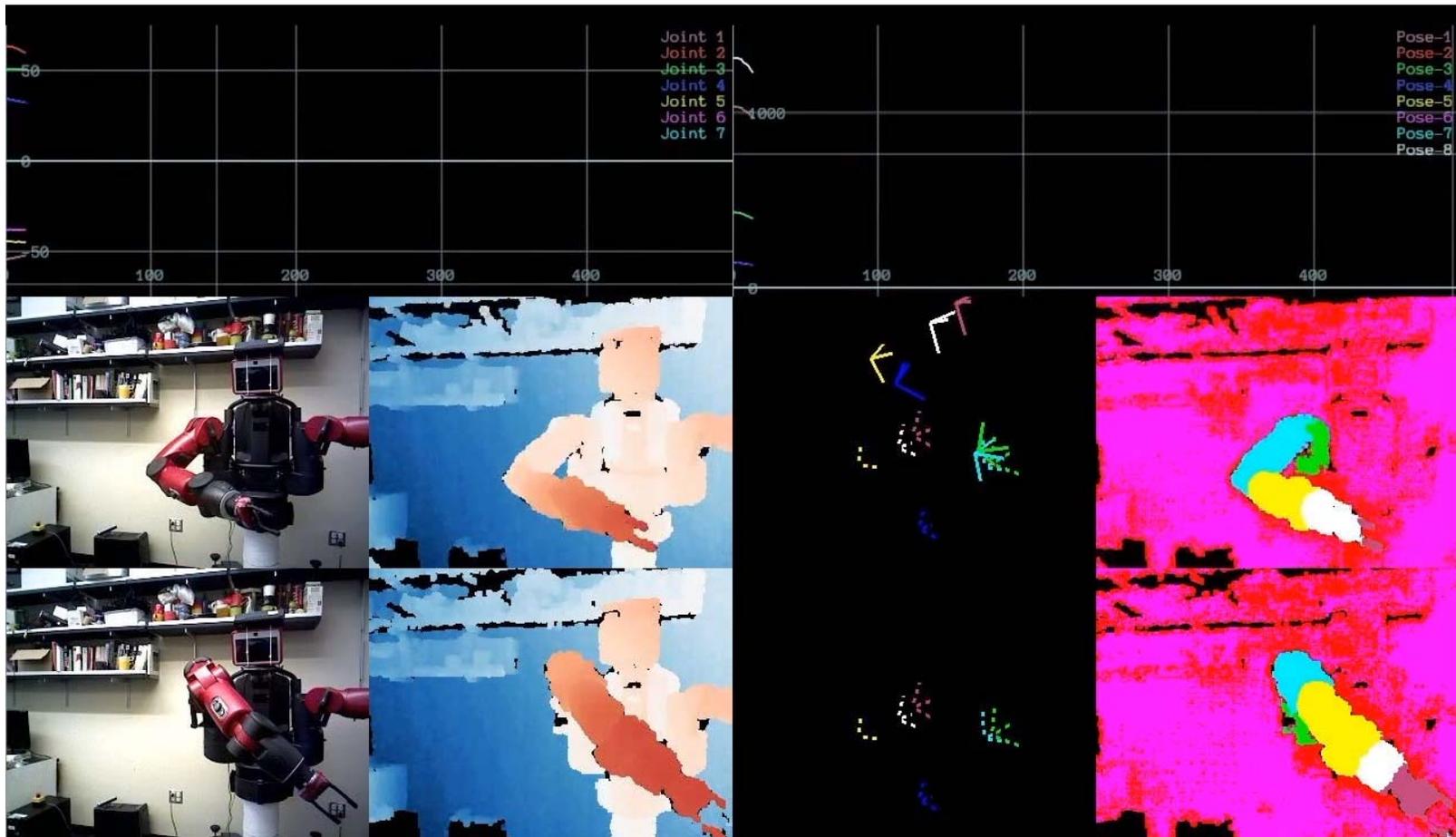


Líneas de Investigación

Control Visual utilizando Structured Deep



CONTROL VISUAL DE ROBOTS



© Authors of ICRA 2018 Paper 1893

Wed AM

Pod L.5

Fuente del vídeo: University of Washington y MPI-IS Germany - ICRA2018



INDUSTRIALES
ETSII | UPM

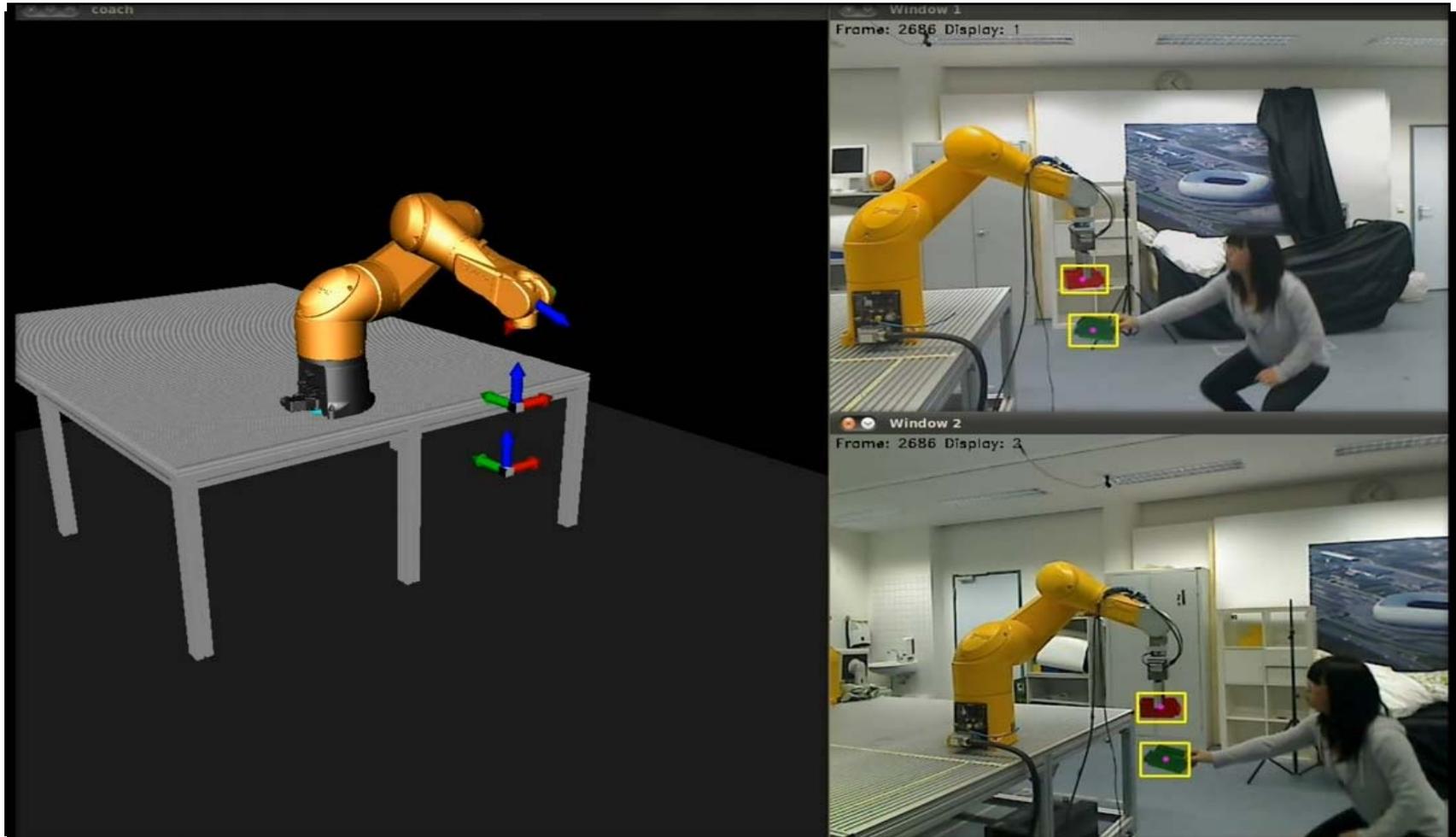
Líneas de Investigación

Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

Control Visual con un Par Estereo no calibrado



CONTROL VISUAL DE ROBOTS



Fuente del vídeo: Technische Universität München - IROS2013



INDUSTRIALES
ETSII | UPM

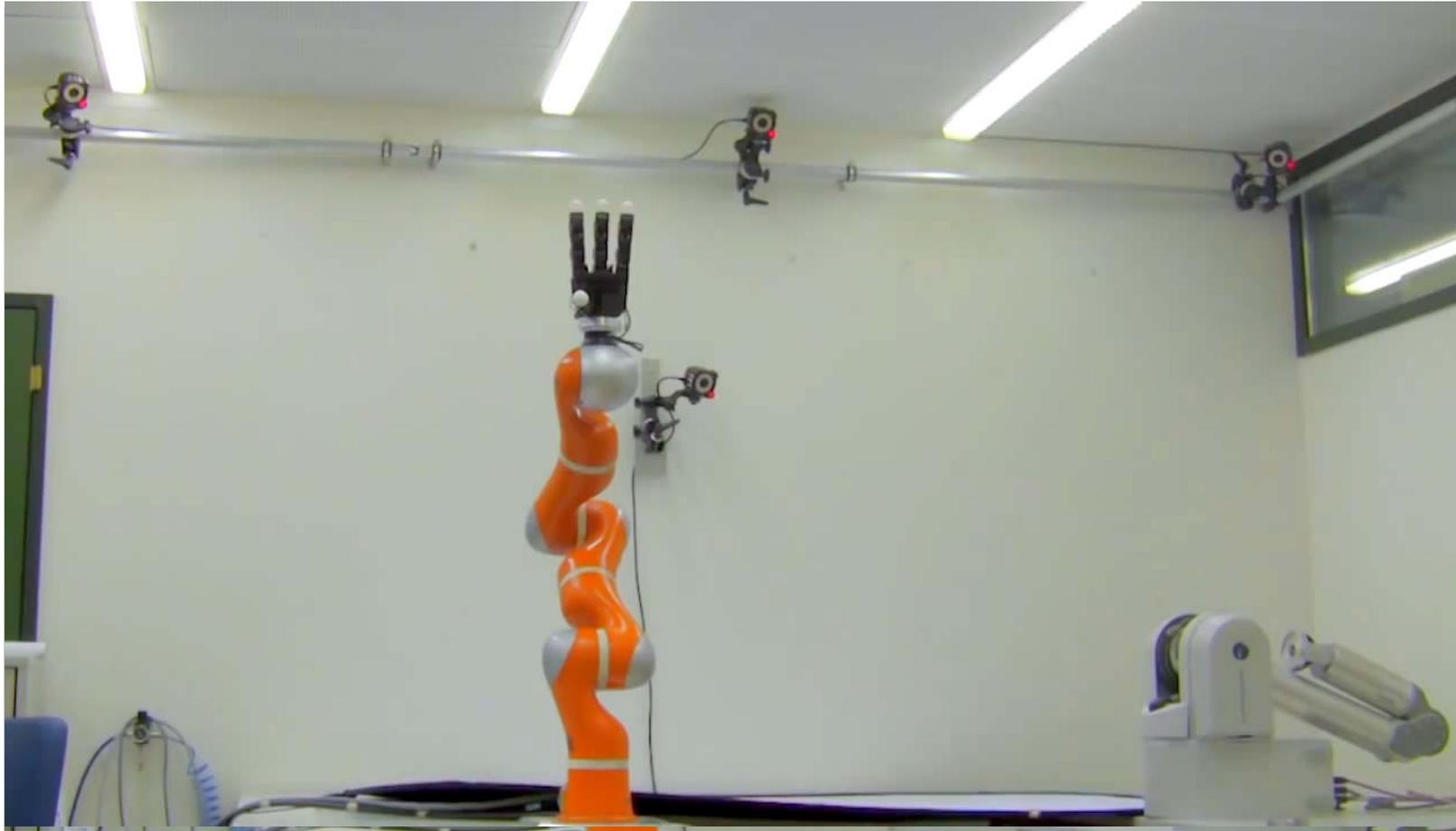
Líneas de Investigación



Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

Control Visual con agarre de diversos objetos por auto-aprendizaje

CONTROL VISUAL DE ROBOTS



Fuente del vídeo: LASA - École Polytechnique Fédérale de Lausanne



INDUSTRIALES
ETSII | UPM

Líneas de Investigación



Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

Navegación basada en visión de un robot humanoide

CONTROL VISUAL DE ROBOTS



Vision-based corridor navigation for humanoid robots

Angela Faragasso, Giuseppe Oriolo, Antonio Paolillo, Marilena Vendittelli

Robotics Lab, DIAG
Sapienza Università di Roma

September 2012

Fuente del vídeo: Sapienza Università di Roma



INDUSTRIALES
ETSII | UPM

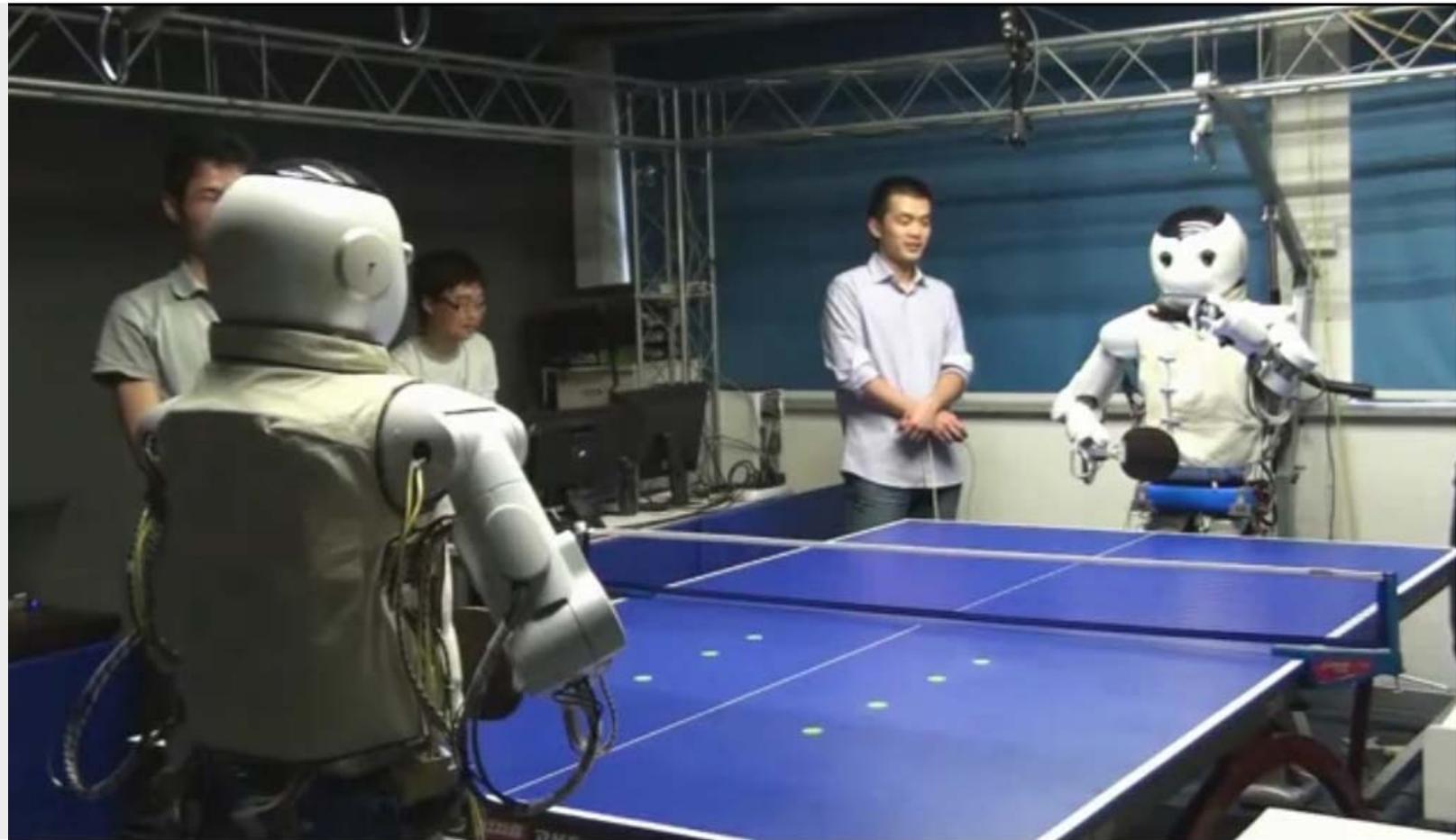
Líneas de Investigación



Unidad Docente Automática. Dpto Automática, Ing. Eléctrica y Electrónica e Informática Indust.

Humanoides jugando al tenis de mesa

CONTROL VISUAL DE ROBOTS



Fuente del vídeo: Institute of Cyber System and Control Zhejiang University Hangzhou, China



Líneas de Investigación

- Incorporación del aprendizaje (inteligencia artificial, aprendizaje profundo, redes neuronales convolucionales) en las tareas de control visual. Se intenta tener sistemas más versátiles que aborden más tareas
- Control visual con sistemas no calibrados. Se intenta tener sistemas menos rígidos.
- Incorporar nuevos sistemas de adquisición de imágenes. Fusión de la información visual.
- Trabajar con más tipos de características visuales, con mayor información (SIFT, apariencia,...).
- Planificación de trayectorias cartesianas en el control visual (evitando colisiones)
- Estrategias para mantener las características visuales en la imagen



Líneas de Investigación

- Control visual de robots redundantes (o incluso hiperedundantes)
- Aspectos a incorporar en el control
 - Diseño de controladores que incorporen la dinámica
 - Estructuras de control visual directo
 - Influencia del retardo en la adquisición de imágenes en el control
 - Control por eventos, con tiempo de procesamiento visual variable
 - Estrategias de control conmutadas
 - Aumento de la robustez de los controladores



Control Visual de Robots

José María Sebastián

(jose.sebastian@upm.es)

*Departamento de Automática, Ingeniería
Eléctrica y Electrónica e Informática Industrial,
Universidad Politécnica de Madrid*

**Programas de Máster y Doctorado en Ingeniería
de Sistemas y de Control – UNED**

Madrid, 17 de mayo de 2019