



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal
Grupo de Automática, Robótica y Visión Artificial



Seguimiento de Trayectorias empleando Control Visual 2D basado en Flujo de Movimiento

Jorge Pomares Baeza
Fernando Torres Medina

Grupo de Automática, Robótica y Visión Artificial

Indice

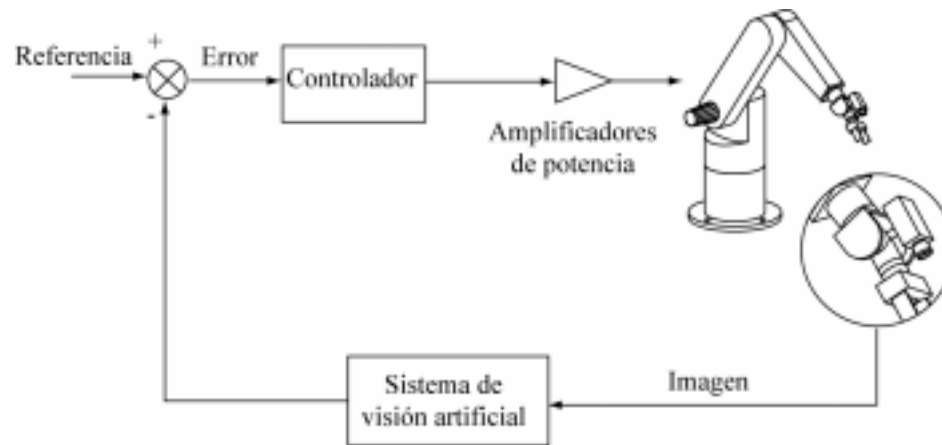


- ▲ Trabajos anteriores.
- ▲ Problema a resolver.
- ▲ Control Visual Basado en Imagen.
- ▲ Seguimiento de trayectorias empleando control visual.
- ▲ Control visual 2D basado en flujo de movimiento.
 - Generación del flujo de movimiento.
 - Control visual 2D basado en flujo de movimiento.
 - Resultados.
- ▲ Fusión Control Visual-Fuerza.

Trabajos anteriores



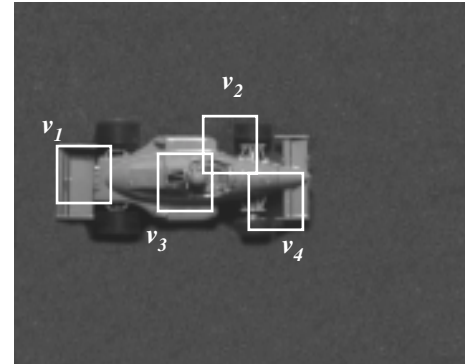
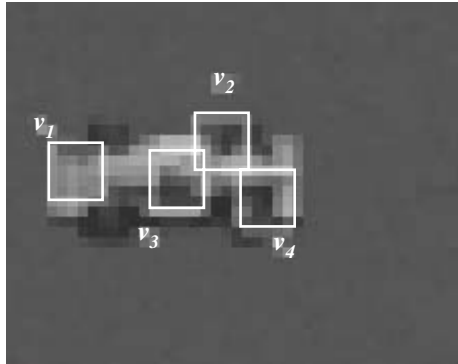
Control visual directo:



Trabajos anteriores



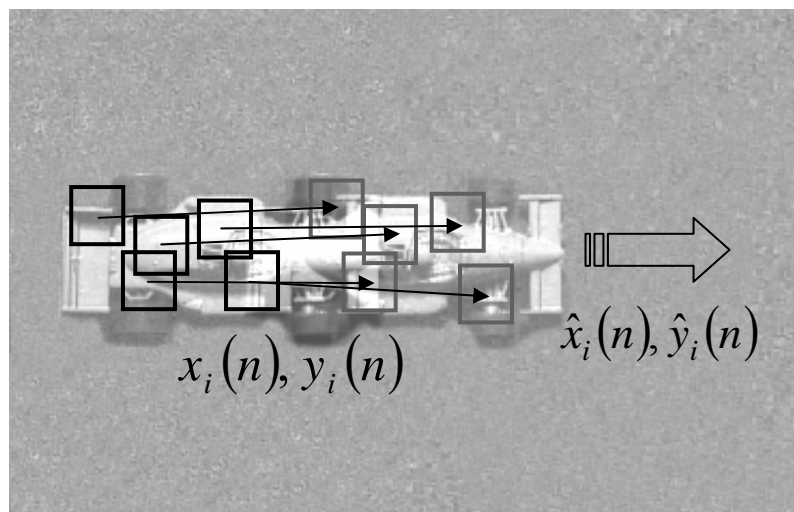
- Control visual directo:
 - Aplicación al seguimiento de objetos.



Trabajos anteriores



- ▲ Control visual directo.
- ▲ Control visual basado en imagen:
 - Predicción de movimiento.



Trabajos anteriores



- ▲ Control visual directo.
- ▲ Control visual basado en imagen:
 - Predicción de movimiento.
 - Aplicación a un sistema "eye-in-hand".

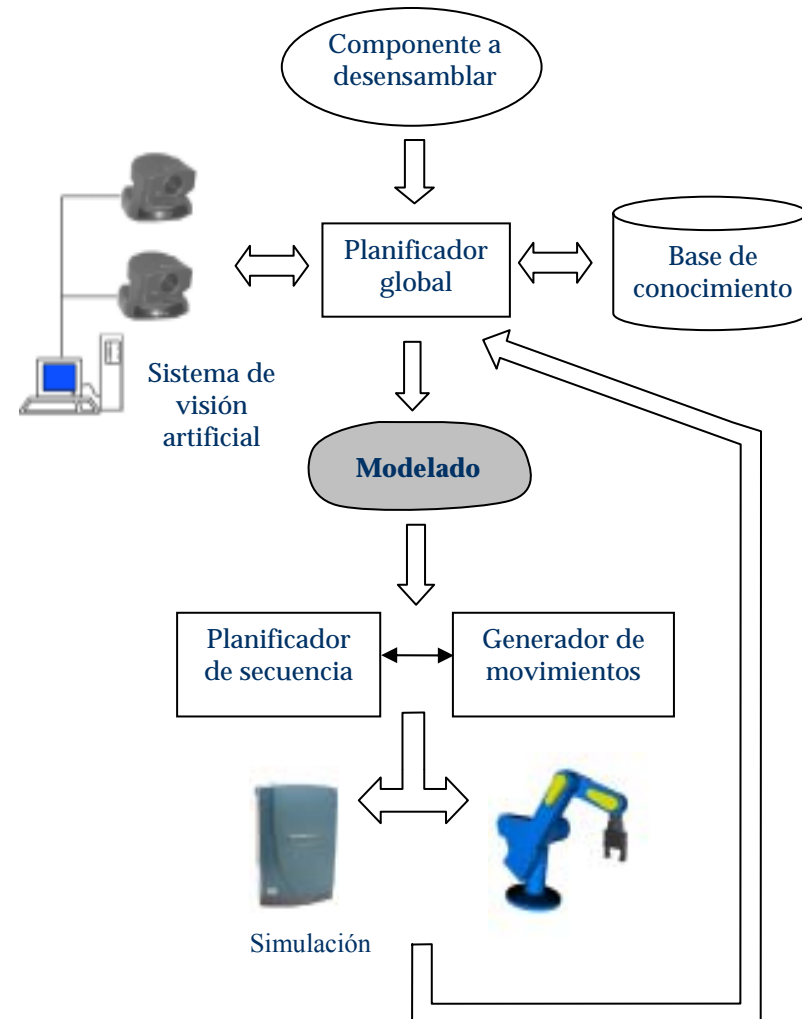


Problema a resolver



Desensamblado automático:

- Base de conocimiento.
- Modelado del entorno.
- Generación de movimientos.



Problema a resolver



Desensamblado automático:

- Base de conocimiento.
- Modelado del entorno.
- Generación de movimientos.



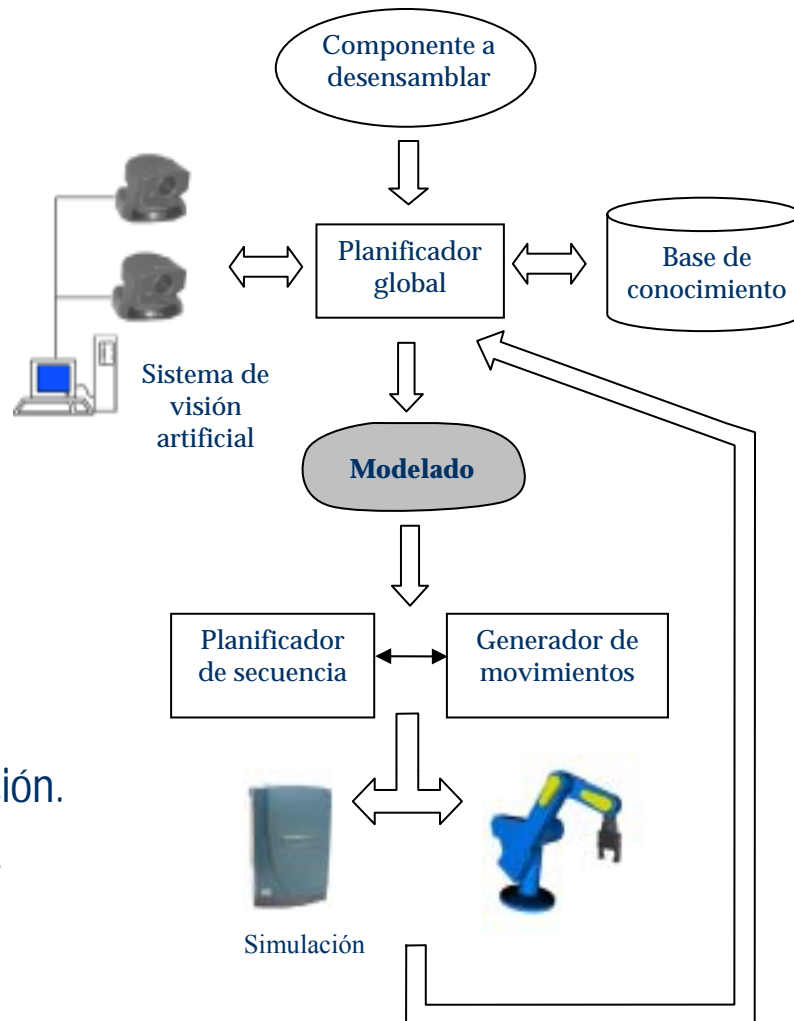
Trayectorias a priori.



Control de trayectorias
Visión artificial.

Control de la interacción.
Control de fuerza.

Fusión

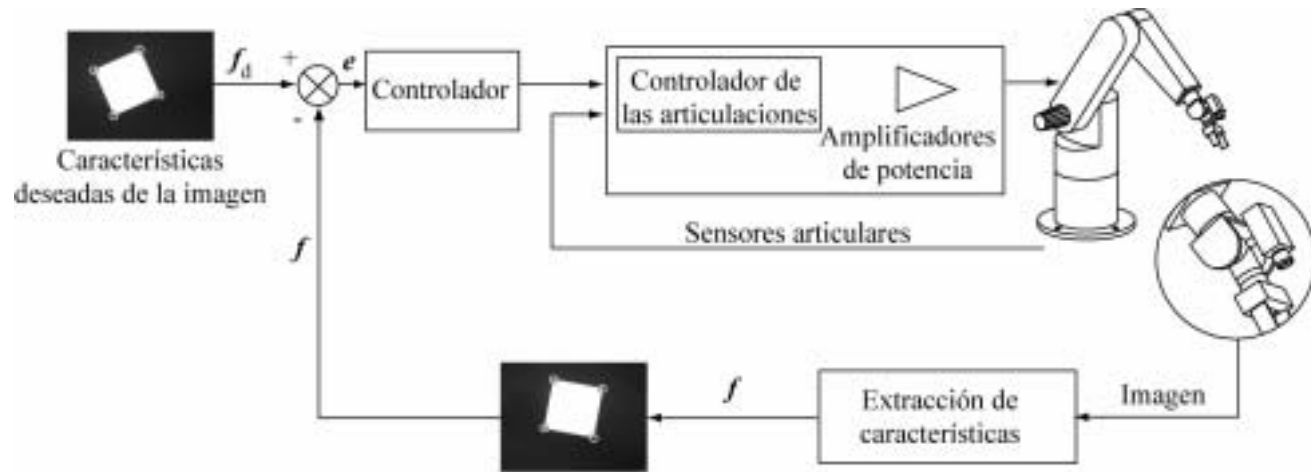


Control visual basado en imagen



Control visual basado en imagen:

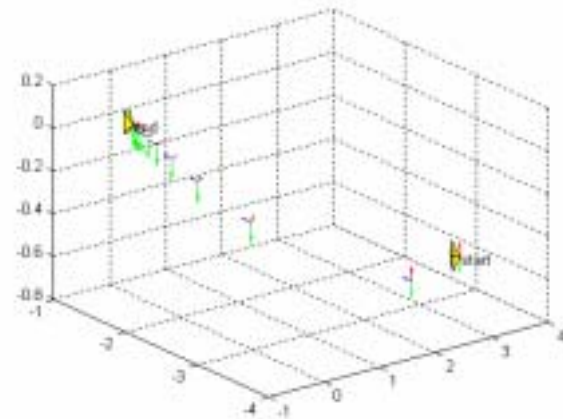
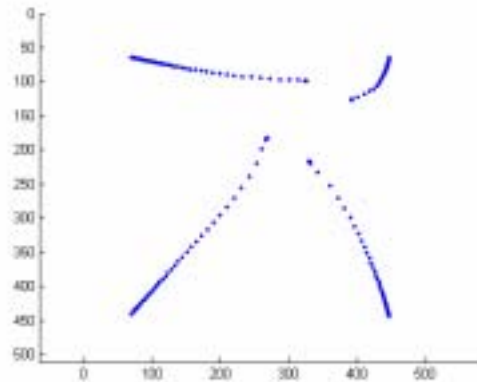
- La información visual es utilizada directamente para estimar el movimiento del robot.
- No requiere "interpretar" la imagen.
- Robustez frente a errores de modelado.



Control visual basado en imagen



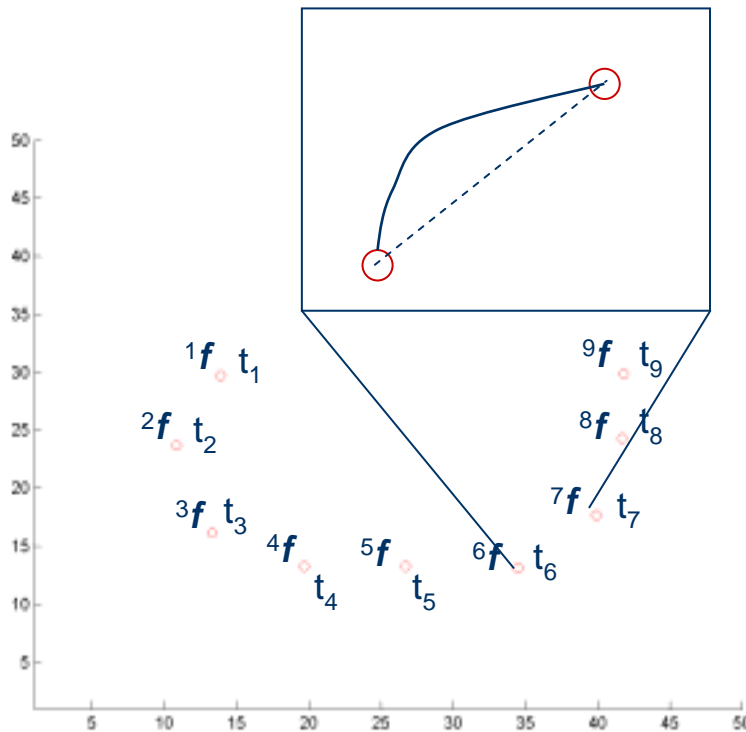
- ▲ Control visual basado en imagen:
 - Empleado en aplicaciones punto a punto.
 - Buen comportamiento cuando las características actuales y las deseadas se encuentran cercanas .
 - No es posible especificar la trayectoria del robot en el espacio 3D.



Seguimiento de Trayectorias



▲ Seguimiento de Trayectorias dependientes del tiempo.



- Definición de $f_d(t)$.
- f_d y t_f deben estar lo "suficientemente cerca".
- Mantener las restricciones temporales es excesivamente restrictivo.
 - No garantiza buen seguimiento.
 - Puede no seguir la trayectoria a costa de mantener las restricciones temporales.



▲ Propiedades:

- La tarea se especifica en el espacio de configuraciones de la imagen.
- Codificación independiente del tiempo.
- Permite controlar la trayectoria durante la tarea.
- Precisión y velocidad de seguimiento ajustable.
- Aprovecha el buen comportamiento de los c.v. 2D cuando las características deseadas se encuentran cercanas.
- Extensión a trayectorias respecto a objetos en movimiento.

C.V. 2D basado Flujo Movimiento



- Generación del flujo de movimiento.
 - 1. Obtención de la Trayectoria deseada en la imagen

Trayectoria 3D deseada



Muestras en el espacio cartesiano 3D

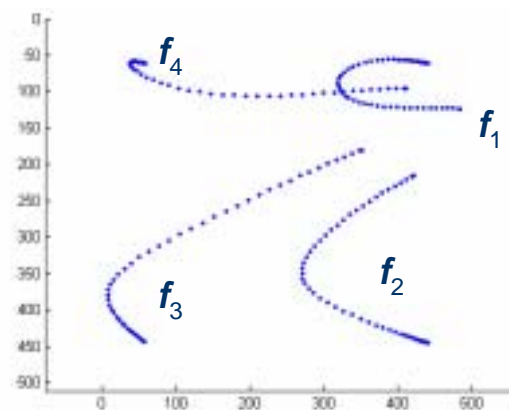
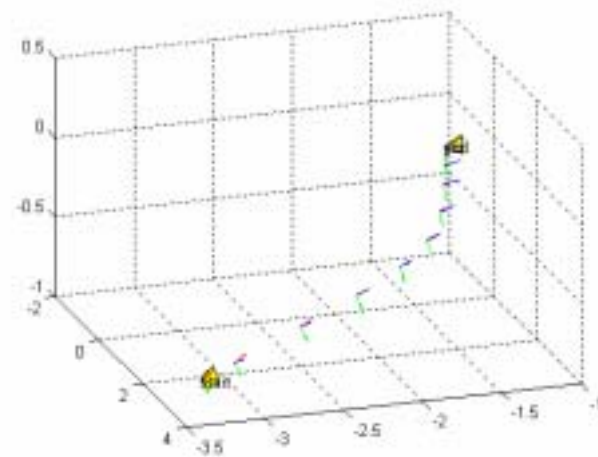
Proyección

Características deseada en la imagen, $k f_i$



Evolución deseada en la imagen, $f_{di}(\tau)$

$$f_d: \Gamma \rightarrow \mathfrak{S}$$



C.V. 2D basado Flujo Movimiento



Generación del flujo de movimiento.

- 2. Definición $\Phi: \mathfrak{S} \rightarrow T\mathfrak{S}$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{f}, \tau) &= (E_x, E_y) \\ E_x &= (f_x(\tau) - f_{xd}(\tau)) \\ E_y &= (f_y(\tau) - f_{yd}(\tau)) \end{aligned}$$



$$\mathbf{U}: \mathfrak{R}_n \rightarrow \mathfrak{R}$$

Flujo de
movimiento

$$\Phi = G_1(\mathbf{f}) \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial f_{xd}(\tau)}{\partial \tau} \\ \frac{\partial f_{yd}(\tau)}{\partial \tau} \\ 1 \end{pmatrix} - G_2(\mathbf{f}) \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial f_x} \\ \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial f_y} \\ 1 \end{pmatrix}$$

C.V. 2D basado Flujo Movimiento




Generación del flujo de movimiento.

2. Definición

- Si f evoluciona en la dirección $\dot{f}_d(\tau) \rightarrow E$ no varía.
- Al aplicar el campo de velocidad se cumple que: $\dot{f} = \beta \cdot \Phi$
- Evolución del error, E :

$$\dot{E} = -\beta \cdot G_2(f) \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial U}{\partial f_x} \\ \frac{\partial U}{\partial f_y} \end{pmatrix}$$



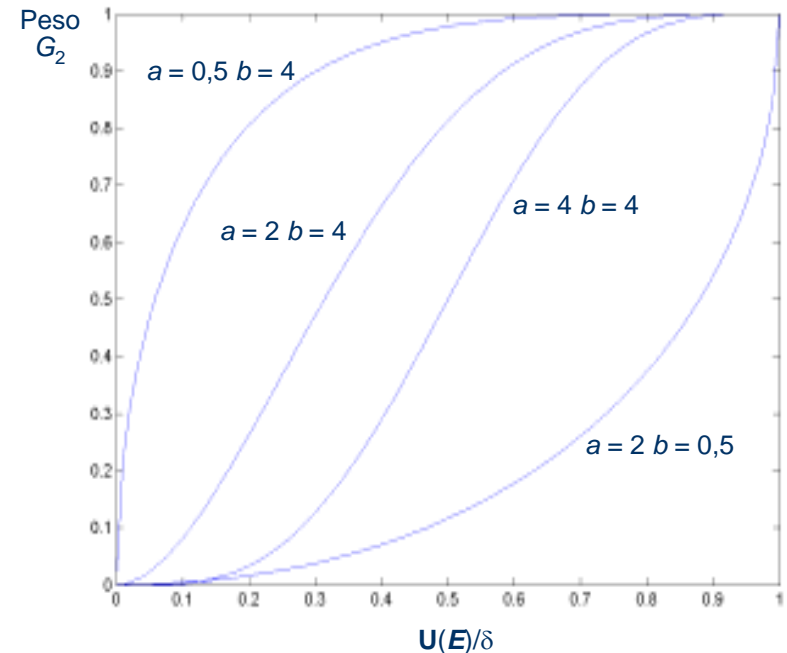
Convergencia cuando $E_x = E_y = 0$  $f \rightarrow f_d$

C.V. 2D basado Flujo Movimiento



Generación del flujo de movimiento.

- 3. Funciones G_1 y G_2 .
 - G_1 controla la velocidad de progresión de la trayectoria deseada en la imagen.
 - G_2 controla la "influencia" del gradiente sobre la trayectoria



$$G_1(\mathbf{f}, a, b) = 1 - \frac{1}{v(\mathbf{U}(\mathbf{E}(\mathbf{f}, \tau)) / \delta, a, b)} \int_0^{\mathbf{U}(\mathbf{E}(\mathbf{f}, \tau)) / \delta} t^{a-1} (1-t)^{b-1} dt$$

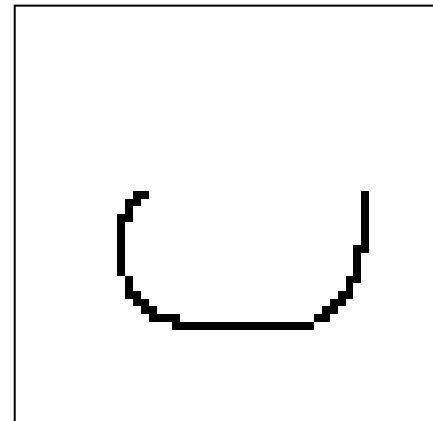
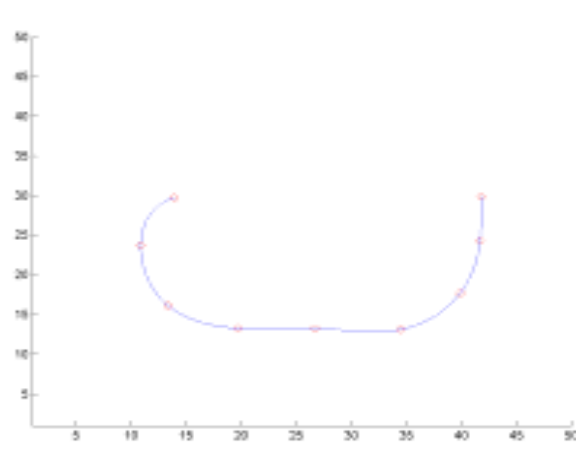
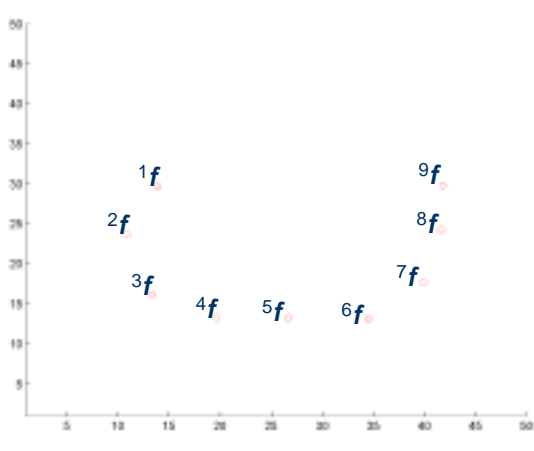
$$G_2(\mathbf{f}, a, b) = \frac{1}{v(\mathbf{U}(\mathbf{E}(\mathbf{f}, \tau)) / \delta, a, b)} \int_0^{\mathbf{U}(\mathbf{E}(\mathbf{f}, \tau)) / \delta} t^{a-1} (1-t)^{b-1} dt$$

Si $\mathbf{U}(\mathbf{E}(\mathbf{f}, \tau)) > \delta \rightarrow G_1 = 0$

C.V. 2D basado Flujo Movimiento

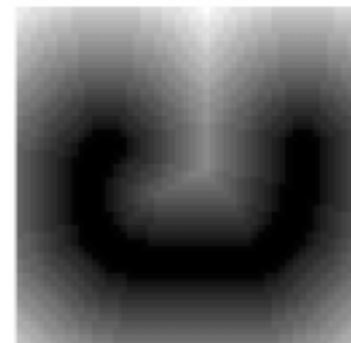
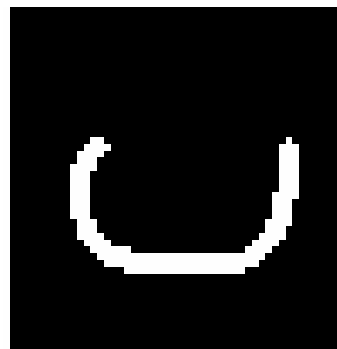
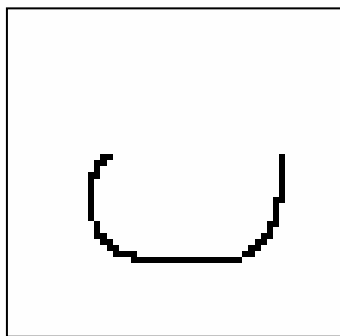


- Generación del flujo de movimiento.
 - 4. Función de Potencial, $U(E)$.
 - Ejemplo:





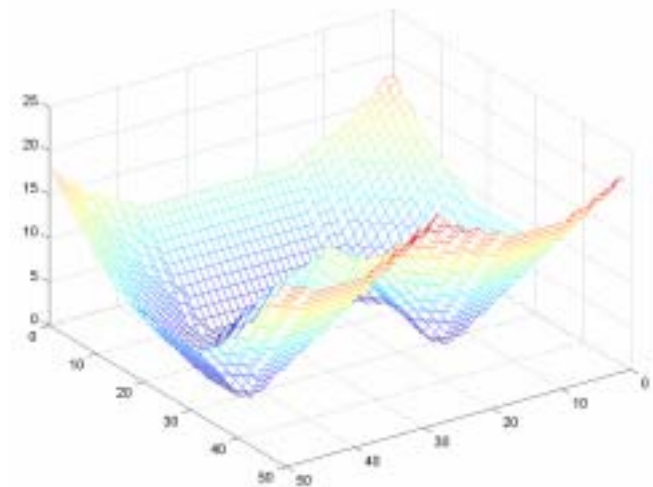
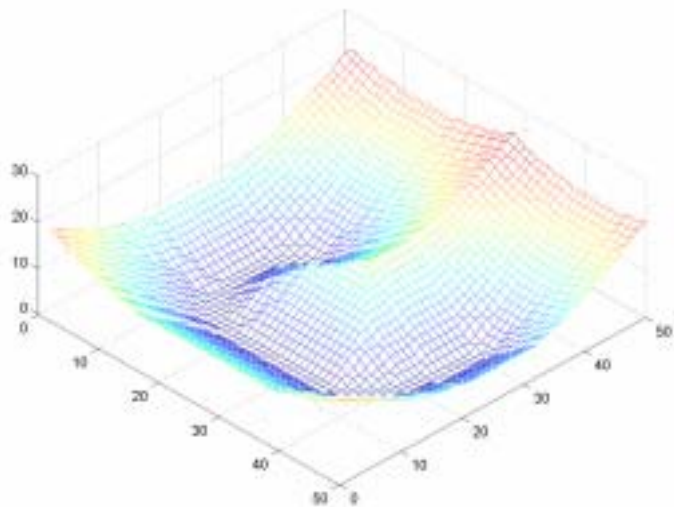
- ▲ Generación del flujo de movimiento.
 - 4. Función de Potencial, $U(E)$.
 - Ejemplo:



C.V. 2D basado Flujo Movimiento



- ▲ Generación del flujo de movimiento.
 - 4. Función de Potencial, $U(E)$.
 - Ejemplo:

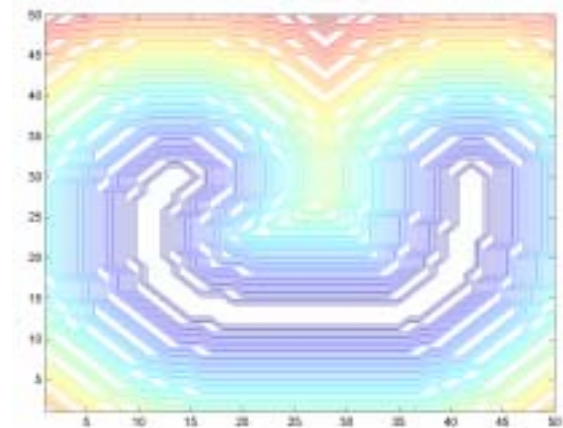
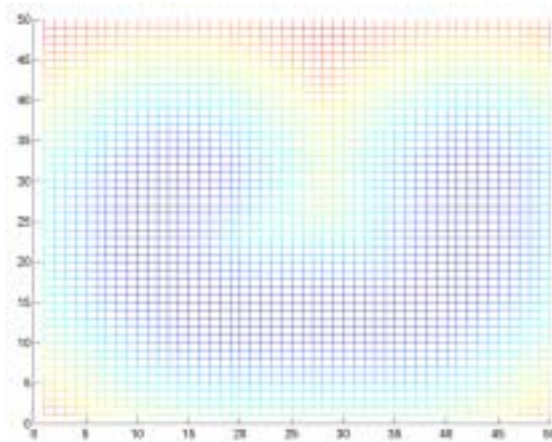


Mapa de distancias

C.V. 2D basado Flujo Movimiento



- ▲ Generación del flujo de movimiento.
 - 4. Función de Potencial, $U(E)$.
 - Ejemplo:

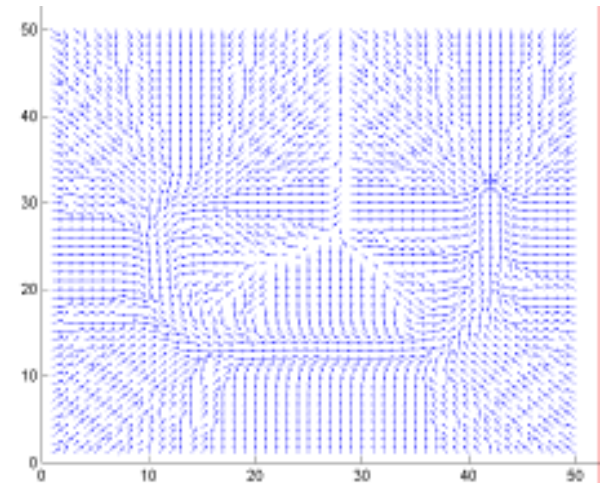
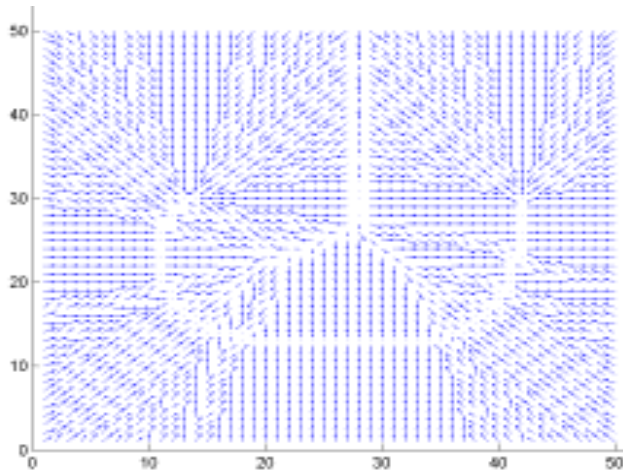


Potencial, U

C.V. 2D basado Flujo Movimiento



- ▲ Generación del flujo de movimiento.
 - 5. Gradiente y flujo de movimiento.
 - Ejemplo:



$$-\nabla U = -\frac{\partial U}{\partial f_x} \vec{i} - \frac{\partial U}{\partial f_y} \vec{j}$$

Flujo de movimiento

$$\delta = 5$$



C.V. 2D basado Flujo Movimiento



- Se pretende determinar la acción de control de forma que se anule progresivamente la siguiente función de error (función de tarea):

$$\mathbf{e}(\mathbf{r}, \tau) = \hat{\mathbf{J}}_f^+ (\mathbf{f}(\mathbf{r}, \tau) - \mathbf{f}_d(\tau))$$

- A partir de la definición de función de tarea ($\tau=t$): $\dot{\mathbf{e}} = \left(\frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \mathbf{r}} \right) \mathbf{v}^c + \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t}$

$$\dot{\mathbf{E}} = -\beta \cdot G_2(\mathbf{f}) \cdot \left\{ \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial f_x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial f_y} \right)^2 \right\} \leq 0 \quad \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \mathbf{r}} = -\hat{\mathbf{J}}_f^+ \cdot \left(\beta \cdot G_2(\mathbf{f}) \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial E_i} \right) \cdot \frac{\mathbf{J}_f}{\beta \cdot \Phi} \leq 0$$

- Se desea que el error decrezca de manera exponencial: $\dot{\mathbf{e}} = -\mathbf{k} \cdot \mathbf{e}$

- Con lo que se obtiene la siguiente expresión para la velocidad de la cámara:

$$\mathbf{v}^c = \left(\frac{\partial \hat{\mathbf{e}}}{\partial \mathbf{r}} \right)^+ \left(-\mathbf{k}\mathbf{e} - \frac{\partial \hat{\mathbf{e}}}{\partial t} \right) \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \hat{\mathbf{e}}}{\partial \mathbf{r}} = -\hat{\mathbf{J}}_f^+ \cdot \left(G_2(\mathbf{f}) \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{f}} \right) \cdot \frac{\hat{\mathbf{J}}_f}{\Phi} \leq 0 \\ \frac{\partial \hat{\mathbf{e}}}{\partial t} \text{ es una estimación del movimiento del objeto en la imagen} \end{array} \right.$$

C.V. 2D basado Flujo Movimiento



- ▶ A partir de la velocidad aplicada:

$$\mathbf{v}^c = \left(\frac{\partial \hat{\mathbf{e}}}{\partial \mathbf{r}} \right)^+ \left(-\mathbf{k}\mathbf{e} - \frac{\partial \hat{\mathbf{e}}}{\partial t} \right)$$

- ▶ El comportamiento de la función de tarea vendrá dado por:

$$\dot{\mathbf{e}} = \left(\frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \mathbf{r}} \right) \left(\frac{\partial \hat{\mathbf{e}}}{\partial \mathbf{r}} \right)^+ \left(-\mathbf{k}\mathbf{e} - \frac{\partial \hat{\mathbf{e}}}{\partial t} \right) + \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t}$$

- ▶ Para asegurarse el decrecimiento de la función de error deberá cumplirse:

$$\left(\frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \mathbf{r}} \right) \left(\frac{\partial \hat{\mathbf{e}}}{\partial \mathbf{r}} \right)^+ \geq 0$$
$$\leq 0 \qquad \leq 0$$

C.V. 2D basado Flujo Movimiento



- Comportamiento de la función de tarea:

$$\dot{\mathbf{e}} = \left(\frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \mathbf{r}} \right) \left(\frac{\partial \hat{\mathbf{e}}}{\partial \mathbf{r}} \right)^+ \left(-\mathbf{k}\mathbf{e} - \frac{\partial \hat{\mathbf{e}}}{\partial t} \right) + \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t}$$

Estimación basada en Filtros de Kalman

- Función de potencial modificada: $\mathbf{U}_m(\mathbf{f}, \dot{\mathbf{f}}) = \eta_a \|\mathbf{f}_d(\tau) - \mathbf{f}(\tau)\|^a + \eta_b \|\dot{\mathbf{f}}_d(\tau) - \dot{\mathbf{f}}(\tau)\|^b$

$$\mathbf{V}_m(\mathbf{f}, \dot{\mathbf{f}}) = -\nabla_{\mathbf{f}} \mathbf{U}_m(\mathbf{f}, \dot{\mathbf{f}}) - \nabla_{\dot{\mathbf{f}}} \mathbf{U}_m(\mathbf{f}, \dot{\mathbf{f}}) \quad \left\{ \begin{array}{l} \nabla_{\mathbf{f}} \mathbf{U}_m(\mathbf{f}, \dot{\mathbf{f}}) = \frac{\partial \mathbf{U}_m(\mathbf{f}, \dot{\mathbf{f}})}{\partial \mathbf{f}} \\ \nabla_{\dot{\mathbf{f}}} \mathbf{U}_m(\mathbf{f}, \dot{\mathbf{f}}) = \frac{\partial \mathbf{U}_m(\mathbf{f}, \dot{\mathbf{f}})}{\partial \dot{\mathbf{f}}} \end{array} \right.$$

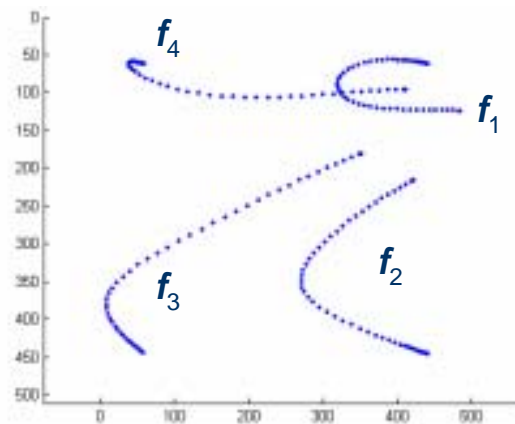
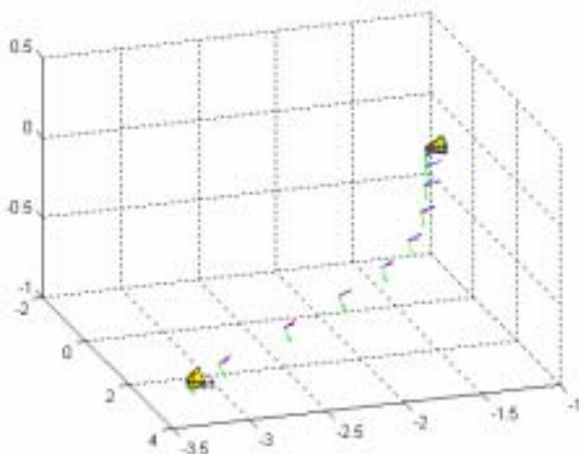
C.V. 2D basado Flujo Movimiento



Resultados. Simulación.

Visual Servoing Toolbox:

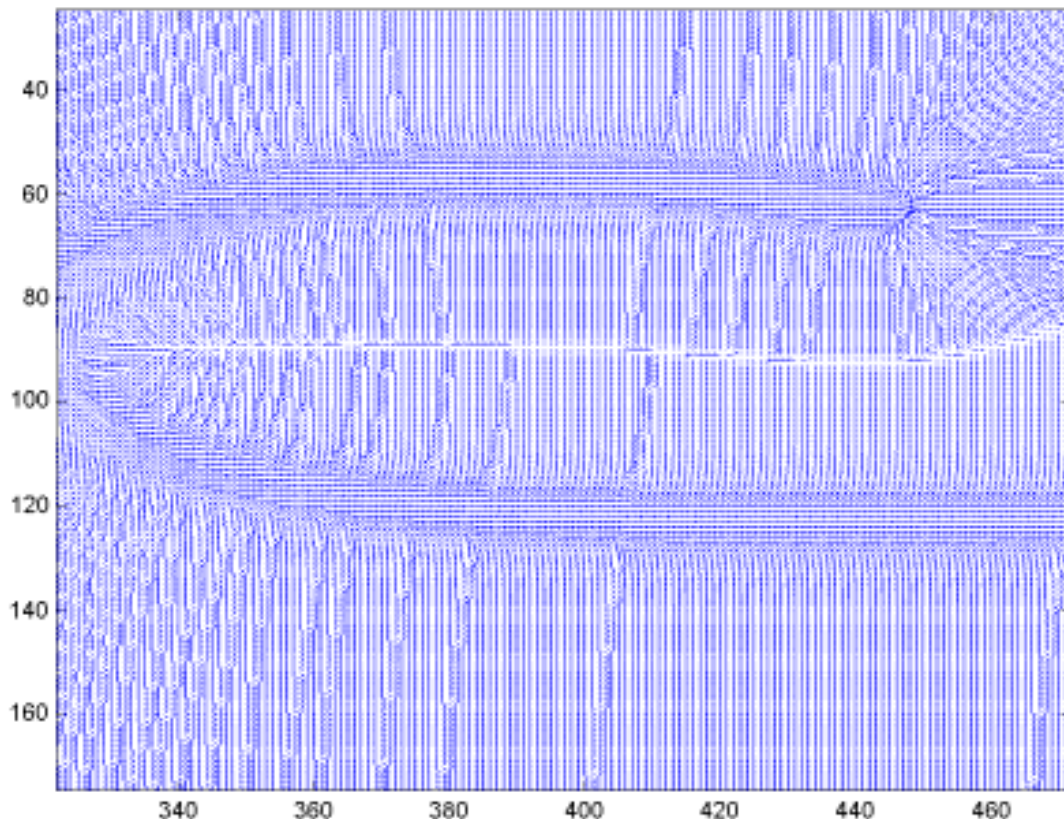
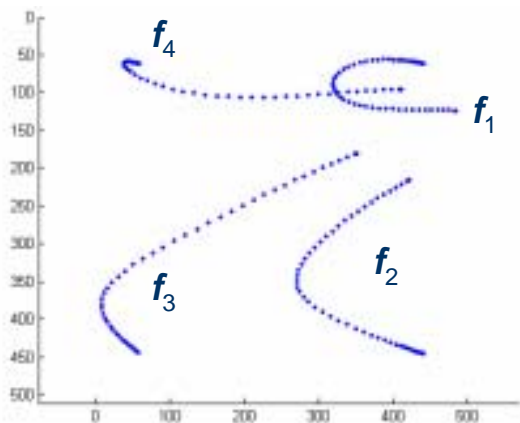
<http://sourceforge.net/projects/vstoolbox/>



C.V. 2D basado Flujo Movimiento



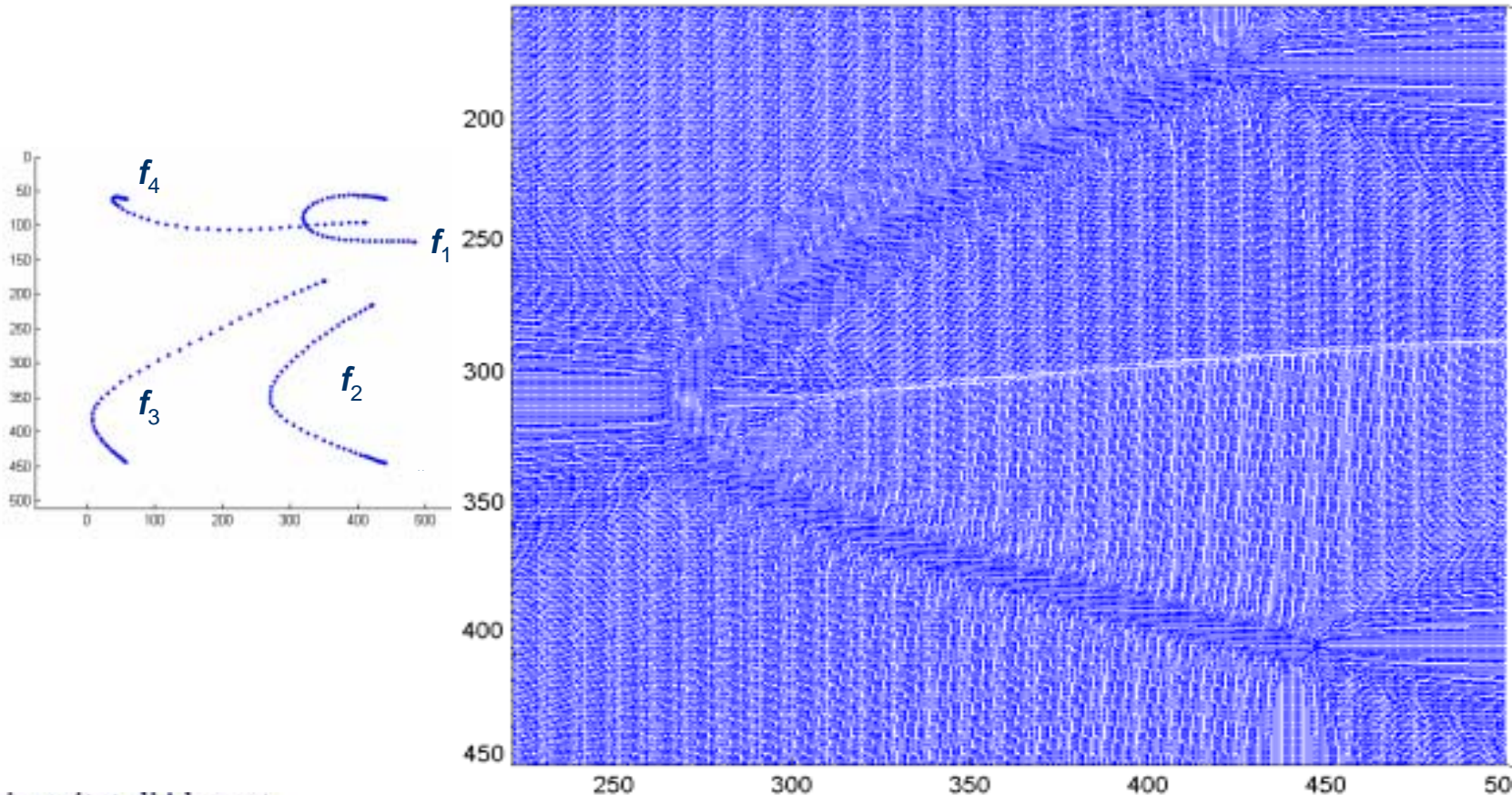
Resultados. Simulación.



C.V. 2D basado Flujo Movimiento



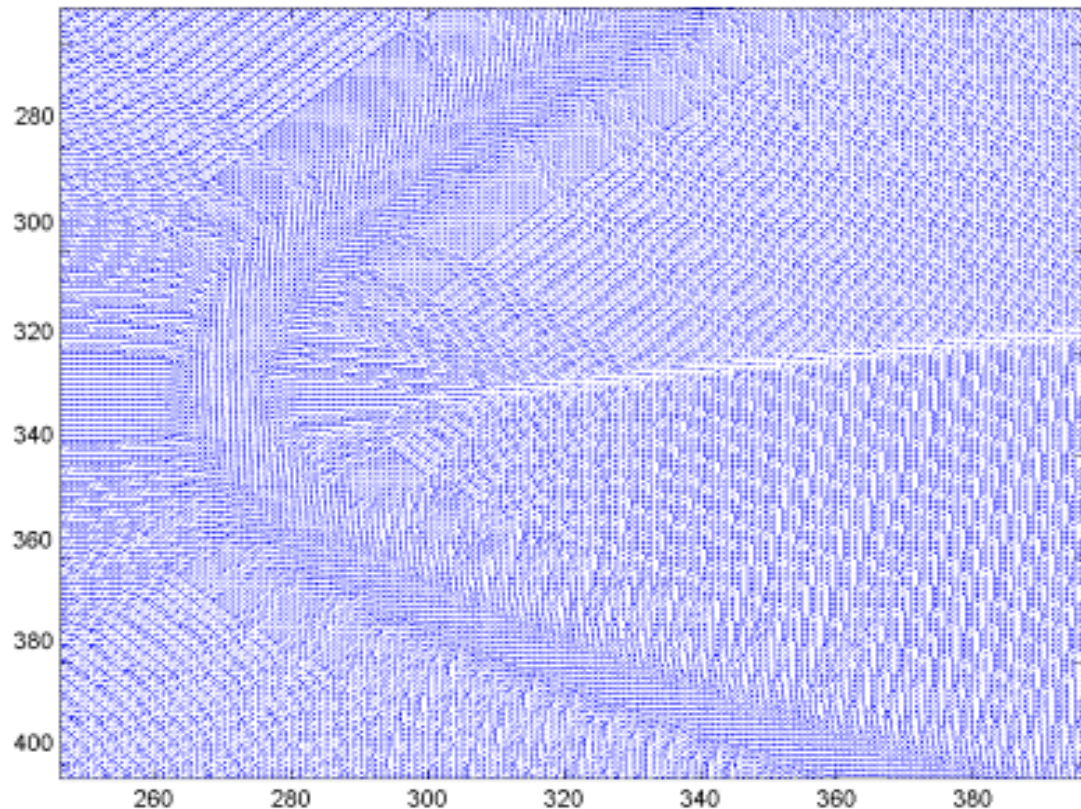
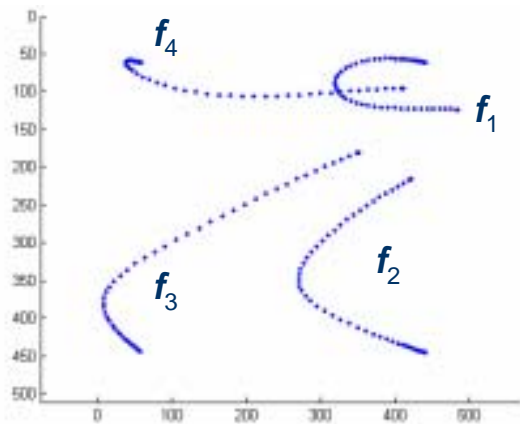
Resultados. Simulación.



C.V. 2D basado Flujo Movimiento



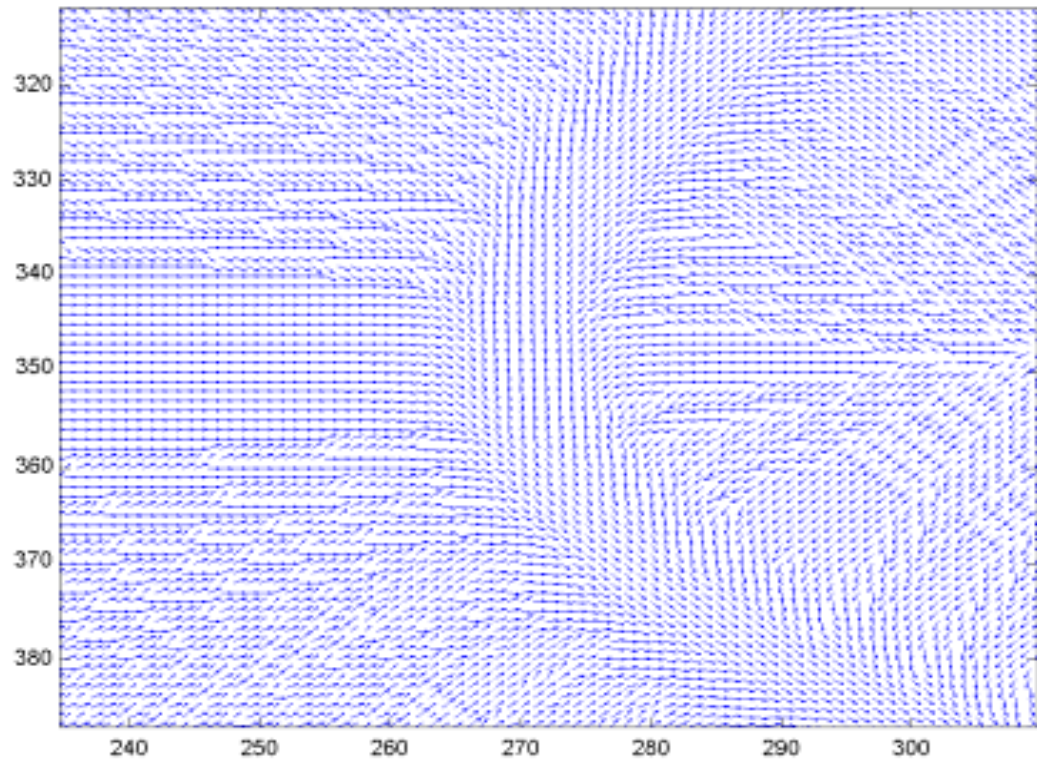
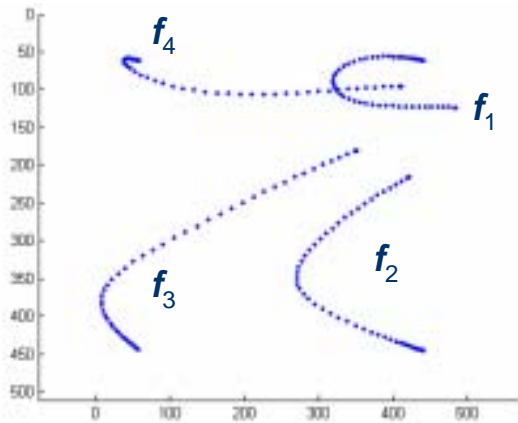
Resultados. Simulación.



C.V. 2D basado Flujo Movimiento



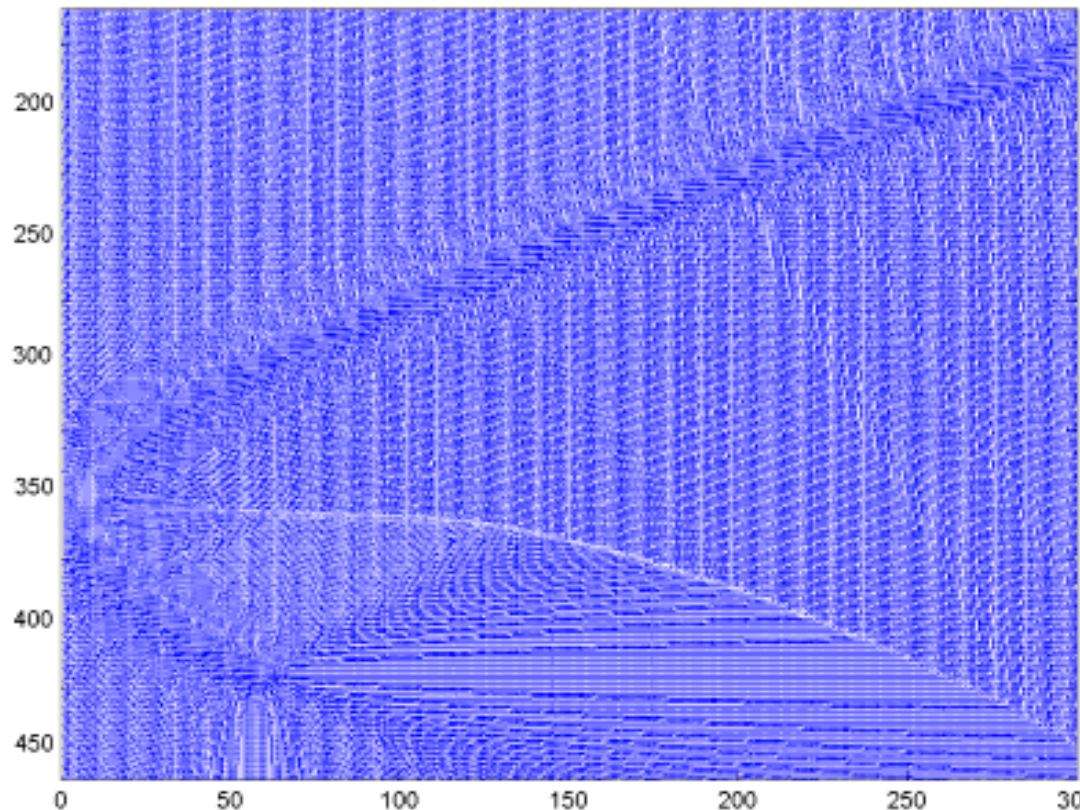
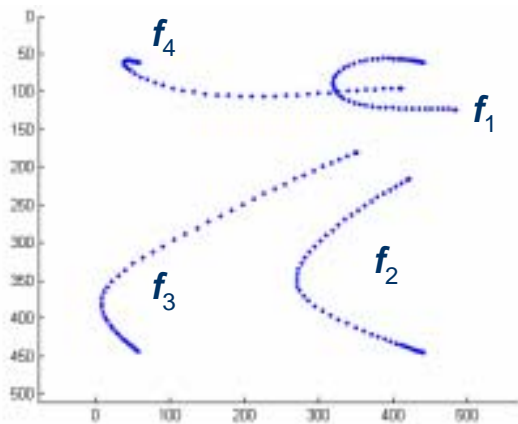
Resultados. Simulación.



C.V. 2D basado Flujo Movimiento



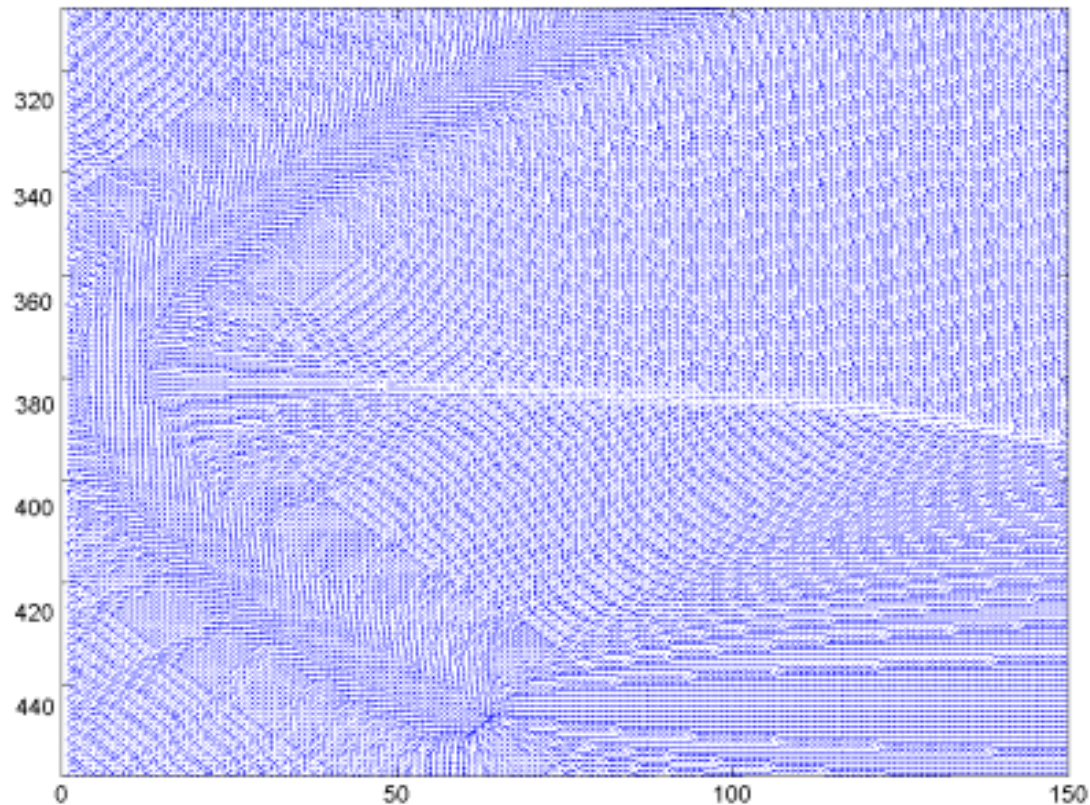
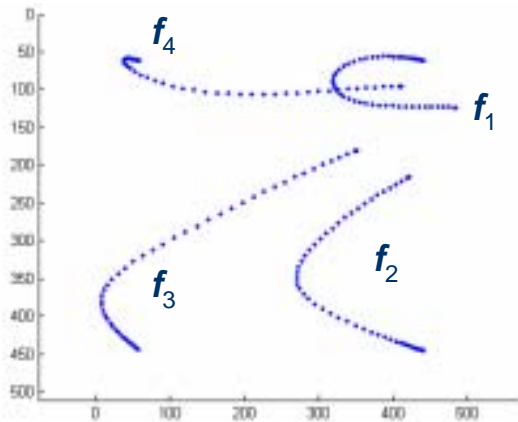
Resultados. Simulación.



C.V. 2D basado Flujo Movimiento



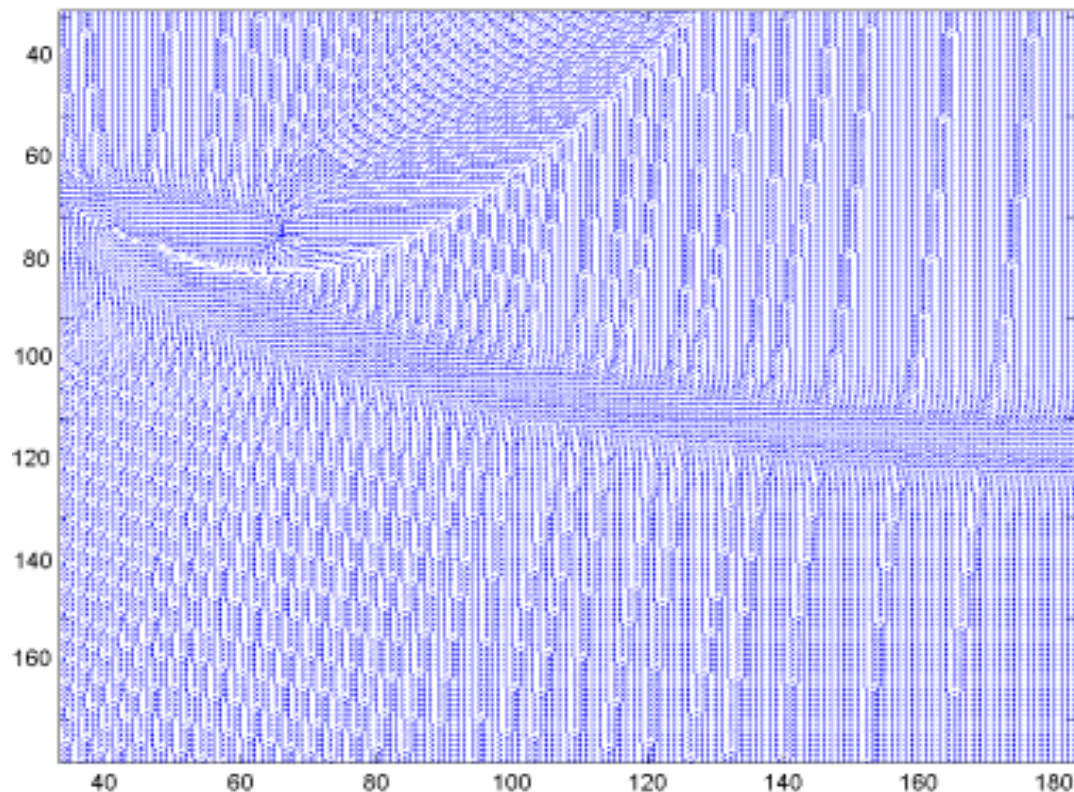
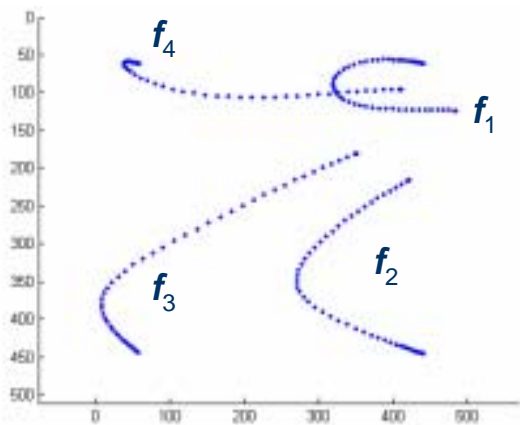
Resultados. Simulación.



C.V. 2D basado Flujo Movimiento



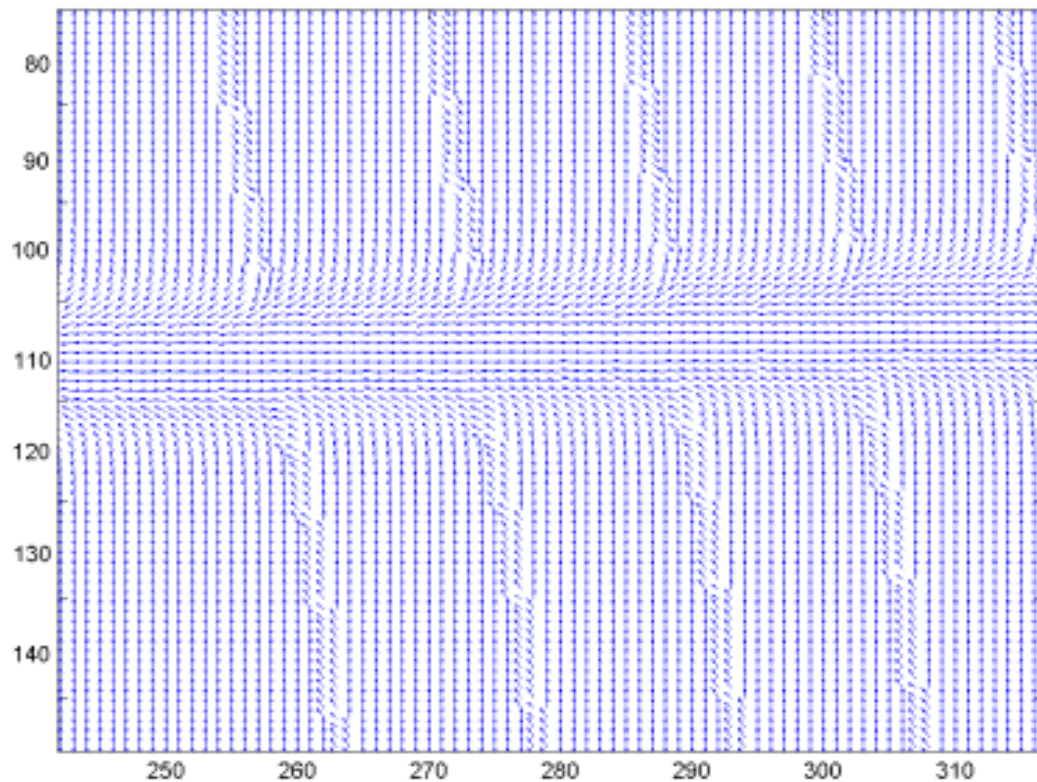
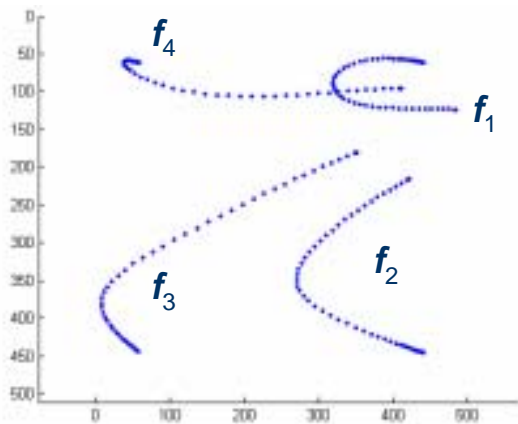
Resultados. Simulación.



C.V. 2D basado Flujo Movimiento



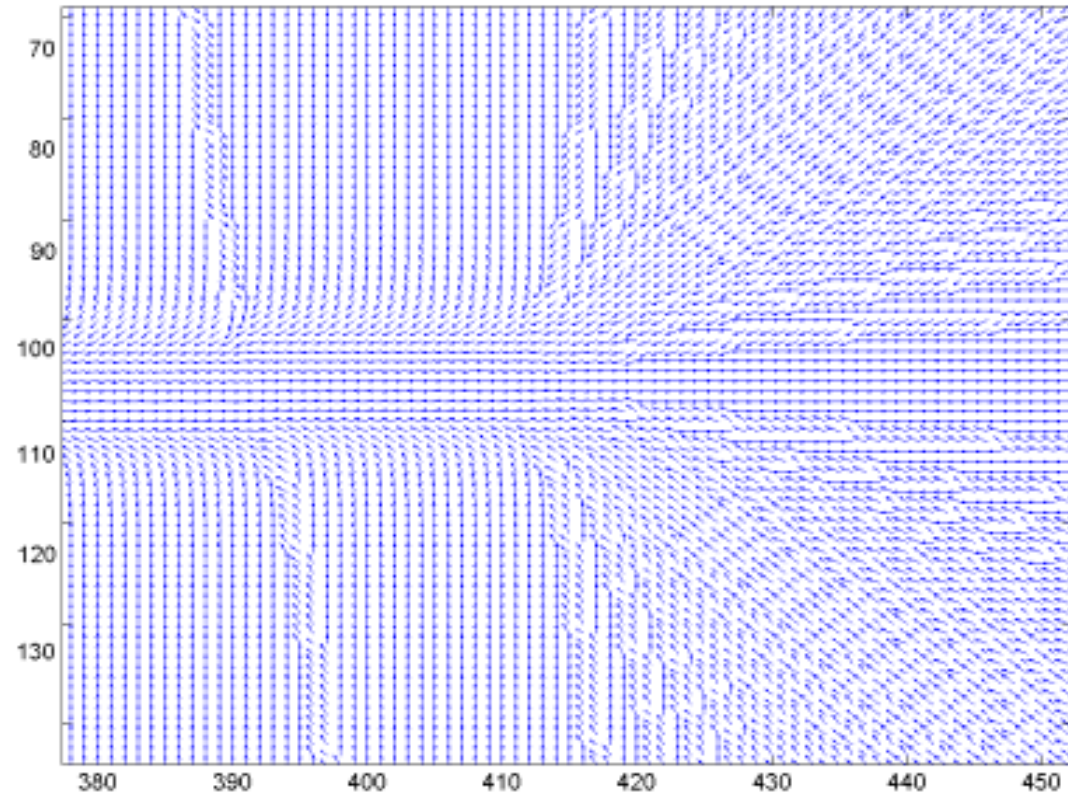
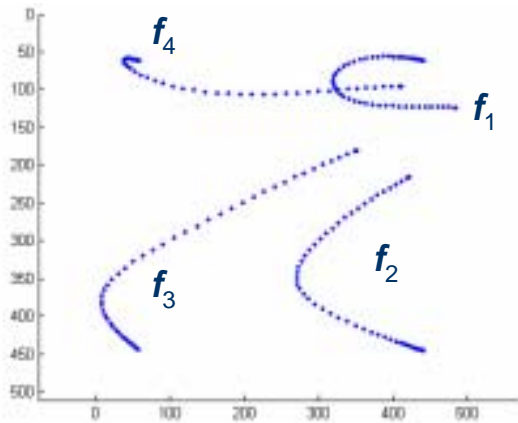
Resultados. Simulación.



C.V. 2D basado Flujo Movimiento



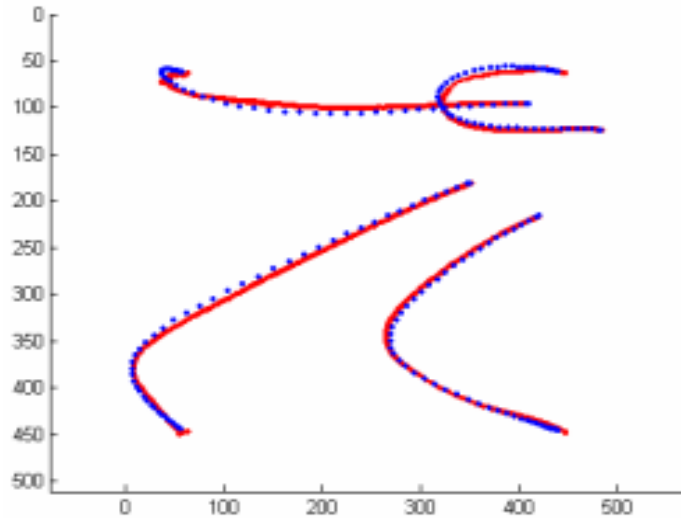
Resultados. Simulación.



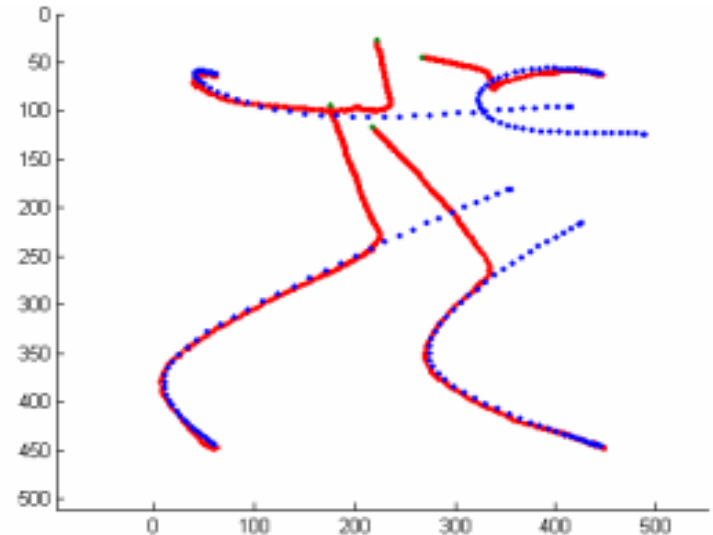
C.V. 2D basado Flujo Movimiento



Resultados. Simulación.



Puntos Iniciales en la trayectoria deseada.



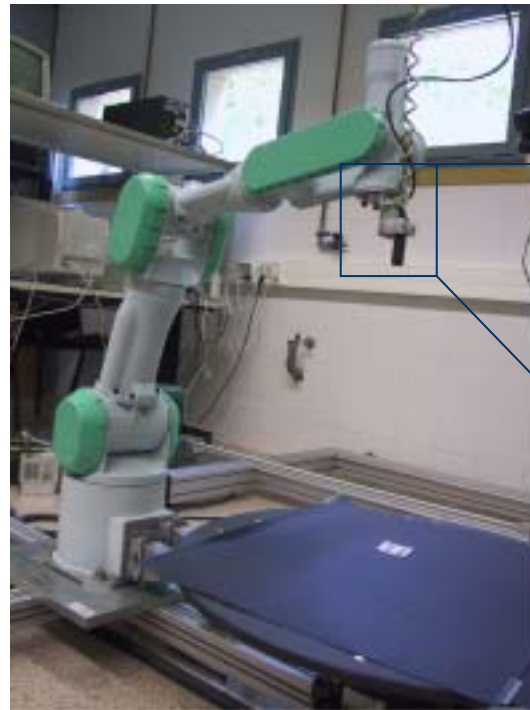
Puntos Iniciales fuera de la trayectoria deseada.

C.V. 2D basado Flujo Movimiento



- Resultados. Trayectoria real.
 - Entorno de pruebas.

Robot
Mitsubishi PA-10

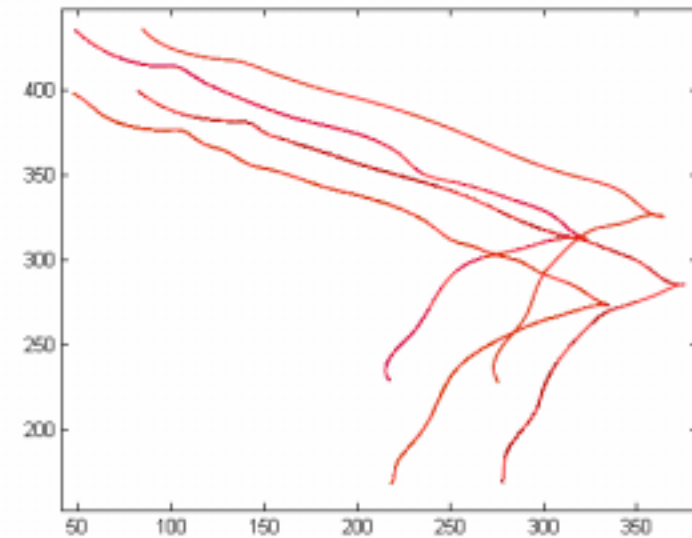
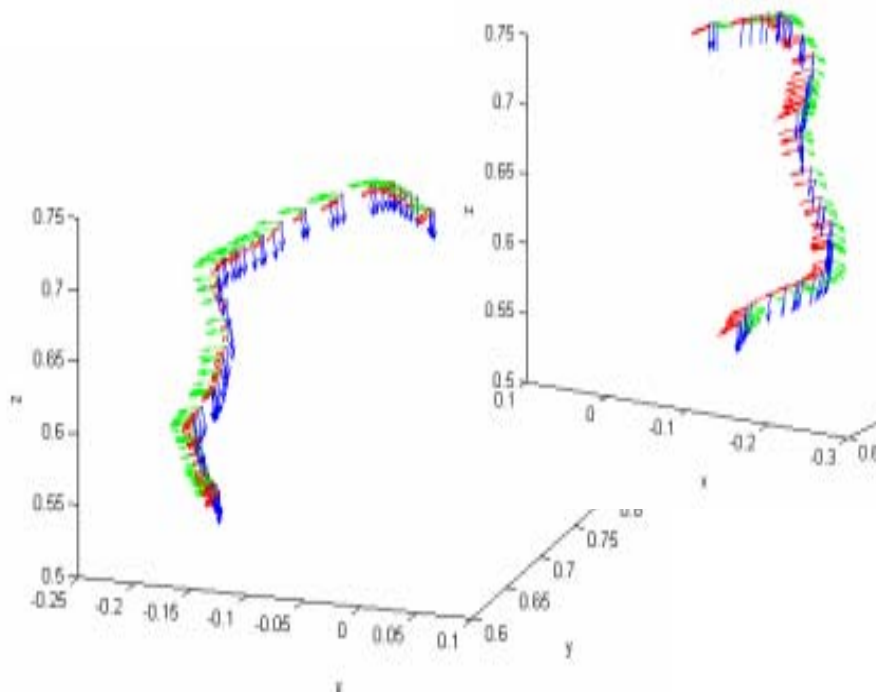


JAI CV-M536

C.V. 2D basado Flujo Movimiento



- Resultados. Trayectoria real.
 - Trayectoria 1.

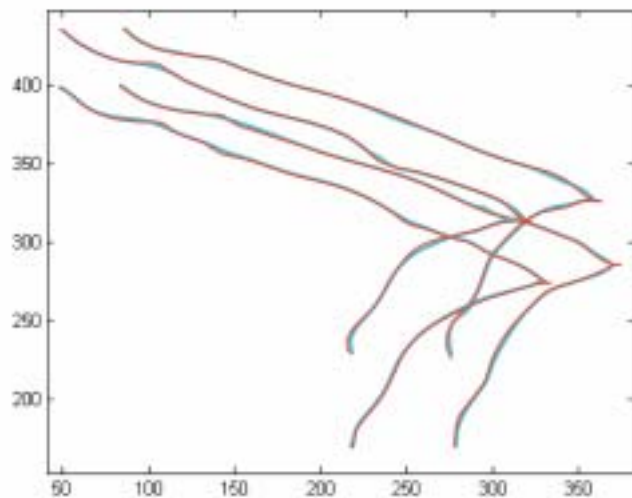


Trayectoria deseada
en la imagen

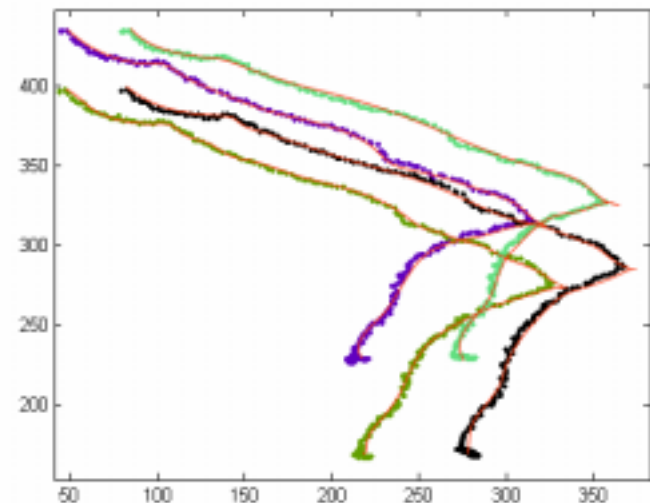
C.V. 2D basado Flujo Movimiento



- Resultados. Trayectoria real.
 - Trayectoria 1.



Simulación



Trayectoria real

C.V. 2D basado Flujo Movimiento



- ▶ Resultados. Trayectoria real.
 - Trayectoria 1.



C.V. 2D basado Flujo Movimiento



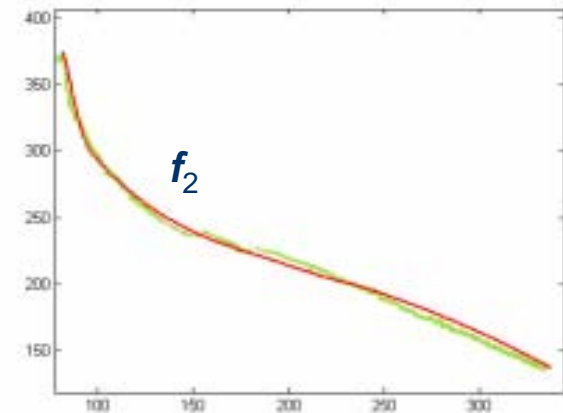
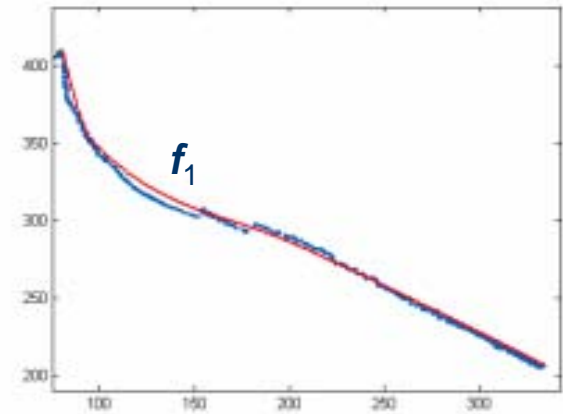
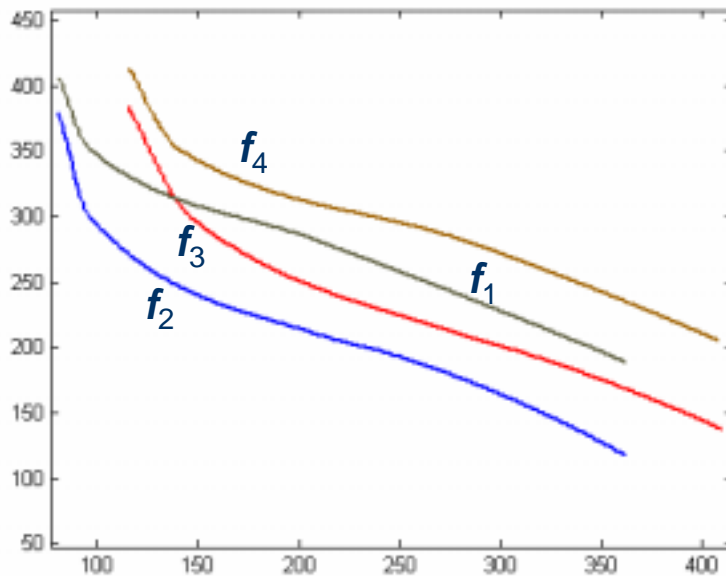
- ▶ Resultados. Trayectoria real.
 - Trayectoria 1. ($a=2$, $b=0,5$).



C.V. 2D basado Flujo Movimiento



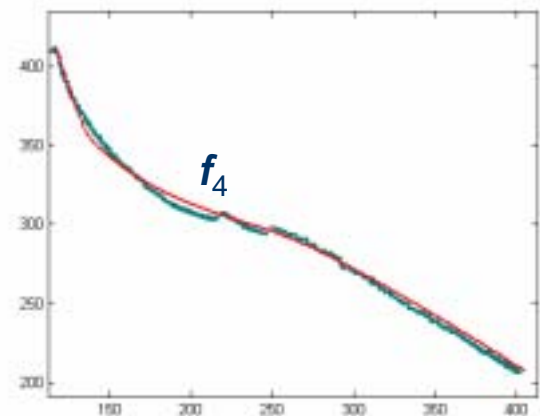
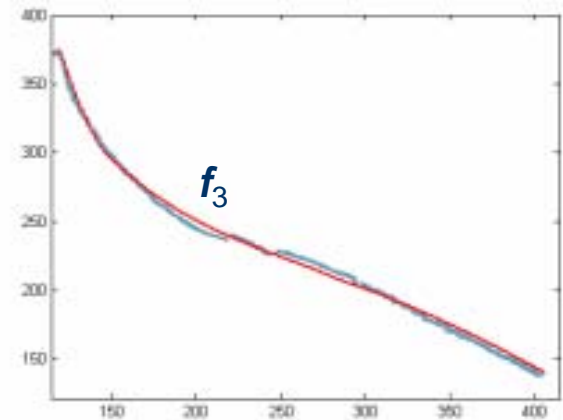
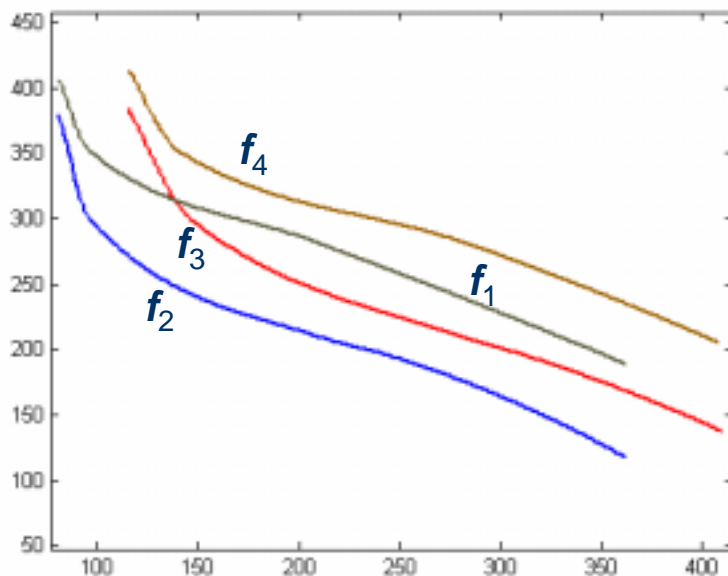
- Resultados. Trayectoria real.
 - Trayectoria 2.



C.V. 2D basado Flujo Movimiento



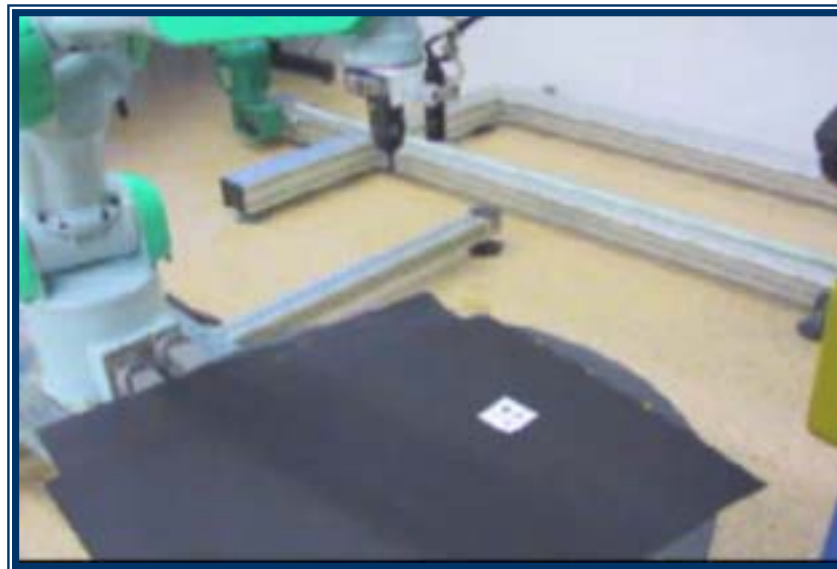
- Resultados. Trayectoria real.
 - Trayectoria 2.



C.V. 2D basado Flujo Movimiento



- ▶ Resultados. Trayectoria real.
 - Trayectoria 2.



Fusión control visual-fuerza



- ▲ Características de la información visual y fuerza:
 - Miden distintos fenómenos físicos pero complementarios.

Visión:

- Proporciona información global del entorno.
- No es adecuado para controlar la interacción del robot con el entorno.



Fuerza:

- Proporciona información acerca de la geometría del contacto.
- Control del movimiento determinando las fuerzas de contacto.



Fusión control visual-fuerza



- ▲ Características de la información visual y fuerza.
- ▲ Aproximaciones para control de movimiento utilizando visión y fuerza

Control híbrido:

- Divide el espacio de control en:
 - Direcciones controladas por fuerza.
 - Direcciones controladas por visión.
- Se especifica la tarea atendiendo a un conocimiento geométrico previo.

Control de impedancia:

- Especifica la relación dinámica entre fuerza y movimiento.

Fusión control visual-fuerza



- ▲ Características de la información visual y fuerza.
- ▲ Aproximaciones para control de movimiento utilizando visión y fuerza.
- ▲ Niveles en la integración de fuerza y visión:
 - ◆ Control alternado:
 - Una dirección es controlada alternativamente por visión y fuerza.
 - ◆ Control híbrido:
 - Control simultáneo de distintas direcciones por visión y fuerza.
 - ◆ Control compartido:
 - Control simultáneo de la misma dirección con visión y fuerza.

Fusión control visual-fuerza



- ◆ Se dispone de n sensores, de los cuales se obtiene una señal f_i .





Fusión control visual-fuerza

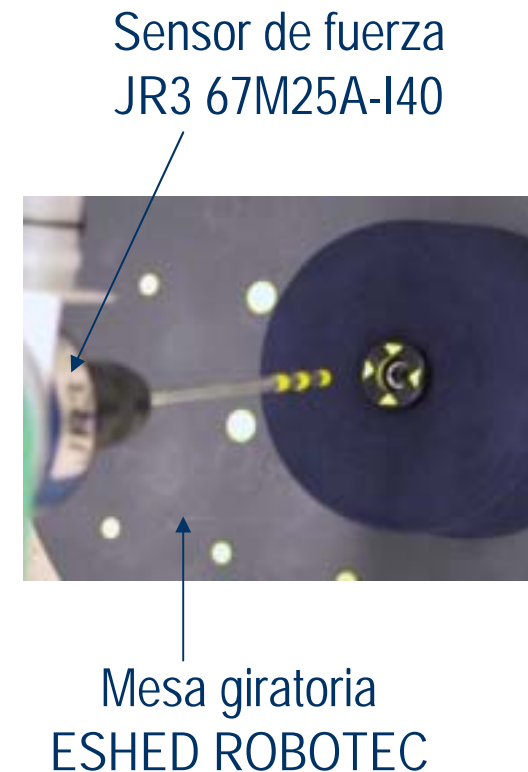
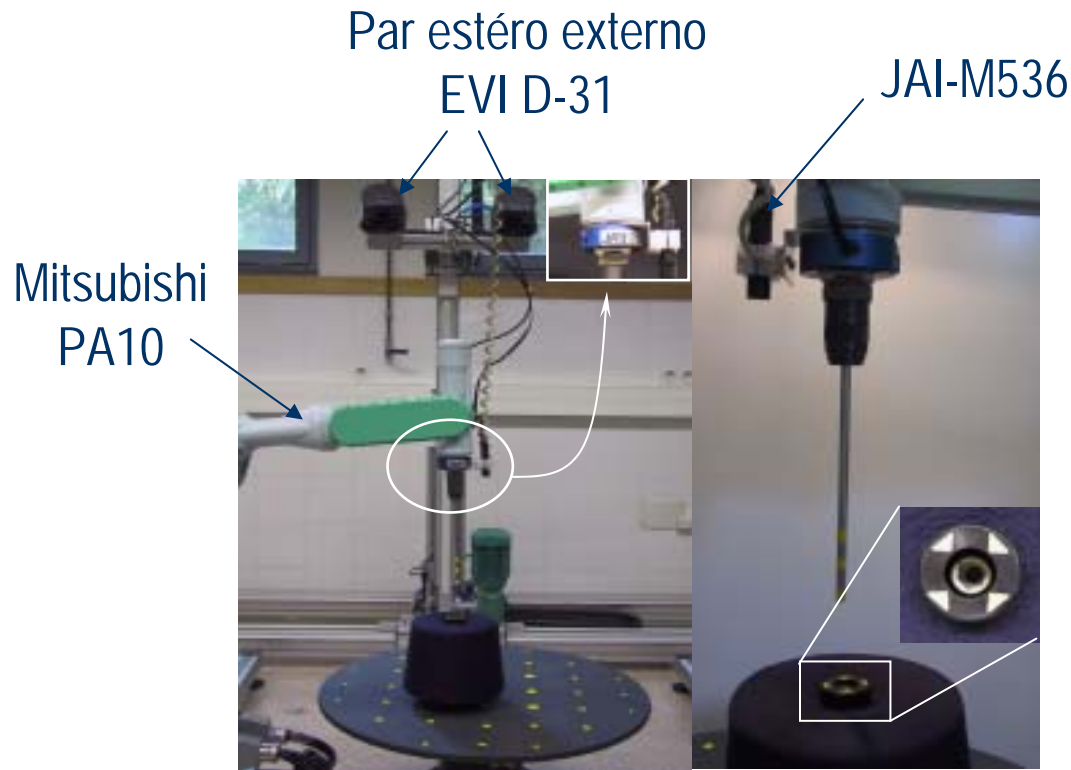
- Se dispone de n sensores, de los cuales se obtiene una señal f_i .
- A partir de la definición de matriz de interacción: $\dot{f} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{v}^E$
donde \mathbf{W} convierte las velocidades al sistema del extremo del robot.
- Se considera la función de error: $\mathbf{e} = \sum_{i=1}^n p_i \hat{\mathbf{W}}_i^{-1} \hat{\mathbf{L}}_i^+ (f_i - f_{id}) = [\hat{\mathbf{W}}\hat{\mathbf{L}}]^M (f - f_d)$
donde: $\sum_{i=1}^n p_i = 1$
- Considerando la función de tarea: $\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{C} \cdot \dot{f} \Rightarrow \dot{\mathbf{e}} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{L} \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{v}^E$
- Imponiendo un decaimiento exponencial de la función de error: $\dot{\mathbf{e}} = -\mathbf{k}\mathbf{e}$
- Comportamiento de la función de tarea:

$$\dot{\mathbf{e}} = -\mathbf{k} \underbrace{[\hat{\mathbf{W}}\hat{\mathbf{L}}]^M (\mathbf{L}\mathbf{W})}_{>0} \cdot \mathbf{e} \quad \Rightarrow \quad \sum_{i=1}^n p_i \hat{\mathbf{W}}_i^{-1} \hat{\mathbf{L}}_i^+ \mathbf{L}_i \mathbf{W}_i > 0$$

Fusión control visual-fuerza



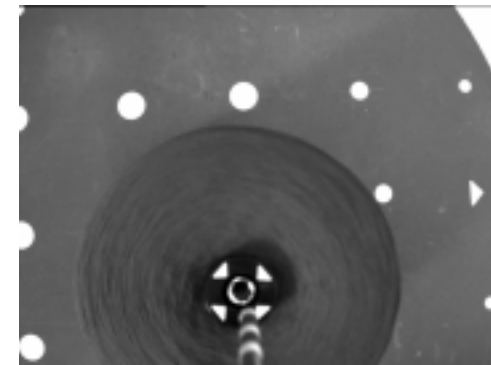
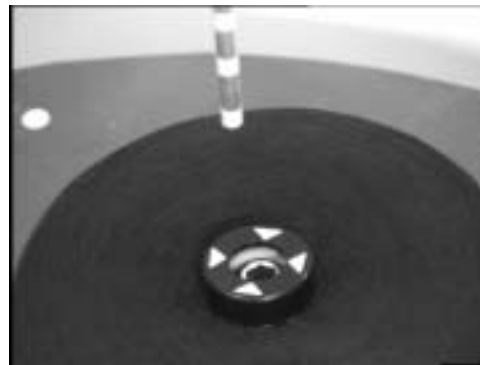
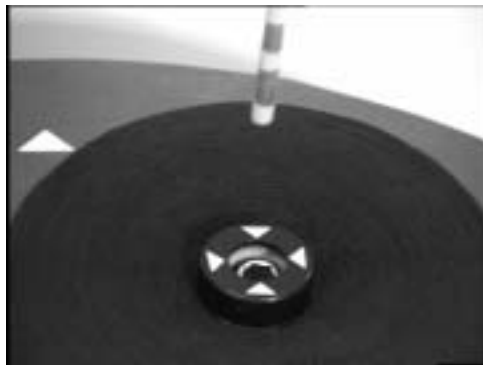
- ◆ Arquitectura global del sistema.



Fusión control visual-fuerza



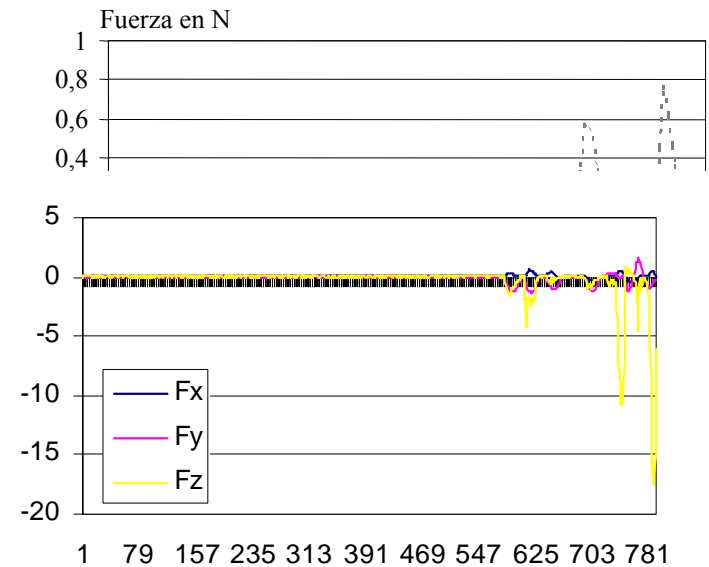
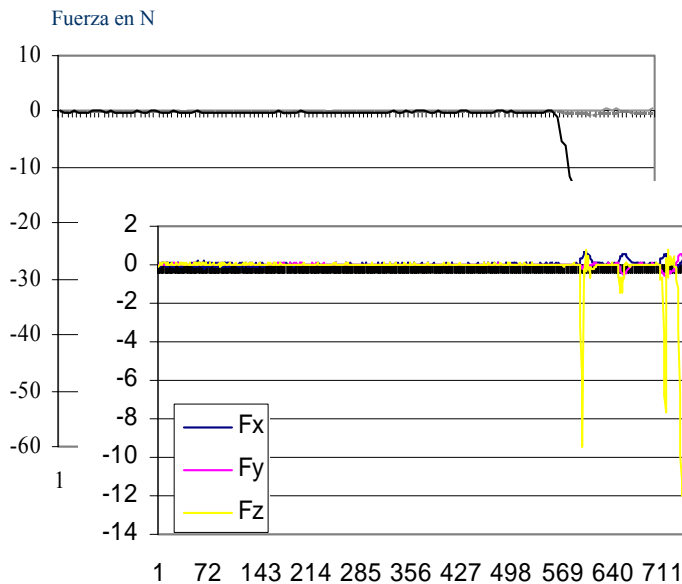
- ◆ Arquitectura global del sistema.
- ◆ Sistema de visión:
 - Fase 1: Utilización del sistema de visión externo para obtener la localización aproximada del objeto.
 - Fase 2: Funcionamiento conjunto de ambos sistemas de visión.



Fusión control visual-fuerza



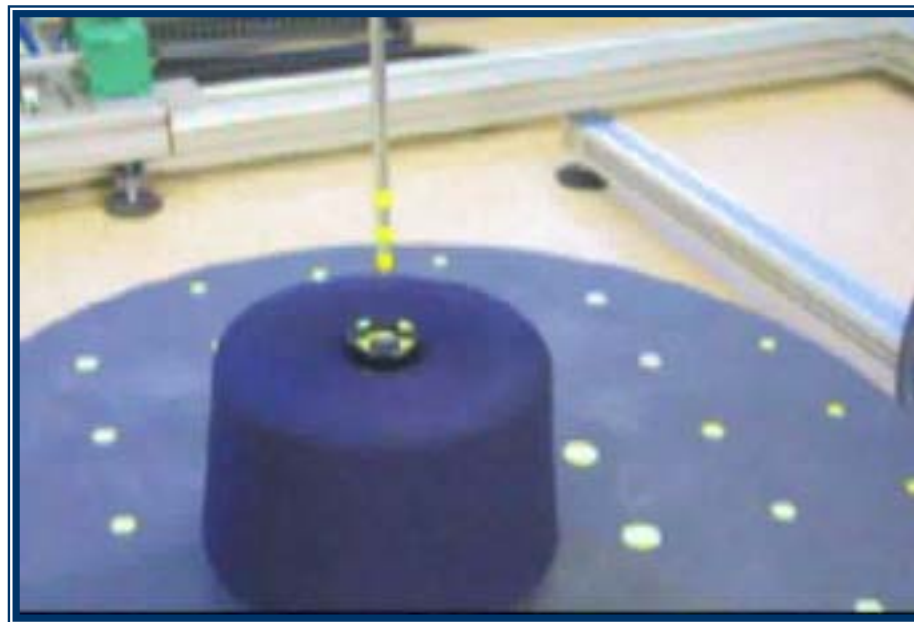
- ◆ Arquitectura global del sistema.
- ◆ Sistema de visión.
- ◆ Sistema de fuerza. Resultados.

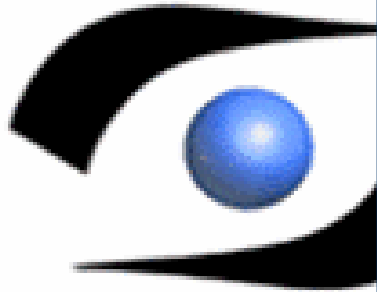


Fusión control visual-fuerza



- ◆ Arquitectura global del sistema.
- ◆ Sistema de visión.
- ◆ Sistema de fuerza. Resultados.





© Grupo de Automática, Robótica y Visión Artificial



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante