

Departamento de Ingeniería de Sistemas
y Automática

Universidad de Sevilla



Seguimiento visual basado en posición y basado en características

Manuel Vargas Villanueva

Francisco Rodríguez Rubio

Índice de la presentación

☆ Introducción

🕒 Estrategias de seguimiento visual. Clasificación

🕒 Calibraciones previas requeridas

🕒 Implementaciones completadas o en realización

🕒 Caso 1. Seguimiento visual basado en posición para PUMA 560

🕒 Caso 2. Seguimiento visual basado en características para RM-10

🕒 Conclusiones

🕒 Trabajos futuros

Introducción

Control de robots mediante realimentación visual (*seguimiento visual*)

- Nuestro interés: control de robots manipuladores mediante realimentación visual:
 - Seguimiento de objetos
 - Interacción con los mismos (posición desconocida o imprecisa)
- “Realimentación visual”: sist. guiados visualmente, una o más cámaras, imágenes \Rightarrow señal de realimentación para tarea

Decidir relación cinemática robot-cámara(s):

- Estáticas: Ubicación fija. Visibles permanentemente: robot (ef. final) , objeto
- Móviles: “*cámara-en-mano*”. Observación objeto. Pos. robot implícita
- Número de cámaras: monocular / estéreo

Índice de la presentación

☆ Introducción

🕒 Estrategias de seguimiento visual. Clasificación

🕒 Calibraciones previas requeridas

🕒 Implementaciones completadas o en realización

🕒 Caso 1. Seguimiento visual basado en posición para PUMA 560

🕒 Caso 2. Seguimiento visual basado en características para RM-10

🕒 Conclusiones

🕒 Trabajos futuros

Estrategias de seguimiento visual. Clasificación

Dos criterios:

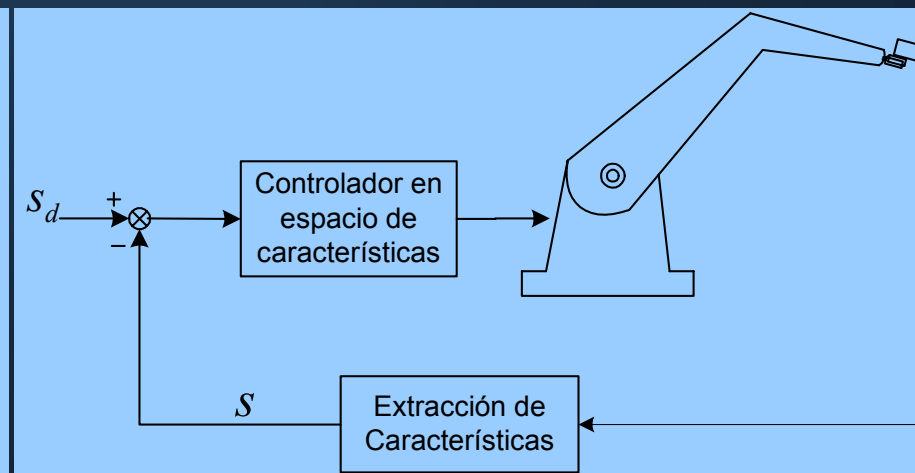
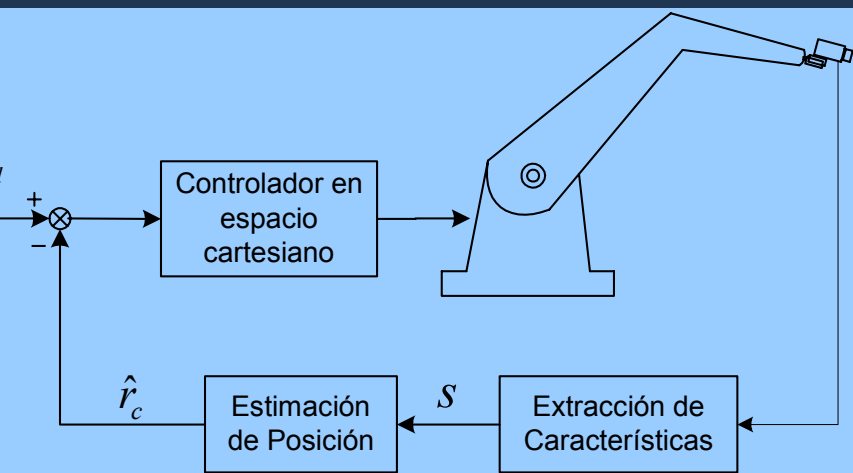
1) En función del espacio de control:

1.1) Seguimiento visual basado en posición

- Información de la imagen \Rightarrow estimación explícita localización
- Referencia espacio cartesiano

1.2) Seguimiento visual basado en características

- Las características visuales \Rightarrow información de realimentación
- Referencia y control trabajan sobre estas características



Estrategias de seguimiento visual. Clasificación

Dos criterios:

1) En función del espacio de control:

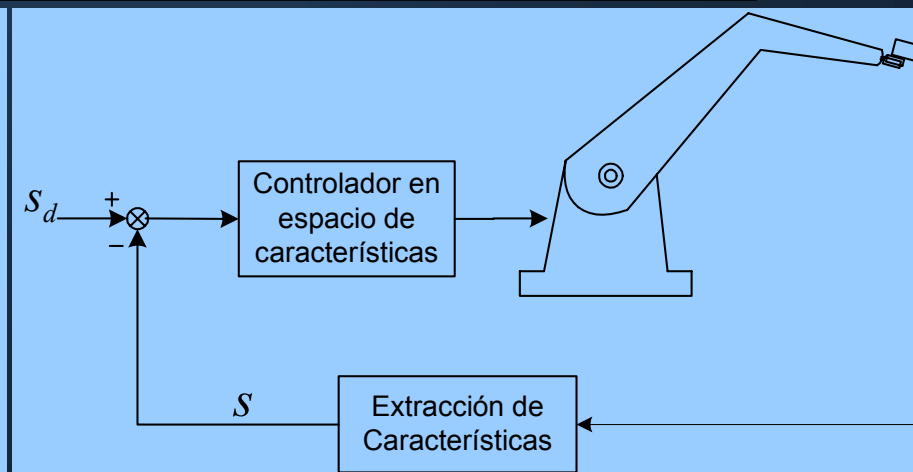
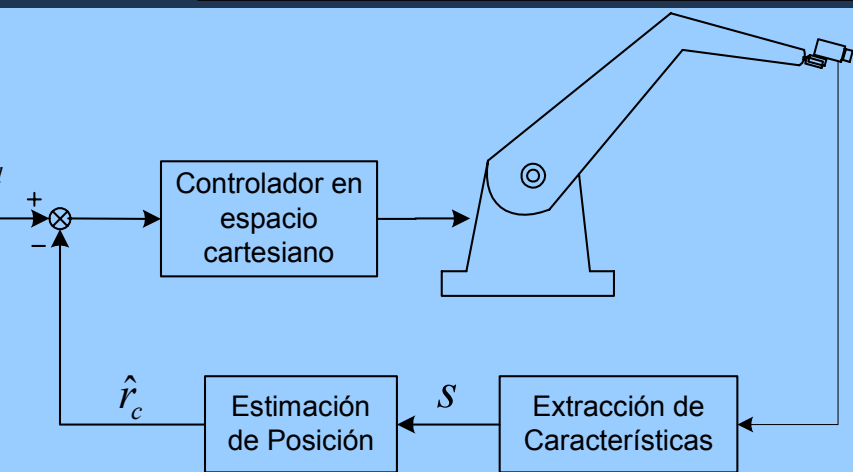
1.1) Seguimiento visual basado en posición

- Información de la imagen \Rightarrow estimación explícita localización

Ventajas:

Esquema basado en características:

- Se especifica en términos de cómo se quiere ver el objeto
- Más robusto ante calibraciones deficientes



Estrategias de realim. visual. Clasificación

2) En función de que se mantenga lazo de realimentación articular:

2.1) Esquema “mira y mueve dinámico” (“*dynamic look-then-move*”)

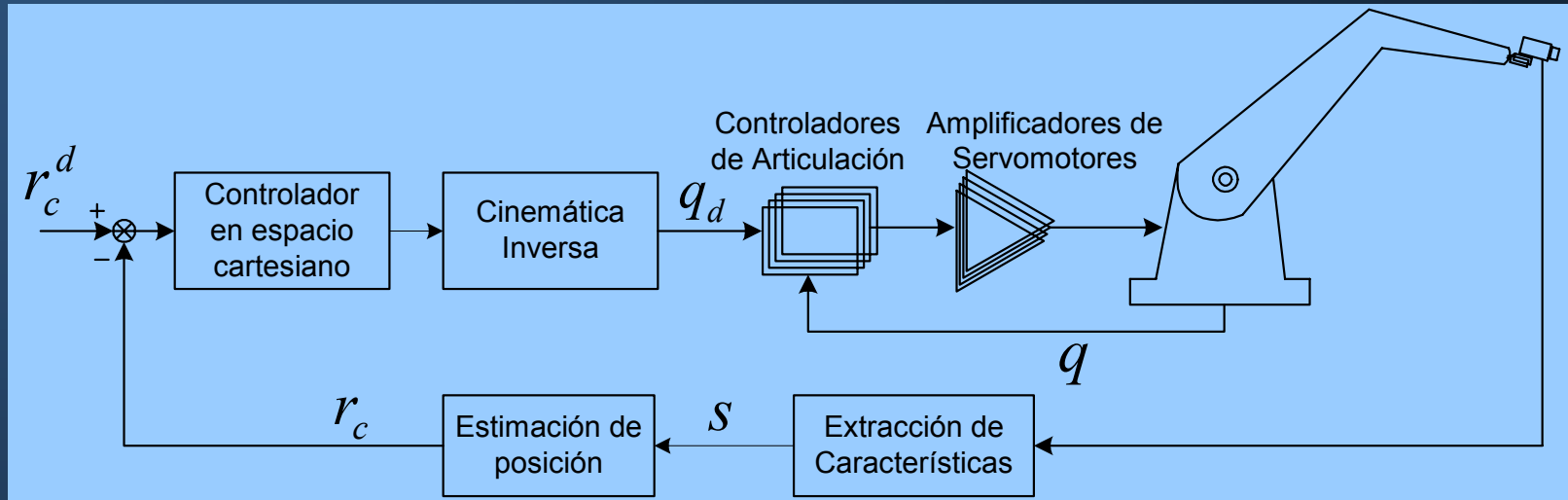
- Se mantienen los lazos internos de control articular
- Su dinámica debe considerarse
- Suele llevar a esquemas de control bifrecuenciales

2.2) Esquema “servo-visual” (“*visual servoing*”)

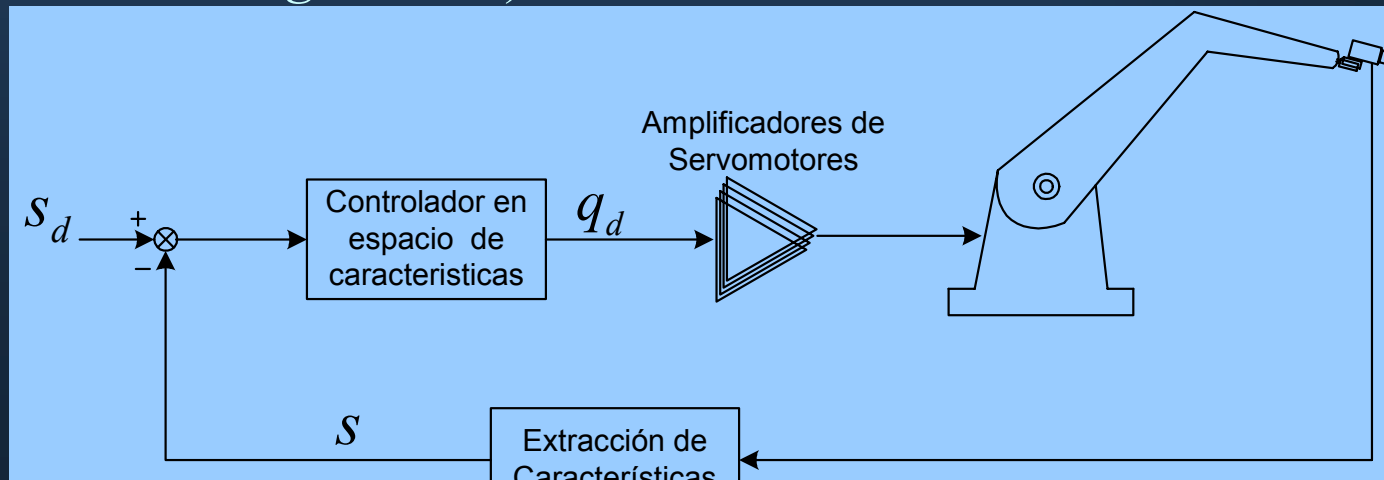
- Desaparece lazo de control interno
- Controlador visual proporciona directamente pares actuación
- Fuerte nivel de acoplamiento dinámico (cinem, dinámica, visión, acoplados, se formulan conjuntamente)
- Procesamiento de imágenes a frecuencias elevadas

Estrategias de realim. visual. Clasificación

- Esquema “mira y mueve” basado en posición (*pose-based look-then-move scheme*):



- Esquema “servo-visual” basado en características (*feature-based visual servoing scheme*):



Índice de la presentación

- ☆ Introducción
- 🕒 Estrategias de seguimiento visual. Clasificación
- 🕒 **Calibraciones previas requeridas**
 - 3.1) Modelo de formación de la imagen
 - 3.2) Calibración interna de la cámara
 - 3.3) Calibración cámara-garra
- 🕒 Implementaciones completadas o en realización
- 🕒 Caso 1. Seguimiento visual basado en posición para PUMA 560
- 🕒 Caso 2. Seguimiento visual basado en características para RM-10
- 🕒 Conclusiones
- 🕒 Trabajos futuros

Calibraciones previas requeridas

Calibraciones:

↖ Calibración interna de la cámara:

- Parámetros internos de la cámara

↖ Calibración cámara-robot:

- Configuración cámara-en-mano \Rightarrow cámara-garra $\{C\}-\{G\}$
- Configuración cámara estática $\Rightarrow \{C\}-\{W\}$

↖ Calibración del robot:

- Para conocer la situación de $\{G\}$

Implementaciones que no requieren calibración:

Esquemas adaptativos, capaces de “aprender” cómo un determinado cambio en la posición del robot, puede afectar a lo observado.

Modelo de formación de la imagen

Cuatro pasos en la formación de la imagen:

- Paso 1: ${}^o p_i \xrightarrow{{}^c T_o} {}^c p_i$

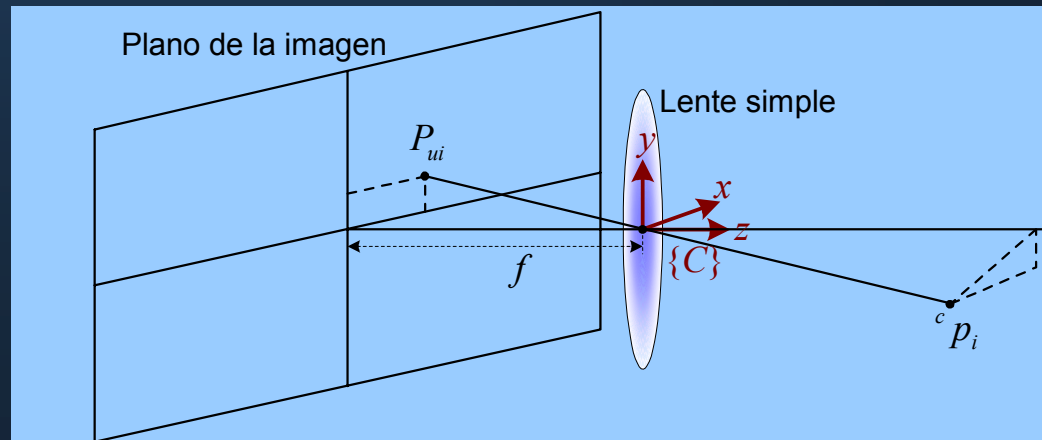
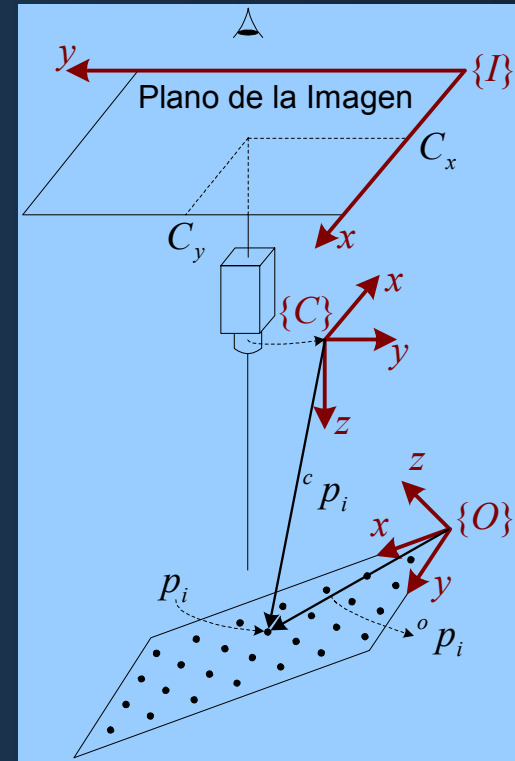
Expresar cada punto del objeto respecto al sistema de coordenadas de la cámara $\{C\}$

$${}^c p_i = {}^c R_o \cdot {}^o p_i + {}^c r_o$$

- Paso 2: ${}^c p_i \xrightarrow{f} P_{u_i}$

Proyección perspectiva

$$P_{u_i} = \begin{bmatrix} X_{u_i} \\ Y_{u_i} \end{bmatrix} = \frac{f}{z_i} \begin{bmatrix} {}^c x_i \\ {}^c y_i \end{bmatrix}$$



Modelo de formación de la imagen

- Paso 3: $P_{u_i} \xrightarrow{\kappa_1, \kappa_2, \dots} P_{d_i}$

Distorsión radial de la lente

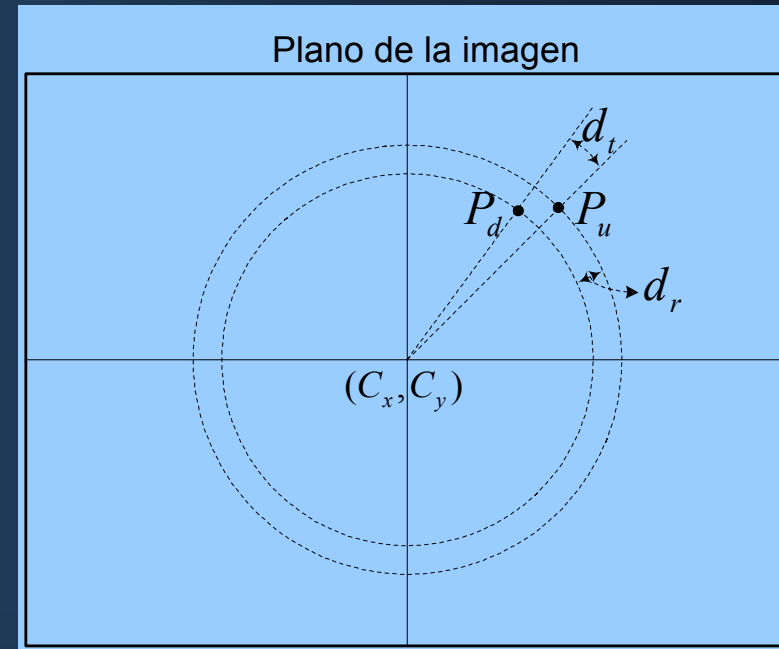
$$P_{u_i} = P_{d_i} (1 + \kappa_1 \|P_{d_i}\|^2 + \dots)$$

- Paso 4: $P_{d_i} \xrightarrow{s_x, d_x, d_y, C_x, C_y} P_{f_i}$

Coordenadas en memoria digitalizadora

$$X_{f_i} = -\frac{X_{d_i}}{a_s d_y} + C_x, \quad Y_{f_i} = -\frac{Y_{d_i}}{d_y} + C_y$$

d_y puede ser ficticio



Calibración interna de la cámara

- Obtener parámetros intrínsecos
- Proceso costoso, *off-line* (salvo modelos simplificados)

Tres pasos:

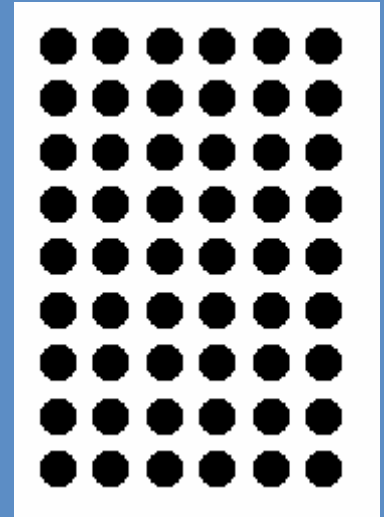
- Determinar con precisión situación puntos plantilla cal
- Identificar corresp. de esos puntos en la(s) imagen(es)
- Calcular params. que mejor resuelvan la correspondencia
(de acuerdo con modelo)

Los diversos métodos se diferencian en:

- El modelo de cámara supuesto, en nuestro caso:
pin-hole, proy. persp, dist. radial primer orden
- Métodos lineales o no lineales
- Tipo de objeto requerido como pieza de calibración

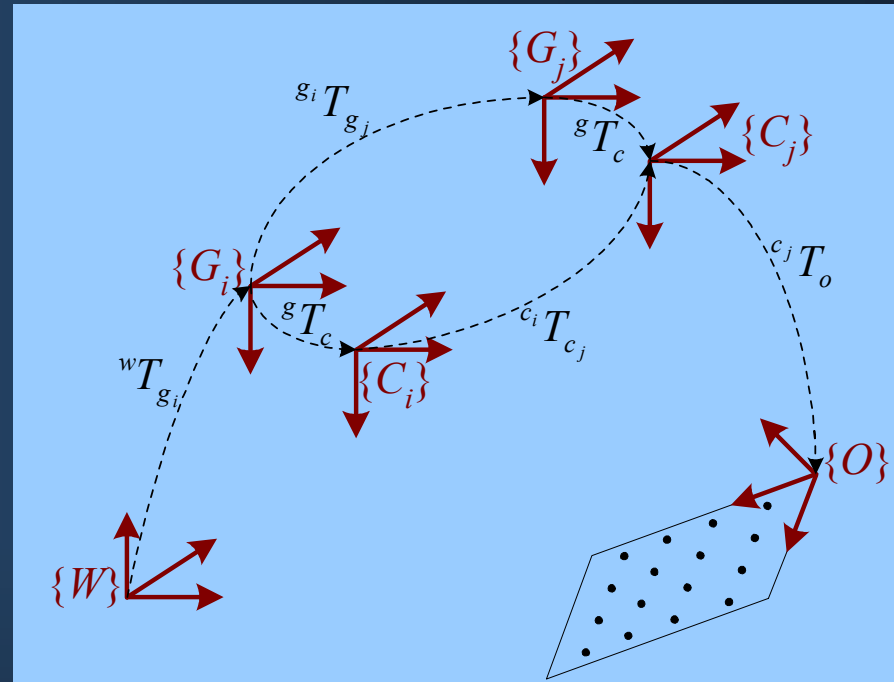
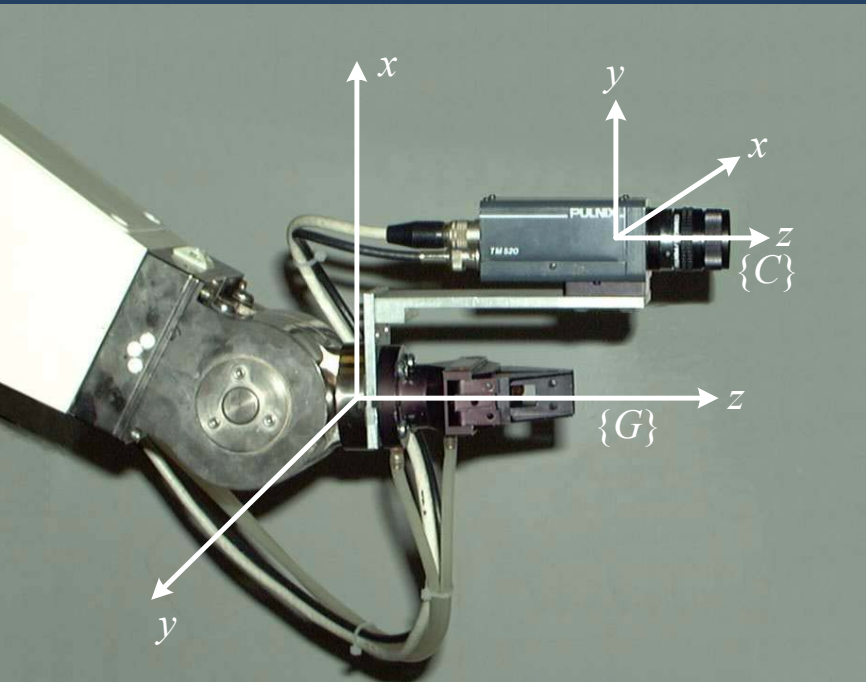
Método de calibración empleado:

- Variación del método de Tsai (<http://www.cs.cmu...>)
- Objeto de calibración requerido:
plantilla plana de 54 círculos dispuestos en forma matricial



Calibración cámara-garra

Método de Tsai y Lenz



- Orientación (ángulos Euler ZYX)

$${}^gR_c \leftarrow [-84.99^\circ, 3.67^\circ, -2.90^\circ]$$

- Traslación (cm):

$${}^g r_c \leftarrow [6.5, 0.5, 10]$$

Índice de la presentación

☆ Introducción

🕒 Estrategias de seguimiento visual. Clasificación

🕒 Calibraciones previas requeridas

🕒 **Implementaciones completadas o en realización**

🕒 Caso 1. Seguimiento visual basado en posición para PUMA 560

🕒 Caso 2. Seguimiento visual basado en características para RM-10

🕒 Conclusiones

🕒 Trabajos futuros

Implementaciones completadas o en realización

Caso 1) Esquema “mira y mueve dinámico” basado en posición

- Mono-cámara, *cámara-en-mano*
- Sobre robot PUMA 560
- Lazo interno mediante la electrónica propia del robot
- Usado como posicionador cartesiano (no cinemat. inversa)
- 6 GDL
- Control desacoplado de cada articulación cartesiana
- 2 lazos de control \Rightarrow bifrecuencial
- Modelo geométrico del objeto

Caso 2) Esquema “servo-visual” basado en características

- Mono-cámara y estéreo, *cámara-en-mano*
- Sobre robot RM-10 y plataforma giroestabilizada
- Robot controlado desde PC, ignorando electrónica propia
- 3 GDL y 6 GDL
- 1 lazo de control. Mayor velocidad. Tarjeta adquis. y cámara digitales

Índice de la presentación

☆ Introducción

🕒 Estrategias de seguimiento visual. Clasificación

🕒 Calibraciones previas requeridas

🕒 Implementaciones completadas o en realización

🕒 **Caso 1. Seguimiento visual basado en posición para PUMA 560**

5.1) Estimación localización objeto-cámara

5.2) Esquema de control para 6 GDL

🕒 Caso 2. Seguimiento visual basado en características para RM-10

🕒 Conclusiones

🕒 Trabajos futuros

Caso 1. Basado en posición para PUMA 560

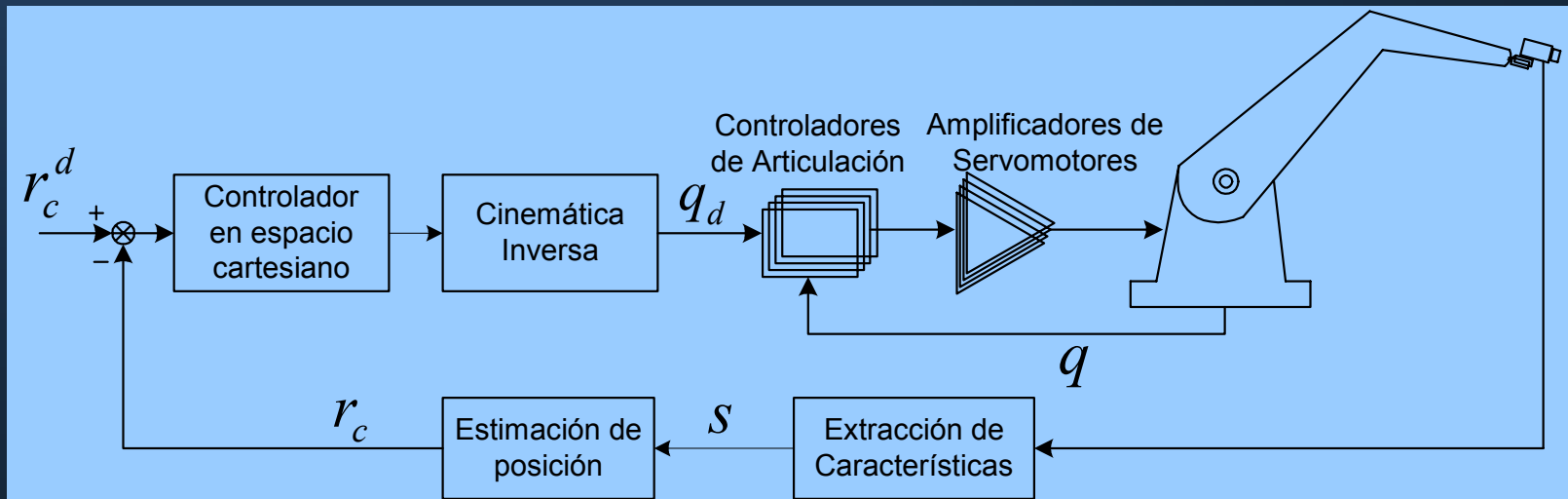
Seguimiento visual basado en posición

- La tarea se especifica en términos de localización cartesiana

- Paso fundamental:

Estimación localización relativa objeto-cámara

- Separación clara entre ambos aspectos



Estimación de la localización objeto-cámara

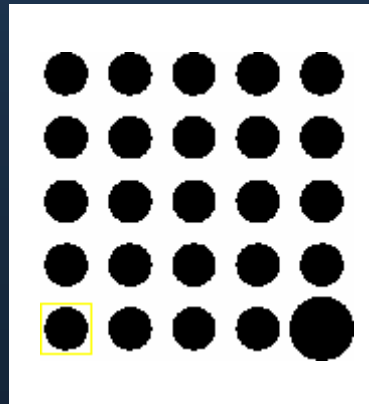
- ↖ Se trata de recuperar la profundidad de los puntos en la escena
- ↖ Para extraer datos tridimensionales se requiere información adicional:
 - Modelo geométrico del objeto
 - Emparejando de nuevo puntos en la imagen con puntos en objeto, ahora “*en línea*”.
 - Falta de flexibilidad
 - Uso de múltiples cámaras
 - Emparejamiento de imágenes simultáneas desde distintos puntos de vista
 - Uso del movimiento
 - Correspondencias entre imágenes sucesivas
 - Flujo óptico

Estimación de la localización objeto-cámara

Método basado en la parametrización matricial de la rotación:

Se estiman los 9 parámetros de la matriz de rotación

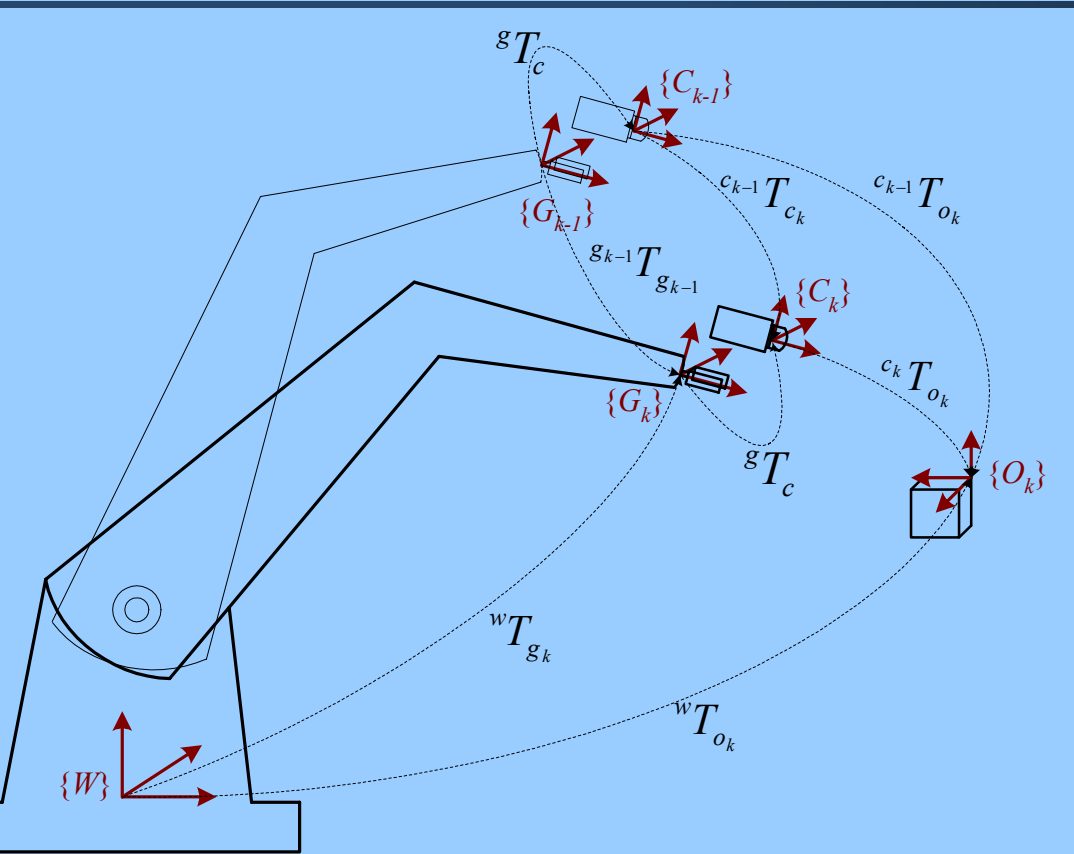
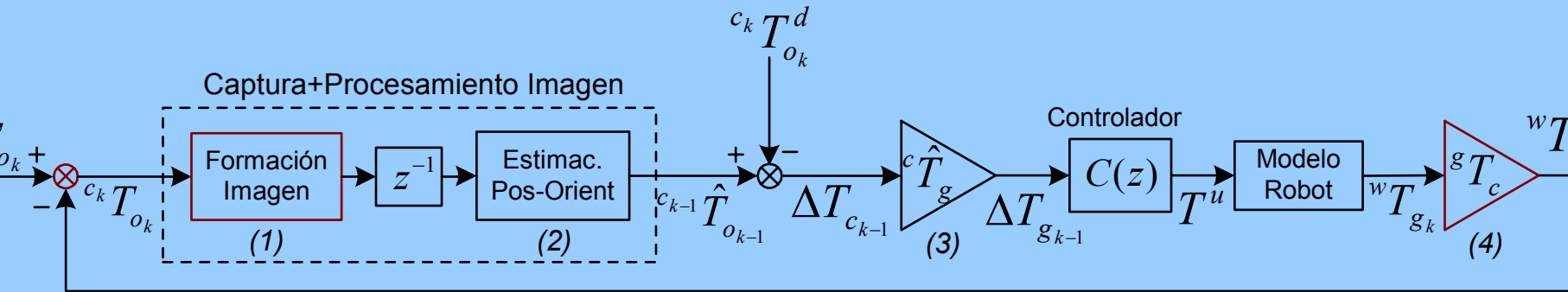
- Sistema de ecuaciones lineal: $A x = b \left\{ \begin{array}{l} A = A_{2n \times 11} (P_{f_i}, {}^o p_i) \\ b = b_{2n} (P_{f_i}) \end{array} \right\}$
- Solución analítica simple
- Resolver para 11 params. Se aplican condiciones de ortogonalidad a posteriori.
- Versión reducida del método de calibración de Tsai



Esquema de control para 6 GDL

- ↖ Robot PUMA operando en modo *ALTER*
- ↖ Controlador del robot se encarga de cinemática inversa y control de las articulaciones
- ↖ Control en coordenadas cartesianas
- ↖ Al robot se le envían: ${}^w r_{g_k}$, ${}^w \theta_{g_k}$ deseadas
- ↖ De cara al usuario los distintos grados de libertad cartesianos aparecen como independientes
- ↖ Modelables mediante sencillo modelo lineal

Esquema de control para 6 GDL



- Comparaciones simbólicas:

$$c_k T_{o_k} = [w T_{c_k}]^{-1} \cdot w T_{o_k}$$

$$\Delta T_{c_k} = c_{k-1} T_{c_k} = c_{k-1} \hat{T}_{o_{k-1}} \cdot [c_k T_{o_{k-1}}^d]$$

- Modelo bifrecuencia:

$$T_v = \delta T_r$$

- Módulos idealmente complementarios:

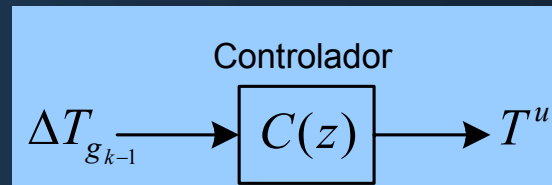
$$(1) \leftrightarrow (2)$$

$$(3) \leftrightarrow (4)$$

Esquema de control para 6 GDL

Descomposición de coordenadas para el control:

- Debemos descomponer la matriz de transformación en 6 coordenadas.



- Estas coordenadas deben ser consistentes con la operación suma a lo largo de diversos periodos de muestreo:

$$x_k^u = a_1 x_{k-1}^u + \dots + a_n x_{k-n}^u + b_0 x_k + \dots + b_m x_{k-m}$$

- Cambio de referencia:

$$\Delta T_{g_{k-1}} = g_{k-1} T_{g_k} \rightarrow \Delta T_{g_{k-1}}^{(w)} = g_{k-1} T_{g_k}^{(w)} \begin{cases} \Delta R_{g_{k-1}}^{(w)} = {}^w R_{g_{k-1}} \cdot \Delta R_{g_{k-1}} \cdot [{}^w R_{g_{k-1}}]^{-1} \\ \Delta r_{g_{k-1}}^{(w)} = {}^w R_{g_{k-1}} \cdot \Delta r_{g_{k-1}} \end{cases}$$

- Descomposición:

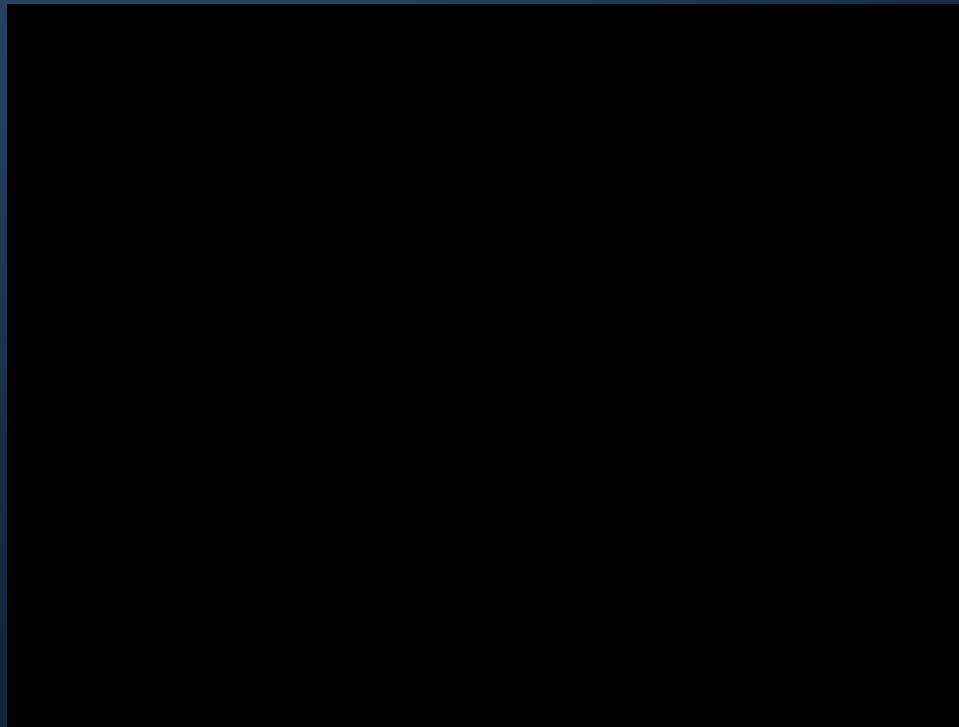
$$\Delta R_{g_{k-1}}^{(w)} \rightarrow \text{ángulos de Euler}$$

$$\Delta r_{g_{k-1}}^{(w)} \rightarrow [t_x, t_y, t_z]$$

Esquema de control para 6 GDL

Experimento demostrativo:

- Mantener localización relativa inicial
- Predictor Smith, $K_p = 0.08$
- 224 ms por ciclo \Rightarrow 4.5 ciclos por segundo



Índice de la presentación

- ☆ Introducción
- 🕒 Estrategias de seguimiento visual. Clasificación
- 🕒 Calibraciones previas requeridas
- 🕒 Implementaciones completadas o en realización
- 🕒 Caso 1. Seguimiento visual basado en posición para PUMA 560
- 🕒 **Caso 2. Seguimiento visual basado en características para RM-10**
 - 6.1) Planteamiento general
 - 6.2) Obtención de la matriz de interacción
 - 6.3) Esquema de control para 6 GDL
 - 6.4) Movimiento del objeto como perturbación
 - 6.5) Ruido en las características. Redundancia
 - 6.6) Incertidumbre en el modelo. Robustez
 - 6.7) Implementación para RM-10
- 🕒 Conclusiones
- 🕒 Trabajos futuros

Caso 2. Basado en características para RM-10

Descripción a grandes rasgos:

- Esquema servo-visual basado en características
- Monocámara, cámara-en-mano
- Se controla robot sólo con lazo de realimentación visual
- Supone modelo conocido de robot: cinemático, dinámico
- Modelo de cámara conocido:
 - 3 GDL *modelo proyección perspectiva con distorsión*
 - 6 GDL *modelo sin distorsión*
- Modelo geométrico del objeto requerido

Planteamiento general

- La dinámica del manipulador viene dada por: $\Gamma = M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q})$

- Función de la tarea: $e(q(t), t) \begin{cases} R^{dof} \times R \rightarrow R^m \\ (q, t) \rightarrow e \end{cases}$

- Objetivo de control: $e(q, t) = 0$
 $\dot{e}(q, \dot{q}, t) = J_q \dot{q} + J_t$

$$\begin{cases} J_q(q, t) = \frac{\partial e(q, t)}{\partial q} \\ J_t(q, t) = \frac{\partial e(q, t)}{\partial t} \end{cases}$$

J_q : *Jacobiano de la tarea*

“controlar manipulador con señales obtenidas con sensor visual”

$$\boxed{e(q, t) = s_d(t) - s(q, t)} \quad s({}^w\bar{r}_c(q), t) \quad \{C\}, \{W\}$$

- Matriz de interacción (en J_q):

(Jacobiano de la imagen)

$$\dot{s} = L {}^c\dot{\bar{r}}_o; \quad L = \frac{\partial s}{\partial {}^c\bar{r}_o}; \quad {}^c\dot{\bar{r}}_o = \begin{bmatrix} {}^c v_o \\ {}^c \omega_o \end{bmatrix}$$

Obtención de matriz de interacción

- De especial interés en control visual basado en características

$$\dot{s} = L \ ^c \dot{\bar{r}}_o ; \quad ^c \bar{r}_o = f(^w \bar{r}_c(q), ^w \bar{r}_o(t))$$

- Características empleadas:

$$P_{f_i} = \begin{bmatrix} X_{f_i} \\ Y_{f_i} \end{bmatrix} ; \quad s = \begin{bmatrix} s_1 \\ \dots \\ s_m \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} X_{f_1} \\ Y_{f_1} \\ \dots \\ X_{f_n} \\ Y_{f_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{f_1} \\ \dots \\ P_{f_n} \end{bmatrix} ;$$

- Submatriz de interacción para cada punto:

$$L_i = \begin{bmatrix} \frac{-f}{a_s d_y \ ^c z_i} & 0 & \frac{-\tilde{X}_{f_i}}{\ ^c z_i} & \tilde{X}_{f_i} \left(\tilde{Y}_{f_i} \frac{d_y}{f} + \frac{\ ^c y_o}{\ ^c z_i} \right) & -\frac{f}{d_y} + \frac{\ ^c z_o f}{\ ^c z_i a_s d_y} - \tilde{X}_{f_i}^2 \frac{a_s d_y}{f} - \tilde{X}_{f_i} \frac{\ ^c x_o}{\ ^c z_i} & -\frac{\tilde{Y}_{f_i}}{a_s} - \frac{f \ ^c y_o}{a_s d_y \ ^c z_i} \\ 0 & \frac{-f}{d_y \ ^c z_i} & \frac{-\tilde{Y}_{f_i}}{\ ^c z_i} & \frac{f}{d_y} - \frac{\ ^c z_o f}{\ ^c z_i d_y} + \tilde{Y}_{f_i}^2 \frac{d_y}{f} + \tilde{Y}_{f_i} \frac{\ ^c y_o}{\ ^c z_i} & -\tilde{Y}_{f_i} \left(\tilde{X}_{f_i} \frac{a_s d_y}{f} + \frac{\ ^c x_o}{\ ^c z_i} \right) & \tilde{X}_{f_i} a_s + \frac{f \ ^c x_o}{d_y \ ^c z_i} \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} L_1 \\ \dots \\ L_n \end{bmatrix} ; \quad L_i = L_i(P_{f_i}, \ ^c r_o, \ ^c z_i) = L_i(P_{f_i}, \ ^c \bar{r}_o), \quad \forall i = 1 \dots n$$

Obtención de matriz de interacción

Soluciones para abordar la dependencia con ${}^c\bar{r}_o$:

1) Matriz de interacción en configuración deseada (Espiau)

$$\hat{L}^T = L^T (s_d, {}^c\bar{r}_o^d)$$

- Matriz de interacción constante (no hay que estimarla en línea)
- Trayectoria de referencia: $s_d(t)$
- Aproximación local \Rightarrow problemas incluso con: $s_d = cte$

2) Visión estereoscópica (Hager)

- Basta con la información visual procedente de un par de imágenes

3) Estimación en línea de J_q (Jägersand)

- Algoritmo de control adaptativo
- Inicialmente, ejecutar un juego de movimientos de prueba
- Estéreo

Obtención de matriz de interacción

4) Estimación posición del objeto

- Asumir esta dependencia al tiempo que monocámara.

- Hacer estimación en línea de ${}^c\bar{r}_o$

al igual que se hacía en seguimiento visual basado en posición

- Empleando modelo geométrico del objeto

- Para 3GDL, esa dependencia: ${}^c\bar{r}_o \rightarrow {}^c z_o$, se obtiene expr. compacta:

$${}^c z_o(P_{f_i}) = \frac{P_{uu}^T \cdot ({}^f P_{oo} - \tilde{P}_{uu})}{\|P_{uu}\|^2} \quad P_{uu} = \begin{bmatrix} P_{u_{21}} \\ P_{u_{31}} \\ P_{u_{32}} \\ \dots \end{bmatrix}, \quad P_{oo} = \begin{bmatrix} P_{o_{21}} \\ P_{o_{31}} \\ P_{o_{32}} \\ \dots \end{bmatrix}, \quad \tilde{P}_{uu} = \begin{bmatrix} \tilde{P}_{u_{21}} \\ \tilde{P}_{u_{31}} \\ \tilde{P}_{u_{32}} \\ \dots \end{bmatrix}$$

$$P_{u_{ij}} = P_{u_j} - P_{u_i}, \quad P_{o_{ij}} = \begin{bmatrix} {}^o x_j - {}^o x_i \\ {}^o y_j - {}^o y_i \end{bmatrix}, \quad \tilde{P}_{uu} = {}^o z_j P_{u_j} - {}^o z_i P_{u_i}$$

- Esto queda implícito, de forma que: $L = L(P_{f_i})$

Esquema de control para 6 GDL

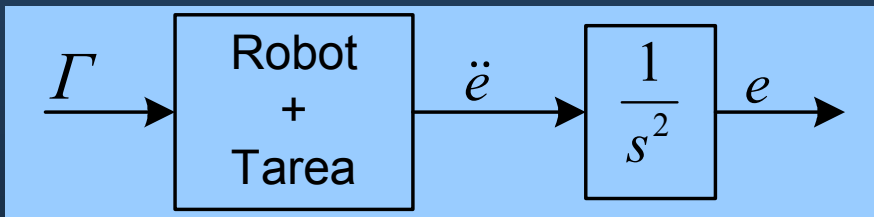
- La dinámica del manipulador viene dada por: $\Gamma = M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q})$
- De la tarea especificada: $e(q, t)$

$$\dot{e}(q, \dot{q}, t) = J_q \dot{q} + J_t$$

$$\ddot{e}(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) = J_q \ddot{q} + f$$

$$f(q, \dot{q}, t) = \begin{bmatrix} \dot{q}^T W_1 \dot{q} \\ \dot{q}^T W_2 \dot{q} \\ \dots \\ \dot{q}^T W_m \dot{q} \end{bmatrix} + 2 \frac{\partial^2 e}{\partial q \partial t} \dot{q} + \frac{\partial^2 e}{\partial t^2}$$

- Dinámica del conjunto *robot+tarea*:



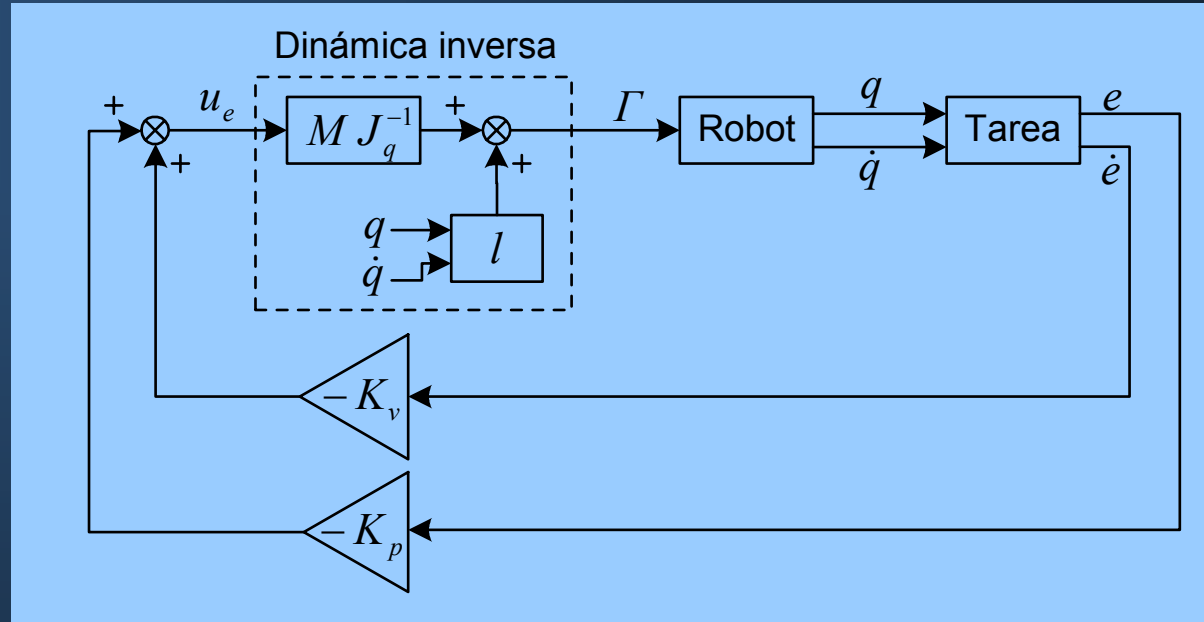
$$\ddot{e} = J_q M^{-1}(\Gamma - l) \quad l = N - M J_q^{-1}$$

- Si el par de entrada se obtiene, a partir de u_e , mediante la dinámica inversa:

$$\Gamma = \hat{M} \hat{J}_q^{-1} u_e + \hat{l}$$

Linealización por realimentación

$$\Gamma = \hat{M} \hat{J}_q^{-1} u_e + \hat{l}$$



Se puede diseñar control lineal:

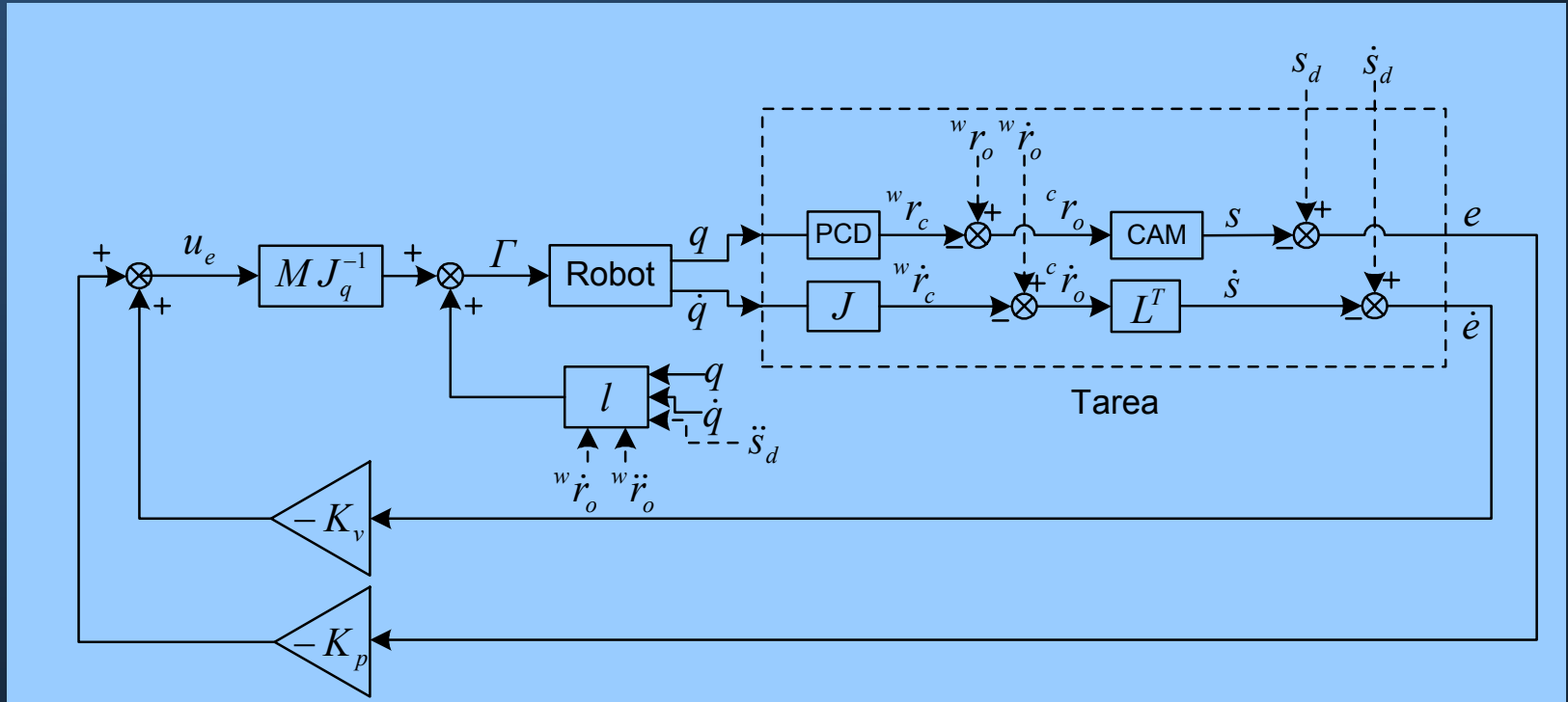
$$\ddot{e} + K_p e + K_v \dot{e} = 0$$

Linealización por realimentación

Espacio de características visuales:

$$e(q, t) = s_d(t) - s({}^c \bar{r}_o(q))$$

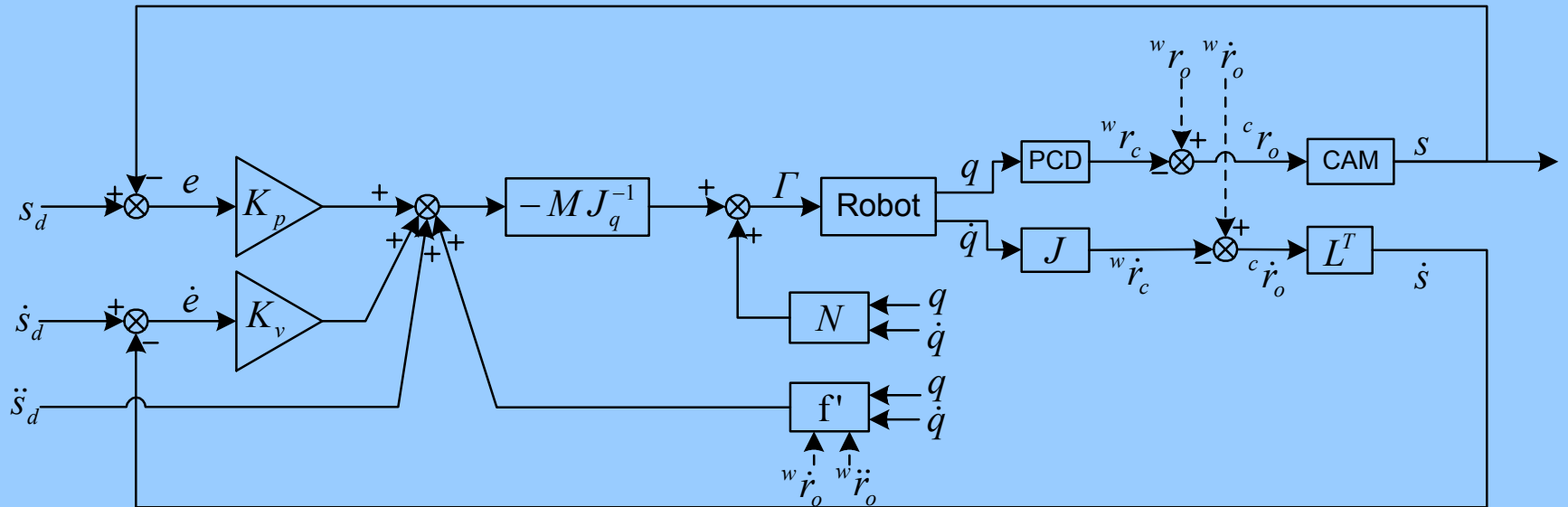
$$\begin{cases} \dot{e}(q, \dot{q}, t) = J_q \dot{q} + J_t \\ \ddot{e}(q, \dot{q}, \ddot{q}, t) = J_q \ddot{q} + f \end{cases} \quad \begin{cases} J_q = L B_1 J^{(c)} \\ J_t = -L {}^w \dot{r}_o^{(c)} + \dot{s}_d \end{cases}$$



$$\begin{bmatrix} \dot{q}^T (J^{(c)T} B_1^T L_1 B_1 J^{(c)}) \dot{q} \\ \dots \\ \dot{q}^T (J^{(c)T} B_1^T L_m B_1 J^{(c)}) \dot{q} \end{bmatrix} + L B_1 {}^c \mathbf{R}_w \begin{bmatrix} \dot{q}^T H_1 \dot{q} \\ \dots \\ \dot{q}^T H_6 \dot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} {}^w \dot{r}_o^{(c)T} L_1 B_1 J^{(c)} \\ \dots \\ {}^w \dot{r}_o^{(c)T} L_m B_1 J^{(c)} \end{bmatrix} \dot{q} + \begin{bmatrix} \dot{q}^T J^{(c)T} B_1^T L_1 \\ \dots \\ \dot{q}^T J^{(c)T} B_1^T L_m \end{bmatrix} {}^w \dot{r}_o^{(c)} - \begin{bmatrix} {}^w \dot{r}_o^{(c)T} L_1 {}^w \dot{r}_o^{(c)} \\ \dots \\ {}^w \dot{r}_o^{(c)T} L_m {}^w \dot{r}_o^{(c)} \end{bmatrix} + L^T {}^c \mathbf{R}_w (B_2 {}^w \dot{r}_o - {}^w \ddot{r}_o) - L B_3 +$$

Esquema de control para 6 GDL

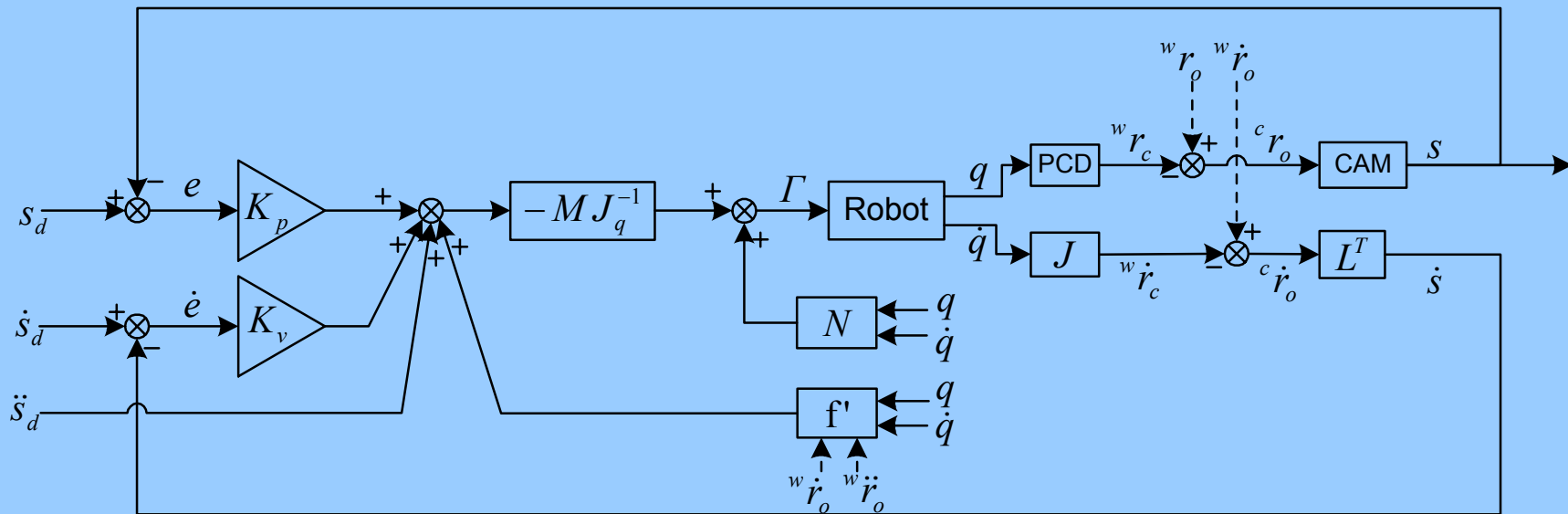
Reorganizado en forma similar al control por par calculado



- Dependencia de: ${}^w\dot{r}_o$, ${}^w\ddot{r}_o$

Movimiento objeto como perturbación

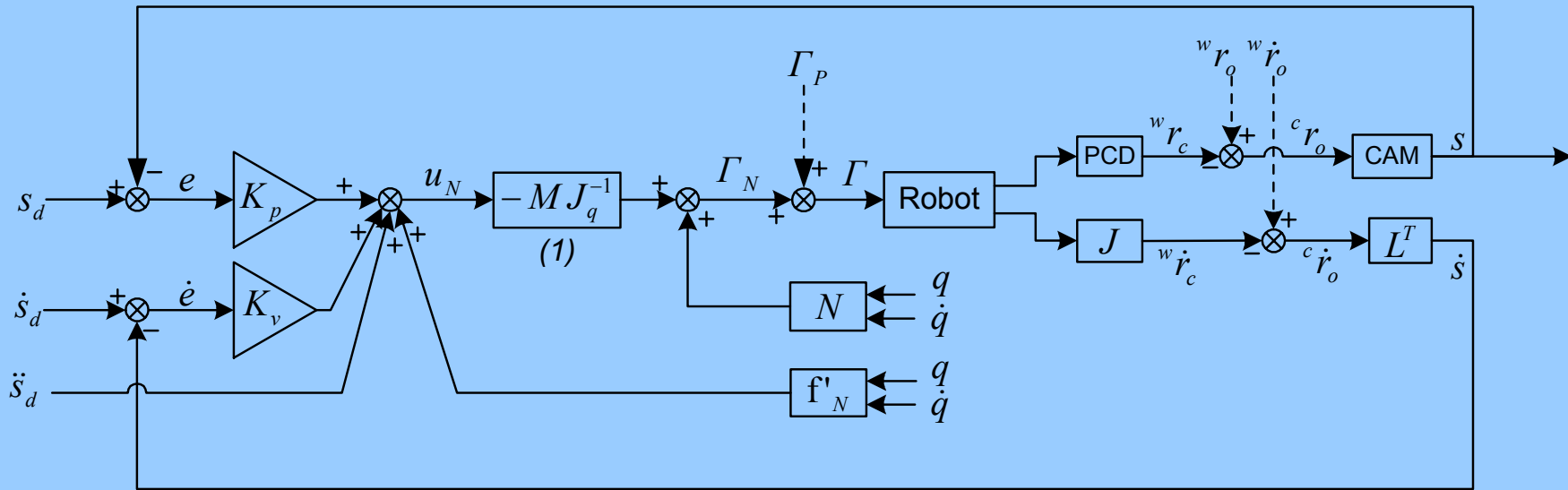
- Existe la dependencia: $f'(q, \dot{q}, {}^w\dot{r}_o, {}^w\ddot{r}_o)$
- En general, no se conoce el perfil de movimiento del objeto
- La linealización exacta no es posible



- Lo planteamos como perturbación:

$$f' = f'_N(q, \dot{q}) + f'_P(q, \dot{q}, {}^w\dot{r}_o, {}^w\ddot{r}_o)$$

Movimiento objeto como perturbación



- Objeto con movimiento a velocidad constante $\Rightarrow \Gamma_P = cte.$
- Objeto con movimiento unif. acelerado $\Rightarrow \Gamma_P = rampa$
- Se añade efecto integral al controlador

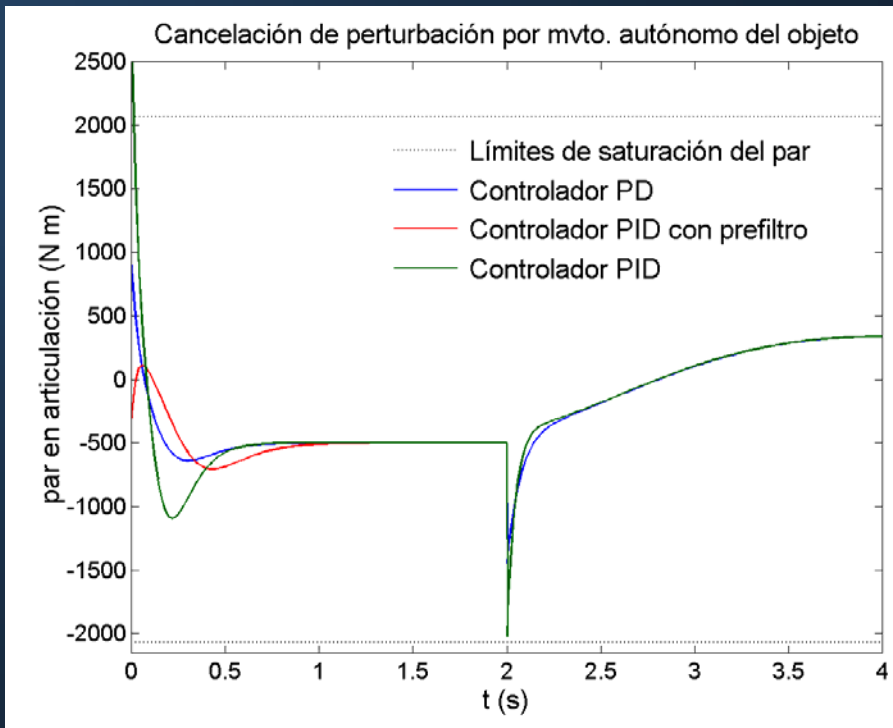
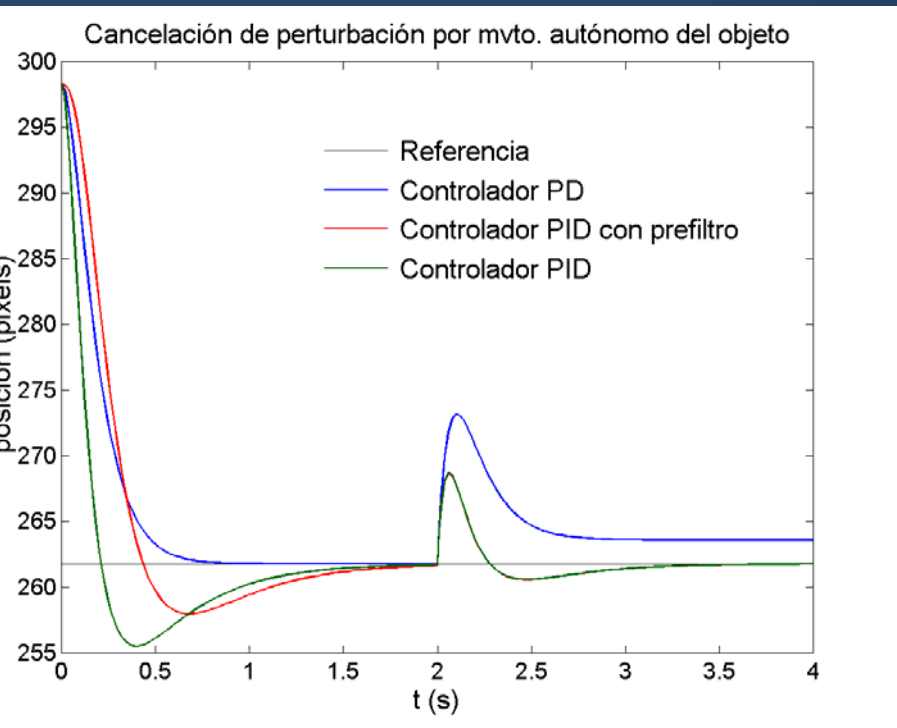
Movimiento objeto como perturbación

- En $t=2s$, objeto inicia mvto. a velocidad cte.

$${}^w \dot{r}_o = [-0.25, -0.25, 0.25]^T \text{ m/s} \Rightarrow [220, 275, 225]^T \text{ pixels/s}$$

- Se emplean 3 características

- Se muestra: $s_1 = X_{f_1}$ y pares en segunda articulación



- Prefiltro para reducir SO y limitar riesgo de saturación:

filtro primer orden $\tau = 0.15 \text{ s}$

Ruido en características. Redundancia

- En principio, se suponía $m = dof$
- Para mejorar comportamiento en presencia de ruidos (frecuente):

$$J_{q_{m \times 6}} = L_{m \times 6} B_{1_{6 \times 6}} J_{6 \times 6} \quad m > dof \Rightarrow \text{redundancia en las características}$$

- Problema de controlabilidad (*coherencia de las características*)

Alternativas para la inclusión de redundancia:

1) Uso de matriz de combinación (Espiau):

$$\tilde{e}(q, t)_{6 \times 1} = C_{6 \times m} (s_d(t)_{m \times 1} - s(q)_{m \times 1}) \quad rango(CL) = 6$$

- Se pierde intuición

2) Estimar ${}^c \bar{r}_o$ con mayor número:

- Usar 6 características para el error
- Más (hasta 50) para estimar ${}^c \bar{r}_o$

Incertidumbre en el modelo. Robustez

Segundo método de Lyapunov mediante el empleo de funciones saturación

Originalmente aplicado al control articular

Se aplica al control en espacio de características

$$\ddot{e} = M_a^{-1}(\Gamma - l), \quad M_a = M \cdot J_q^{-1}$$

- Sin incertidumbre: $\Gamma = M_a u_e + l \Rightarrow \ddot{e} = u_e \quad (u_e = -K x)$

- Con incertidumbre: $\Gamma = \hat{M}_a u_e + \hat{l} \Rightarrow \ddot{e} = u_e + \eta$

$$\begin{cases} \eta = E u_e + M_a^{-1} \Delta l \\ E = M_a^{-1} \cdot \hat{M}_a - I_{3 \times 3} \\ \Delta l = \hat{l} - l \end{cases}$$

$$u_e = u_{eN} + \Delta u_e \quad \begin{cases} u_{eN} = -K x \\ \Delta u_e = \begin{cases} -\rho \frac{B^T P x}{\|B^T P x\|} & \text{si } \|B^T P x\| \geq \varepsilon \\ -\rho \frac{B^T P x}{\varepsilon} & \text{si } \|B^T P x\| < \varepsilon \end{cases} \end{cases}$$

ρ cota incertidumbre

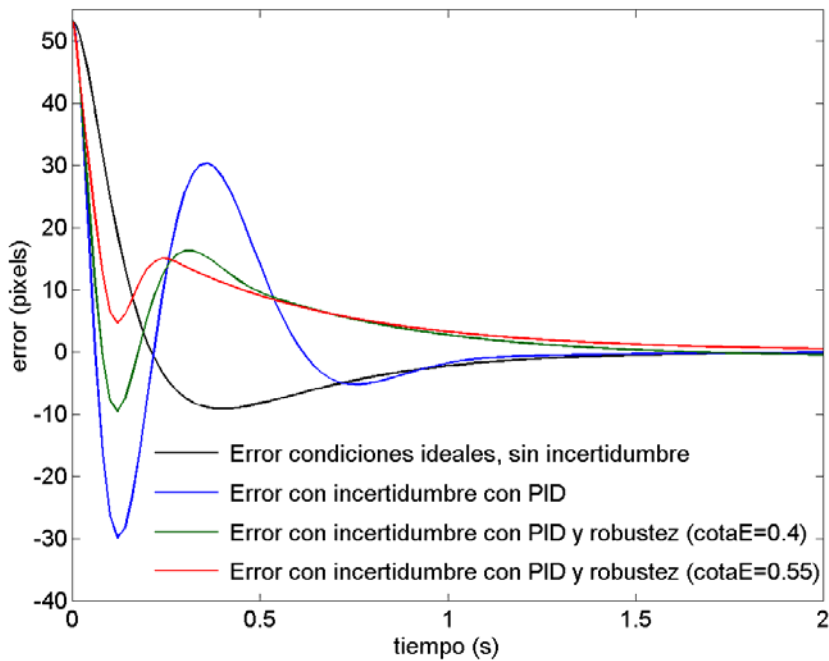
Incertidumbre en el modelo. Robustez

- Incertidumbre aleatoria de hasta el 40%:

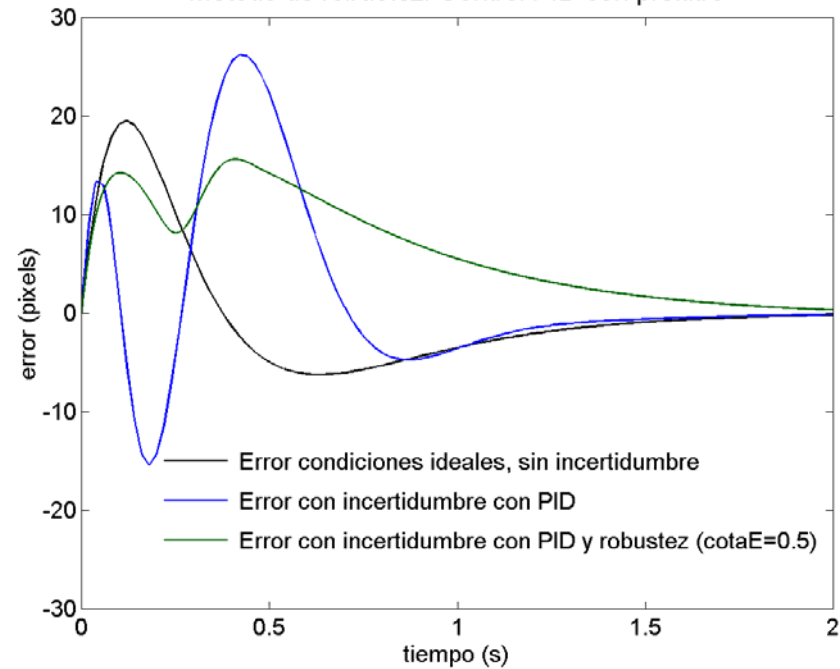
- parámetros de la cámara
- parámetros cinemáticos del robot
- parámetros dinámicos del robot

$$\varepsilon = 10^{-3}$$

Método de robustez ante incertidumbres en el modelo. Control PID

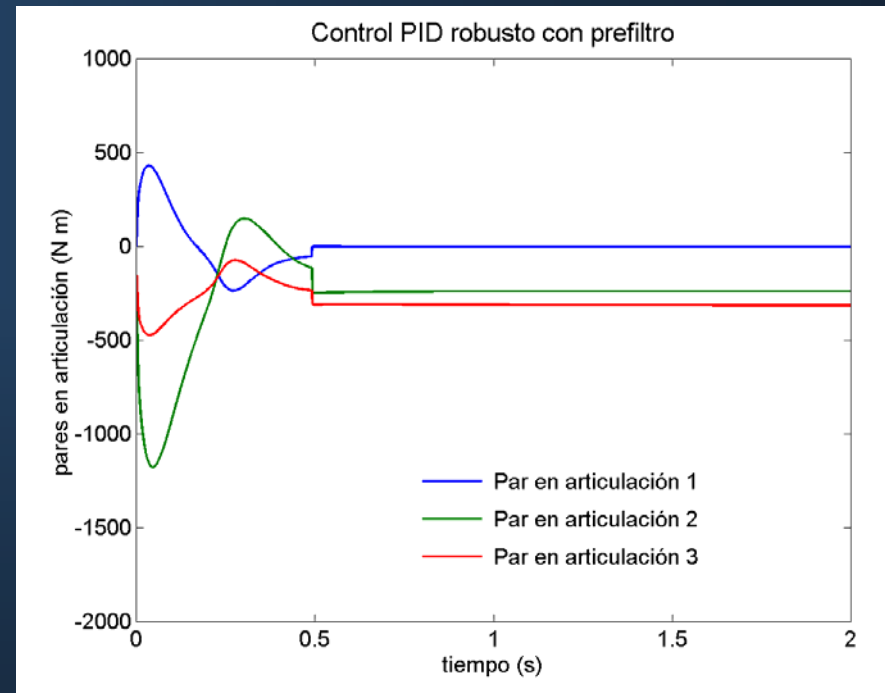
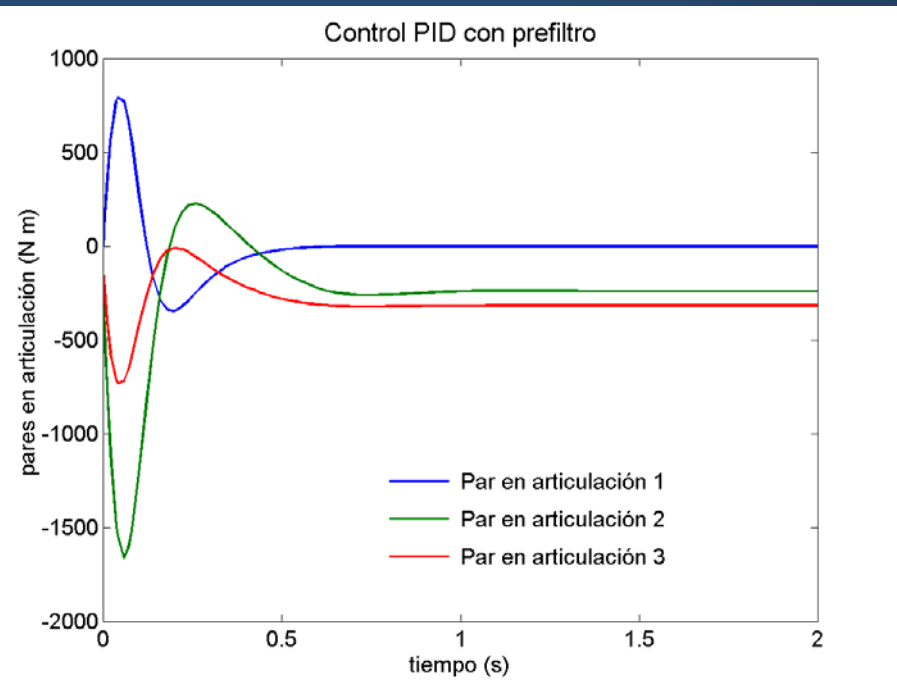


Método de robustez. Control PID con prefiltro



Incertidumbre en el modelo. Robustez

- Comparación de pares en articulaciones:



Implementación para RM-10

- En desarrollo

- Robot industrial RM-10

$$\Gamma = M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q})$$

- (simulaciones suponiendo reductoras unitarias)

- Reemplazada electrónica de control

Elem.	Masa	Reduc.
1	38.65 Kg	121
2	51.80 Kg	153
3	84.10 Kg	105
4	33.89 Kg	59
5	7.35 Kg	80
6	5.00 Kg	50



Implementación para RM-10

- Dos ordenadores personales:

PC 1: Host electrónica de control articulaciones:

- Tarjeta *dSpace* 6 ejes
- Entorno de desarrollo *Simulink+ControlDesk*

PC 2: Host sistema de visión:

- Cámara digital *PULNIX TM-6710*
- Tarjeta de adquisición *PC-DIG*

- Conexión ethernet dedicada via *sockets*
- Velocidad captura y extracción de características $< 10\text{ ms}$
- 100 ciclos por segundo (22 veces más rápido que el otro)

Índice de la presentación

☆ Introducción

🕒 Estrategias de seguimiento visual. Clasificación

🕒 Calibraciones previas requeridas

🕒 Implementaciones completadas o en realización

🕒 Caso 1. Seguimiento visual basado en posición para PUMA 560

🕒 Caso 2. Seguimiento visual basado en características para RM-10

🕒 **Conclusiones**

🕒 Trabajos futuros

Conclusiones

- Esquema basado en posición:
 - Control de robot PUMA 560
 - Con doble lazo de realimentación
 - 6 GDL
- Esquema basado en características:
 - Control de robot RM-10 (no concluido)
 - Control directo (servo-visual)
 - 3 GDL, 6 GDL

Índice de la presentación

☆ Introducción

🕒 Estrategias de seguimiento visual. Clasificación

🕒 Calibraciones previas requeridas

🕒 Implementaciones completadas o en realización

🕒 Caso 1. Seguimiento visual basado en posición para PUMA 560

🕒 Caso 2. Seguimiento visual basado en características para RM-10

🕒 Conclusiones

🕒 **Trabajos futuros**

Trabajos futuros

- Visión estereoscópica \Rightarrow no modelo geométrico objeto
- Planificación de trayectorias en espacio características
- Combinación del seguimiento visual basado en características con evitación de singularidades en la tarea