



DIVISIÓN DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA
UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ

Discontinuidades del control visual frente a la incorporación o pérdida de características

Nicolás García Aracil



Continuidad del control visual



INDICE

- Introducción
- Teoría preliminar: Control visual en el espacio invariante
- Control en el espacio invariante con pesos(weighted invariant space)
- Experimentos utilizando datos simulados
 - Control de una camara mientras esta realizando un zoom
 - Control de un robot movil holonómico



Continuidad del control visual

INDICE

- **Introducción**
- Teoría preliminar: Control visual en el espacio invariante
- Control en el espacio invariante con pesos(weighted invariant space)
- Experimentos utilizando datos simulados
 - Control de una camara mientras esta realizando un zoom
 - Control de un robot movil holonómico



Introducción

- Técnicas de control visual → Durante las últimas 2 décadas
 - Premisa
 - El objeto debe permanecer en el campo de visión durante el control.
 - Solución???
 - Por supuesto!! Mantener siempre el objeto en el campo de visión.
 - Planificación de trayectorias en el plano de la imagen. Mouzart y Chaumette
 - Controlar el zoom de la cámara. E. Malis, UMH.
 - Definir una nueva función de la tarea que tenga en cuenta este posible problema
 - Nuevo enfoque propuesto en esta presentación



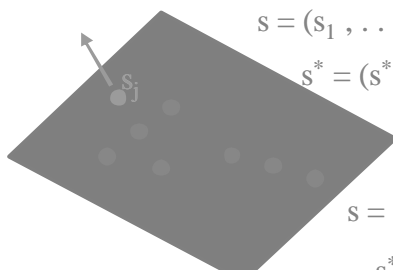
Introducción

- Task function approach (Samson)

$$e = C (s - s^*)^T \text{ siendo } s = (s_1, \dots, s_n)^T \text{ y } s^* = (s^*_1, \dots, s^*_n)^T$$

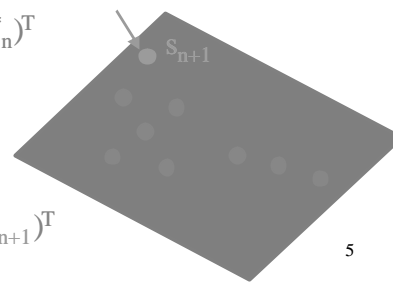
$$v = - \lambda L^+ e$$

- Qué ocurre cuando una característica aparece o desaparece del plano de la imagen??



$s = (s_1, \dots, s_j, \dots, s_n)^T$
 $s^* = (s^*_1, \dots, s^*_j, \dots, s^*_n)^T$

Discontinuidad



$s = (s_1, \dots, s_n, s_{n+1})^T$
 $s^* = (s^*_1, \dots, s^*_n, s^*_{n+1})^T$

Continuidad del control visual
ISA-UMH © TDOC-2003

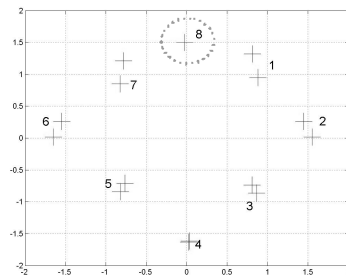
5



Introducción

- Estudio

- Control visual clásico basado en características de la imagen
 - Sólo cambia la función de la tarea dependiendo del número de características que aparezcan (s_{n+1}) o desaparezcan (s_j)
- Control visual en el espacio invariante
 - Cambian todas las características de la función de la tarea \rightarrow cambia la transformación entre el espacio proyectivo de la imagen y el espacio invariante proyectivo \rightarrow los pts invariantes sobre los que se realiza el control.



Continuidad del control visual
ISA-UMH © TDOC-2003

6



Introducción

- Solución
 - A cada característica se le asocia un peso (pos u, v en imagen. $W \rightarrow 0$ cerca del borde de la imagen)
 - Definir una función de la tarea (task function) que tenga en cuenta los pesos asociados a cada característica
 - Reformular las aproximaciones
 - Control visual clásico basado en características de la imagen
 - Control visual en el espacio invariante
 - Experimentos con datos simulados para corroborar la solución propuesta



Continuidad del control visual

INDICE

- Introducción
- **Teoría preliminar: Control visual en el espacio invariante**
- Control en el espacio invariante con pesos (weighted invariant space)
- Experimentos utilizando datos simulados
 - Control de una cámara mientras esta realizando un zoom
 - Control de un robot móvil holonómico



Control visual en el espacio invariante

- Esquema de control que es invariante respecto a los posibles cambios en los parámetros intrínsecos de la cámara
 - Cámara con que se toma la imagen de referencia no sea la misma con la que se realiza el control (envejecimiento...)
 - Posibilidad de usar el zoom (Control en el espacio invariante, config eye-to-hand, control del zoom para evitar que caract salgan de la imagen, UMH)
- Se dispone de n puntos $p_i = (u_i, v_i, 1)$ o $m_i = (x_i, y_i, 1)$ se puede construir las matrices:

$$S_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \cdot p_i^T \quad y \quad S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \cdot m_i^T \quad S_p = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n u_i^2 & \sum_{i=1}^n u_i \cdot v_i & \sum_{i=1}^n u_i \\ \sum_{i=1}^n u_i \cdot v_i & \sum_{i=1}^n v_i^2 & \sum_{i=1}^n v_i \\ \sum_{i=1}^n u_i & \sum_{i=1}^n v_i & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{12} & s_{22} & s_{23} \\ s_{13} & s_{23} & 1 \end{bmatrix}$$



Control visual en el espacio invariante

- Como $p_i = K m_i$ siendo K matriz parámetros intrínsecos

$$S_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \cdot p_i^T = K \cdot \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \cdot m_i^T \right) \cdot K^T = K \cdot S_m \cdot K^T$$

- Si los puntos no son colineales y $n > 3$, S_p y S_m son matrices definidas positivas y que pueden descomponerse utilizando la descomposición de Cholesky en:

$$S_p = T_p \cdot T_p^T \quad y \quad S_m = T_m \cdot T_m^T$$

$$T_p = K \cdot T_m$$



Control visual en el espacio invariante

- T_p define una transformación proyectiva del espacio proyectivo de la imagen al nuevo espacio proyectivo Q .
- De forma análoga, la matriz T_m define una transformación proyectiva del espacio proyectivo M al mismo espacio proyectivo Q .
- Si $q_i \in Q$

$$q_i = T_p^{-1} \cdot p_i \quad q_i = T_m^{-1} \cdot m_i$$

$$q_i = T_p^{-1} \cdot p_i = T_m^{-1} \cdot K^{-1} \cdot p_i = T_m^{-1} \cdot K^{-1} \cdot K \cdot m_i = T_m^{-1} \cdot m_i$$

T_m^{-1} y m_i no dependen de parámetros intrínsecos



Control visual en el espacio invariante



Continuidad del control visual

INDICE

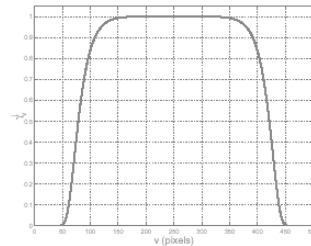
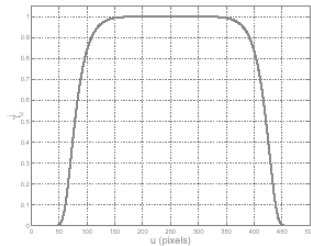
- Introducción
- Teoría preliminar: Control visual en el espacio invariante
- **Control en el espacio invariante con pesos(weighted invariant space)**
- Experimentos utilizando datos simulados
 - Control de una camara mientras esta realizando un zoom
 - Control de un robot movil holonómico



Control(weighted invariant space)

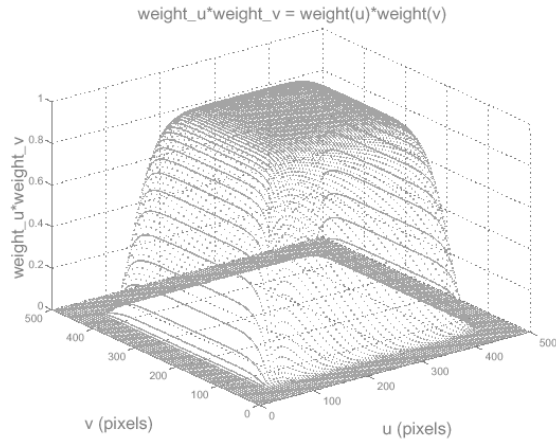
- Funciones de peso asociadas a cada característica s_i
 - Funciones de peso distintas. Peso $\rightarrow 0$ cerca del borde y \rightarrow cerca del centro de la imagen.
 - Cada punto p_i de la imagen tiene su propio peso γ

$$\gamma(x) = \begin{cases} e^{-\frac{(x-x_{med})^{2n}}{(x-x_{min})^m(x_{max}-x)^m}} & x_{min} < x < x_{max} \\ 0 & x = \{x_{min}, x_{max}\} \end{cases}$$





Control(weighted invariant space)



Continuidad del control visual
ISA-UMH © TDOC-2003

15



Control(weighted invariant space)

- Pesos γ_i redistribuirse para que la suma de sus cuadrados sea n

$$S_p^g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{g}_i \cdot p_i \cdot \mathbf{g}_i \cdot p_i^T \quad \text{y} \quad S_m^g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{g}_i \cdot m_i \cdot \mathbf{g}_i \cdot m_i^T$$

$$S_p = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n u_i^2 & \sum_{i=1}^n u_i \cdot v_i & \sum_{i=1}^n u_i \\ \sum_{i=1}^n u_i \cdot v_i & \sum_{i=1}^n v_i^2 & \sum_{i=1}^n v_i \\ \sum_{i=1}^n u_i & \sum_{i=1}^n v_i & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_{11} & \mathbf{s}_{12} & \mathbf{s}_{13} \\ \mathbf{s}_{12} & \mathbf{s}_{22} & \mathbf{s}_{23} \\ \mathbf{s}_{13} & \mathbf{s}_{23} & 1 \end{bmatrix}$$

Continuidad del control visual
ISA-UMH © TDOC-2003

16



Control(weighted invariant space)

- Se demuestra que esta formulación es también invariante respecto a la variación de los parámetros intrínsecos de la cámara
- Se recalcula la matriz de interacción teniendo en cuenta los pesos
- Se define una nueva función de la tarea $e = CW(s - s^*)$
 - W es una matriz diagonal $2n \times 2n$ con los pesos
- Se ha demostrado su estabilidad local
- Se ha aplicado con éxito a las simulaciones que se mostrarán posteriormente



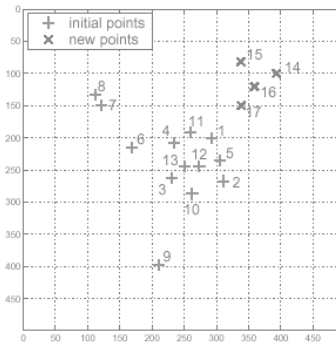
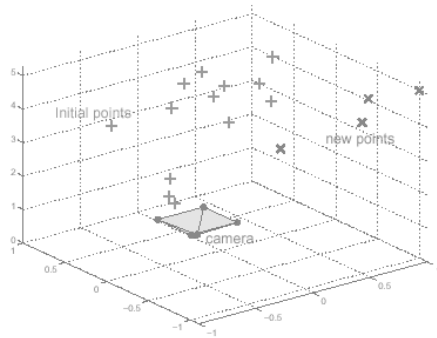
Continuidad del control visual

INDICE

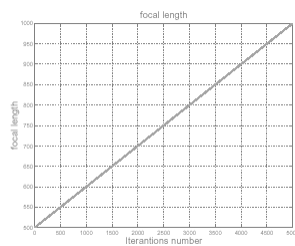
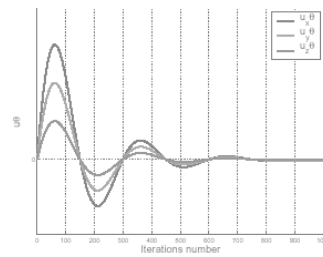
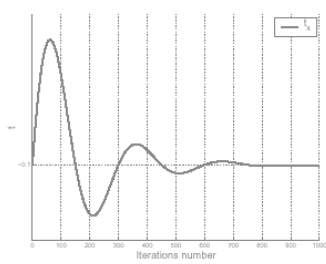
- Introducción
- Teoría preliminar: Control visual en el espacio invariante
- Control en el espacio invariante con pesos(weighted invariant space)
- **Experimentos utilizando datos simulados**
 - **Control de una camara mientras esta realizando un zoom**
 - Control de un robot movil holonómico



Camera zooming



Camera zooming



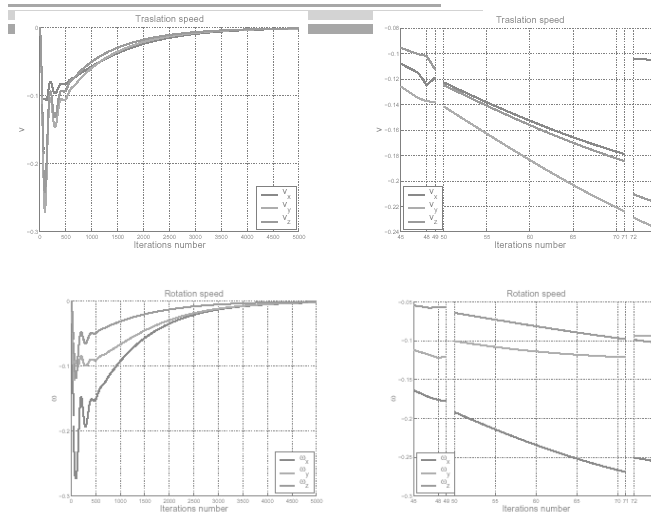


Camera zooming

- Simulation 1:
 - $n = 13$
 - $\Delta t = 1 \text{ ms}$
 - *Simulation time = 5.0 s*
- During the simulation, the feature points, whose numbers are 6,7,8 and 9, have been gone out of the image plane. These features have been removed from the control law. Another feature point, whose number is 10, is near the border of the image but It has not been gone out.

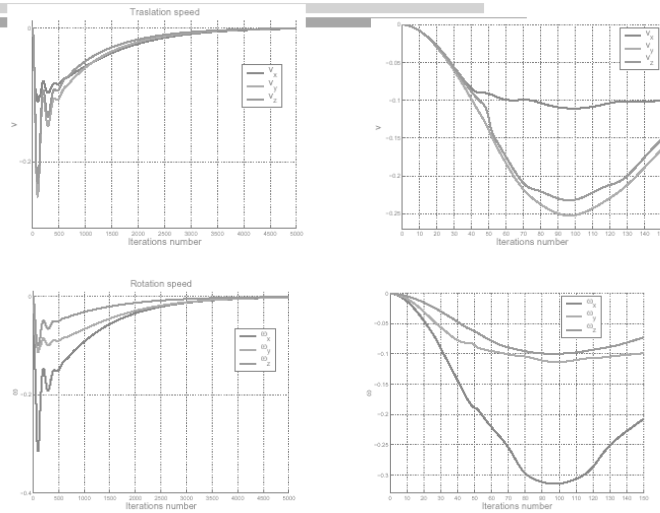


Camera zooming(Control INV)





Camera zooming(Control INVW)

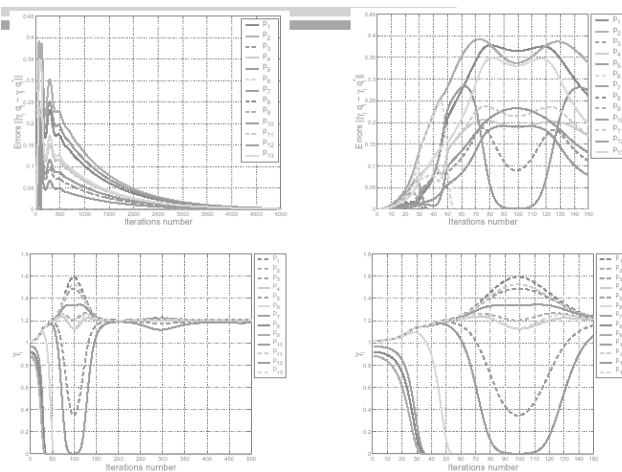


Continuidad del control visual
ISA-UMH © TDOC-2003

23



Camera zooming(Pesos INVW)



Continuidad del control visual
ISA-UMH © TDOC-2003

24

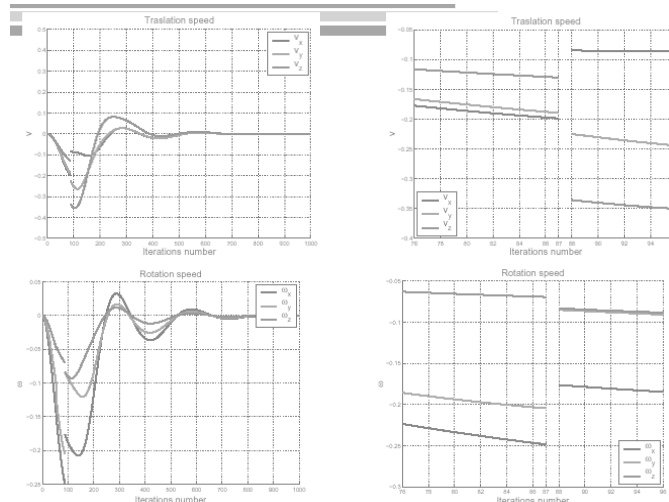


Camera zooming

- Simulation 2:
 - $n = 16$ not the same as Simulation 1.
 - $\Delta t = 10 \text{ ms}$
 - *Simulation time* = 10.0 s
- During the simulation, the feature points, whose numbers are [(14,15),(6,12),(4,5,13),3,11 and 16] have been gone out of the image plane. These features have been removed from the control law.

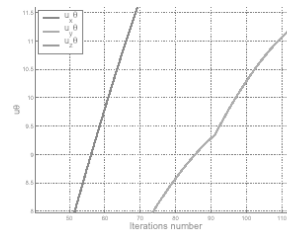
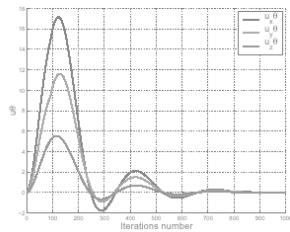
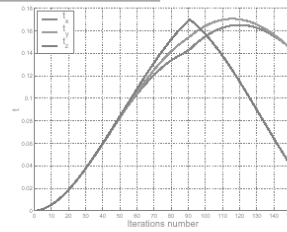
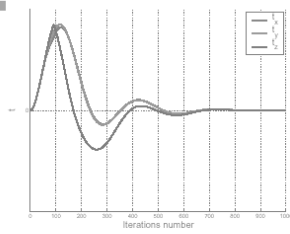


Camera zooming(Control INV)





CZooming(Error espacio cartesiano INV)

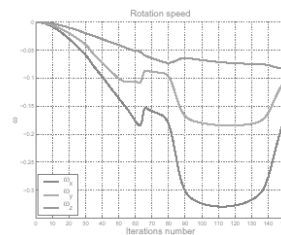
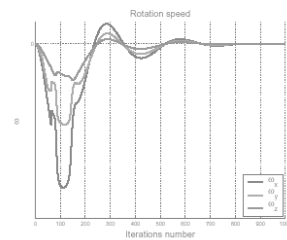
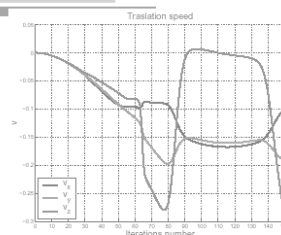
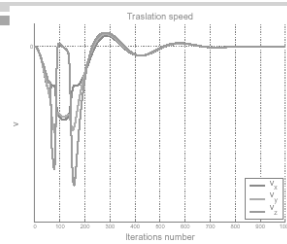


Continuidad del control
ISA-UMH © TDOC-2003

27



Camera zooming(Control INVW)

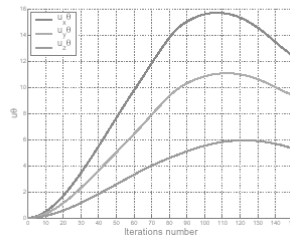
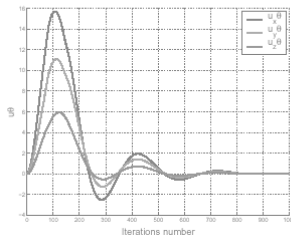
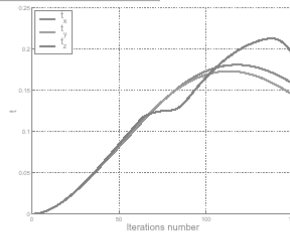
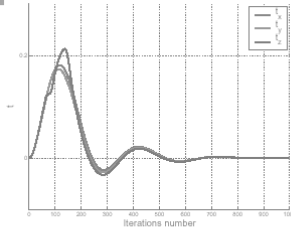


Continuidad del control visua
ISA-UMH © TDOC-2003

28



CZooming(Error espacio cartesiano INVW)

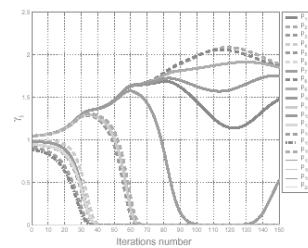
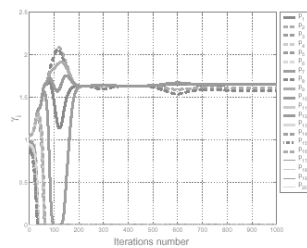
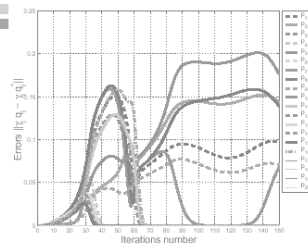
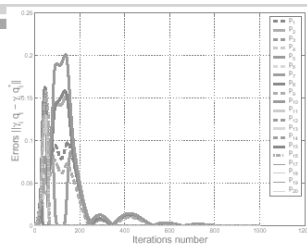


Continuidad del control vs:
ISA-UMH © TDOC-2003

29



Camera zooming(Pesos INVW)



Continuidad del control v
ISA-UMH © TDOC-2003

30



Continuidad del control visual

INDICE

- Introducción
- Teoría preliminar: Control visual en el espacio invariante
- Control en el espacio invariante con pesos (weighted invariant space)
- Experimentos utilizando datos simulados
 - Control de una cámara mientras esta realizando un zoom
 - **Control de un robot móvil holonómico**



Robot móvil

- Navegación visual de un Robot móvil holonómico
- Un entrenamiento previo donde se recoge un vector de características de referencia s^*
- Objetivo → que el robot repita el camino aprendido
- Usando
 - Control en el espacio invariante
 - Control visual clásico basado en características de la imagen

$$e = CW(s - s^*(t))$$

$$v = -\lambda (CWL)^{-1}e + (CWL)^{-1}CW\dot{s}^*$$



Robot movil

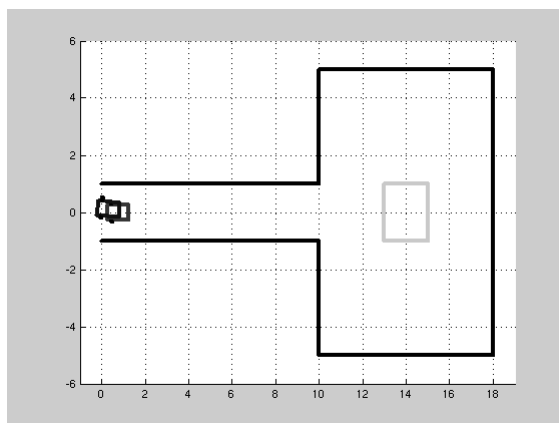


Continuidad del control visual
ISA-UMH © TDOC-2003

33



Robot movil



Continuidad del control visual
ISA-UMH © TDOC-2003

34

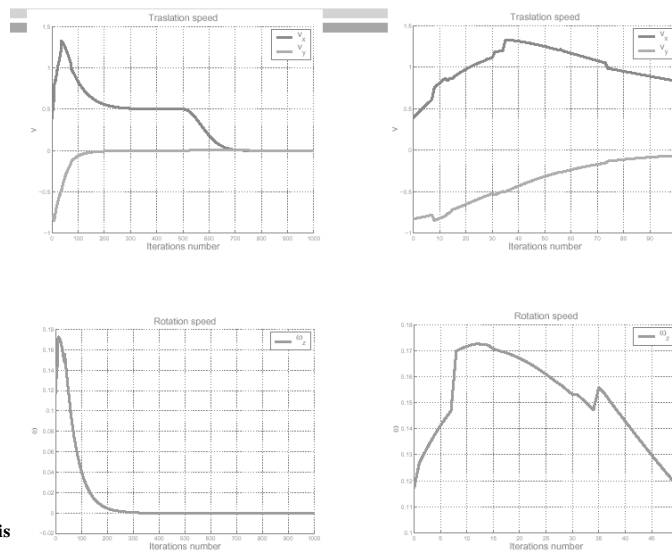


Robot movil

- Simulation 1
 - $n = 32$
 - $\Delta t = 10 \text{ ms}$
 - Simulation time = 10.0 s
 - $\lambda = 2$ and $\lambda = 1$ for Image based visual servoing
 - $n = m = 1$ in the weight function
 - Initial pose: $t_0 = [-0.5 \ 0.4 \ 0]m$ and $u\theta = [0 \ 0 \ -7.5]degrees$
 - Initial pose of the reference mobile robot:
 $t_0^* = [0.2 \ 0 \ 0]m$ and $u\theta^* = [0 \ 0 \ 0]degrees$

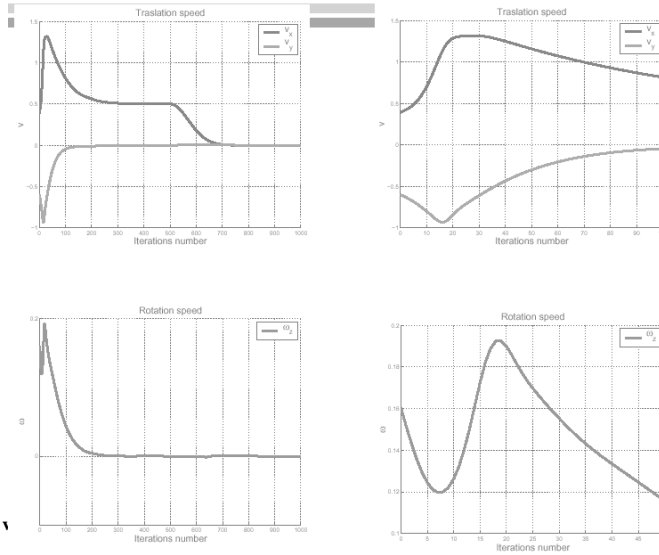


Robot movil(Control INV)





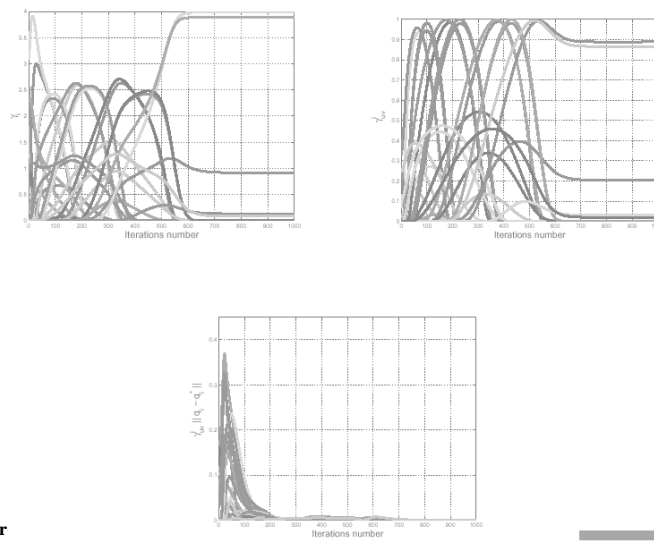
Robot movil(Control INVW)



37



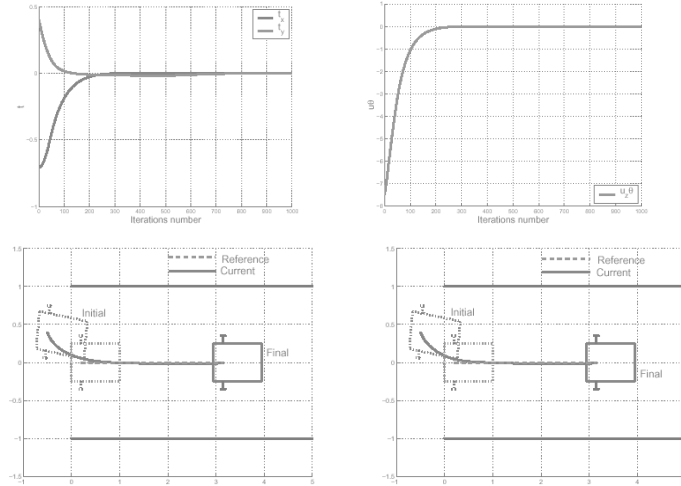
Robot movil(Pesos INVW)



38



Error y trayectoria (INV)

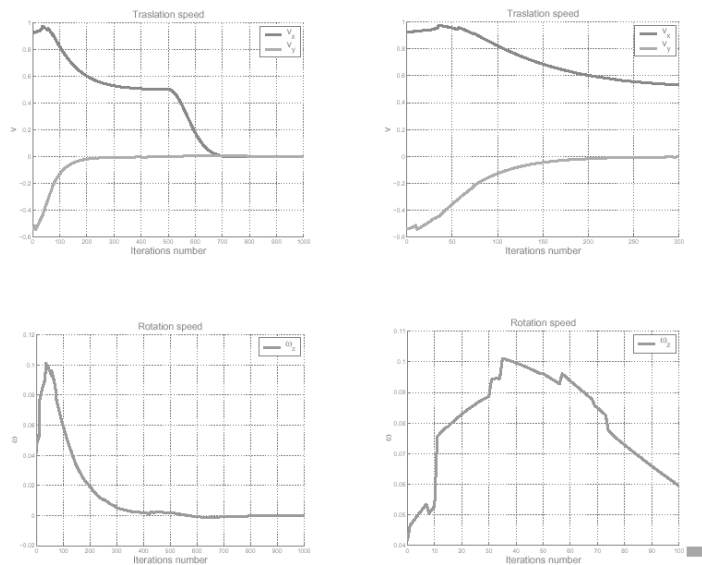


Continuidad del control visual
ISA-UMH © TDOC-2003

39



Robot movil(Control IB)

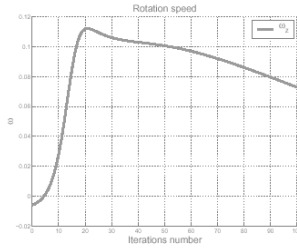
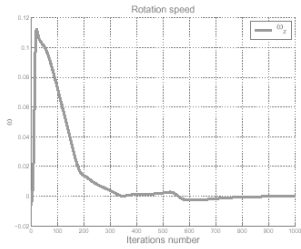
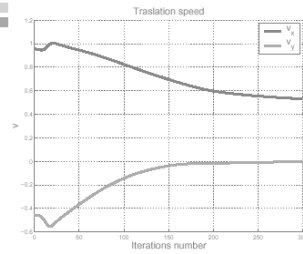
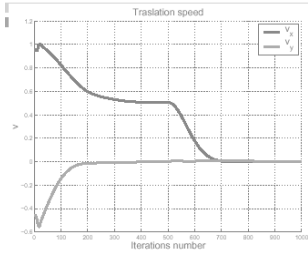


Continuidad del control vi
ISA-UMH © TDOC-2003

40



Robot movil(Control IBW)

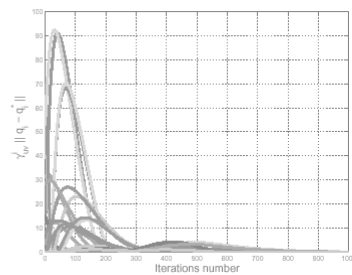
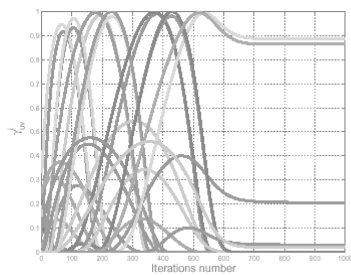


Continuidad del control visual
ISA-UMH © TDOC-2003

41



Robot movil(Pesos IBW)



Continuidad del control visual
ISA-UMH © TDOC-2003

42

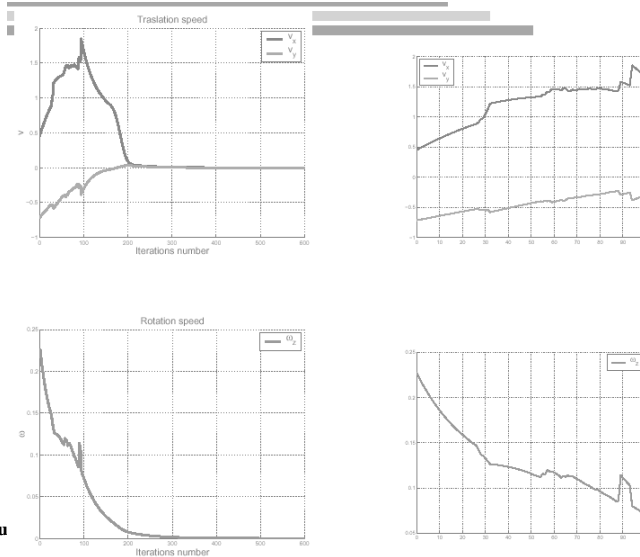


Robot movil

- Simulation 2
 - $n = 28$ more points go out at the same time
 - $\Delta t = 8 \text{ ms}$
 - *Simulation time* = 5 s
 - $\lambda = 2$ and $\lambda = 1$ for Image based visual servoing
 - $n = m = 1$ in the weight function
 - Initial pose: $t_0 = [-0.5 \ 0.4 \ 0]m$ and $u\theta = [0 \ 0 \ -7.5]degrees$
 - Initial pose of the reference mobile robot:
 $t_0^* = [0.2 \ 0 \ 0]m$ and $u\theta^* = [0 \ 0 \ 0]degrees$

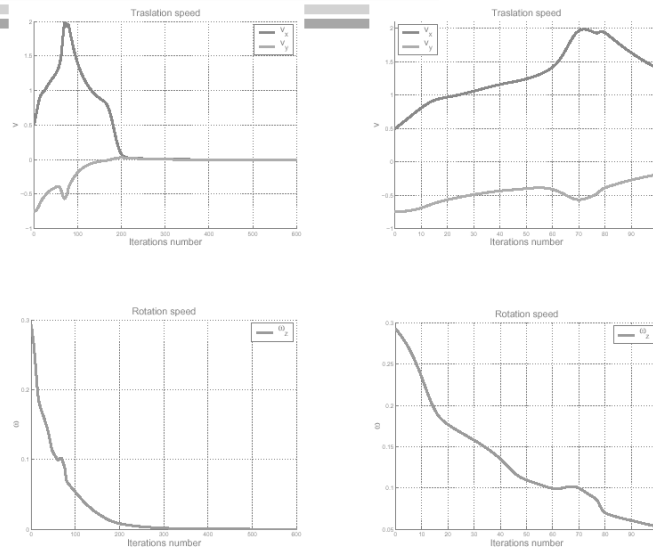


Robot movil(Control INVW)





Robot movil(Control INVW)

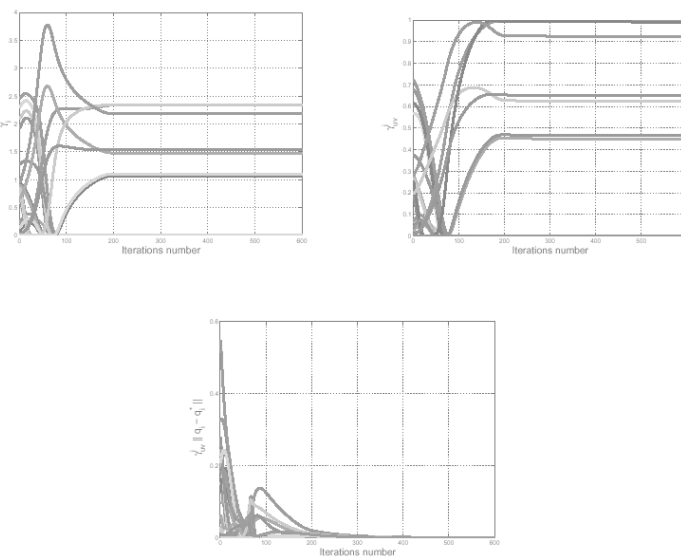


Continuidad del control visu
ISA-UMH © TDOC-2003

45



Robot movil(Pesos INVW)

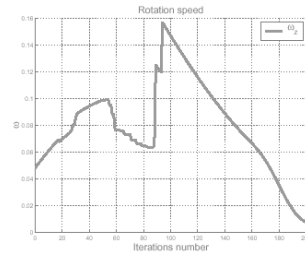
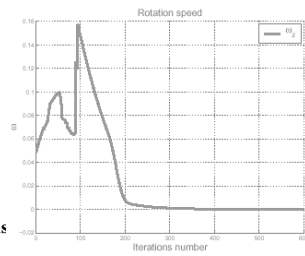
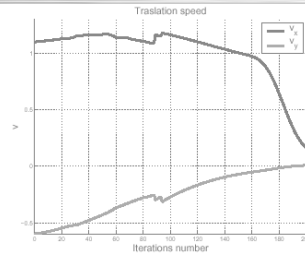
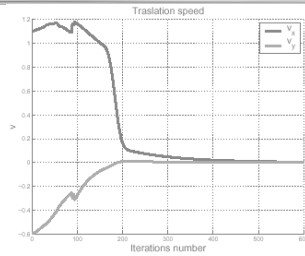


Continuidad del control vi
ISA-UMH © TDOC-2003

46



Robot movil(Control IB)

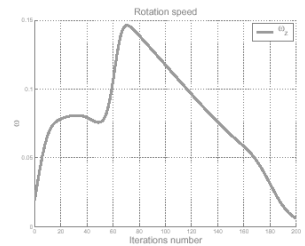
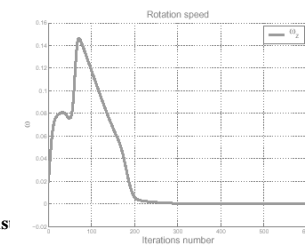
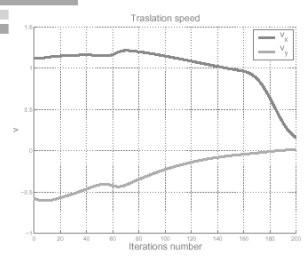
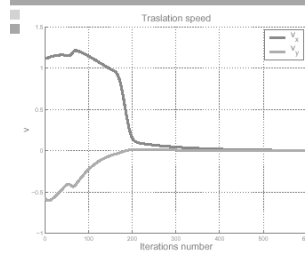


Continuidad del control vis
ISA-UMH © TDOC-2003

47



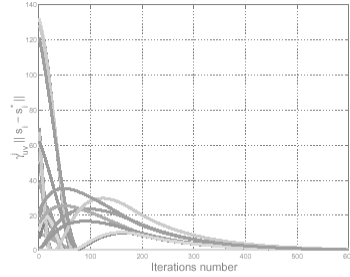
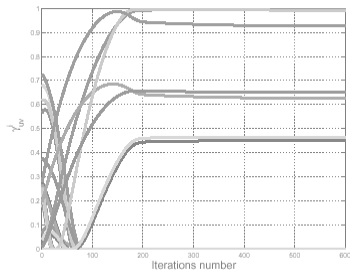
Robot movil(Control IBW)



Continuidad del control vis
ISA-UMH © TDOC-2003

48

Robot movil(Pesos IBW)



Continuidad del control visual
ISA-UMH © TDOC-2003

49

Pruebas experimentales

- Cámara motorizada
- PA-10
- Robot movil



Continuidad del control visual
ISA-UMH © TDOC-2003

50