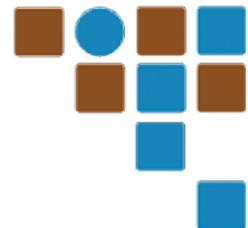


# Avances en Telerobótica y Redes de Robots

Luis Basañez  
Catedrático Emérito



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Institut d'Organització i Control  
de Sistemes Industrials



## Contenido

- Conceptos básicos
- Antecedentes
- Aplicaciones
- Componentes y módulos
- Interfaces
- Redes de robots



# TELE-ROBÓTICA

Conjunto de tecnologías que comprenden la operación, monitorización y reprogramación a distancia de un robot por un ser humano.

*En sentido amplio:*

Conjunto de métodos y técnicas que permiten al ser humano sentir y actuar a distancia.

*Objetivo (Rosenberg, 1993):*

Reproducir -y si es posible, mejorar- en un entorno remoto, las capacidades sensitivas y de actuación de un operador.



## Motivación

Incrementar/ mejorar / aumentar:

- Alcance (distancia)
- Capacidad de carga (fuerza)
- Espacio de trabajo (volumen)
- Aislamiento (protección)
- Precisión, repetitividad
- Versatilidad



## Otros términos relacionados

- **Telepresencia:** conjunto de métodos y técnicas que permiten a un ser humano experimentar sensaciones similares a las que tendría si se encontrarse físicamente en el lugar remoto.
- **Realidad virtual:** conjunto de métodos y técnicas que permiten a un ser humano experimentar sensaciones similares a las que tendría si se encontrarse físicamente en un lugar no real generado por un computador.
- **Realidad aumentada:** conjunto de métodos y técnicas que permiten a un ser humano experimentar sensaciones modificadas por un computador con el objetivo de añadir nueva información creada artificialmente.



## Modos de funcionamiento de un robot

Programado

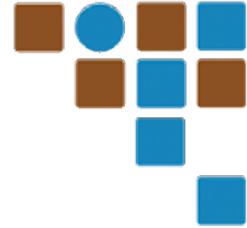


Teleoperado



Autónomo





# TELE-ROBÓTICA

## Antecedentes

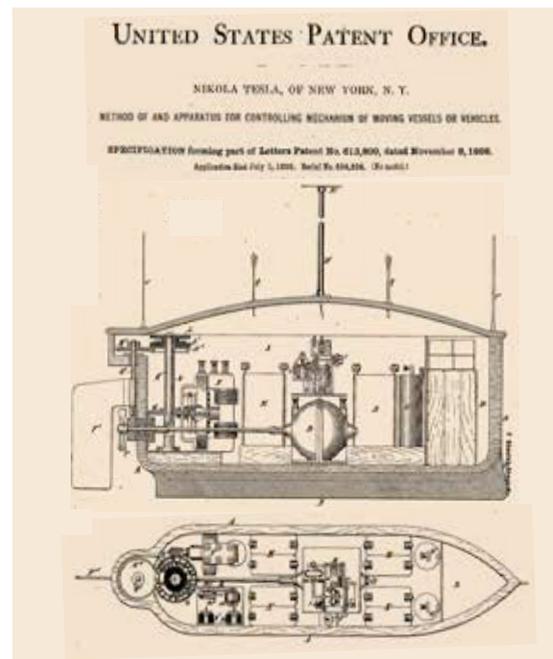


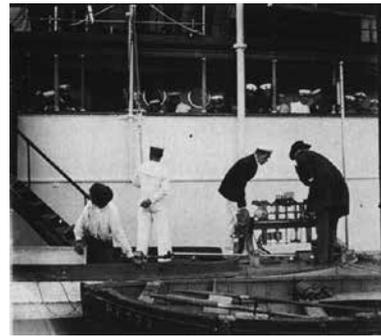
Septiembre de 1898

**Nikola Tesla** presenta en la Exhibición Eléctrica del Madison Square Garden de Nueva York el primer bote del mundo conducido por control remoto, usando su sistema "Teleautomático" o "potenciado-a-mente".

Era una maqueta de bote acorazado-con-hierro de 1.10 metros de eslora.

Su objetivo era vender a Estados Unidos un submarino teleoperado para su guerra con España.





En 1903 **Leonardo Torres Quevedo** presenta en la Academia de Ciencias de París el *telekino*, autómatas que ejecutaba órdenes transmitidas mediante ondas hertzianas.

El 6 de septiembre de 1906, en presencia de Alfonso XIII y ante una gran multitud, demuestra con éxito el invento en el puerto de Bilbao maniobrando un bote desde la terraza del Club Marítimo del Abra.



## Primer telemanipulador bilateral mecánico



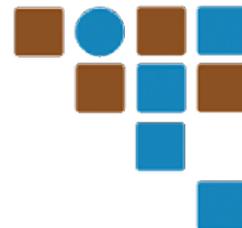
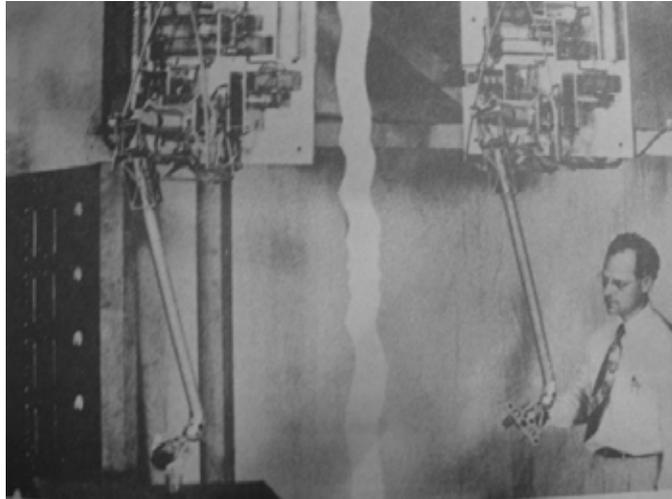
**Raymond Goertz** manipulando productos químicos a través de un cristal de protección. Fotografía del Laboratorio Nacional de Argonne, USA. 1948



## Primer telemanipulador bilateral eléctrico

Raymond Goertz  
haciendo tareas de  
aprehensión de  
objetos.

Fotografía del  
Laboratorio Nacional  
de Argonne, USA.  
1954



# TELE-ROBÓTICA

## Aplicaciones



## Campos de Aplicación

- Espacio
- Industria nuclear
- Exploración submarina
- Medicina
- Construcción y minería
- Mantenimiento de instalaciones industriales
- Intervención en desastres naturales
- Defensa
- Entretenimiento



## Espacio



Sojourner (cortesía NASA, JPL)



Canadarm2 (cortesía NASA)



## Exploración Submarina



Sistema Victor de exploración submarina



Robot submarino Garbi III AUV  
(Cortesía UG)



## Exploración Submarina





## Medicina y Cirugía



Cirugía robotizada Dresden Hospital  
(©2007 Intuitive Surgical, Inc).



## Medicina y Cirugía



Fusión Intercorporal Lumbar Anterior (ALIF) Robotizada



## Construcción



Distribuidor de hormigón horizontal



Soldadura de armazones metálicos



Control remoto de una excavadora utilizando un robot humanoide (IHI, Kawazaki Heavy Industries, Tokyu Construction, AIST).

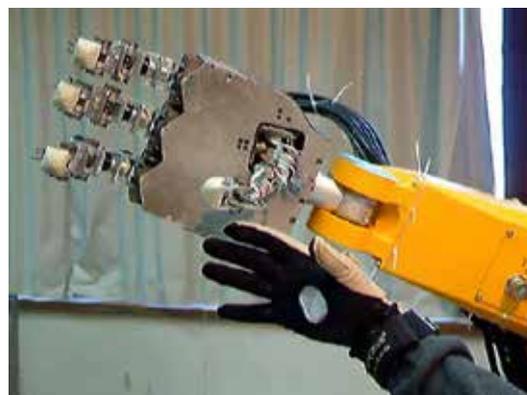


## Mantenimiento y manipulación



Robot ROBTET para mantenimiento de líneas eléctricas (Cortesía DISAM-UPM)

Mano mecánica MA-I telecomandada con guante sensorizado y exoesqueleto (Cortesía IOC)





## Desactivación de explosivos



SILO6: robot hexápodo para desactivación de minas anti-persona (Cortesía IAI-CSIC)



## Defensa

UAV (Unmanned Air Vehicle)



Robot policía



US Air Force Predator

SARGE\_vehículo tipo UGV (Unmanned Ground Vehicle)

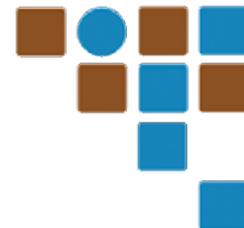




## UAV (Unmanned Aerial Vehicles) .....”drones”



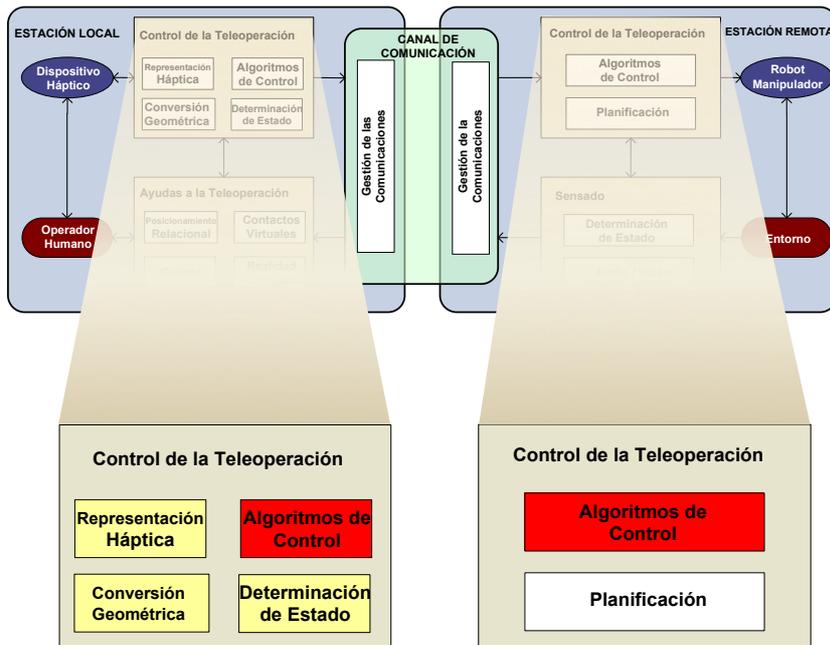
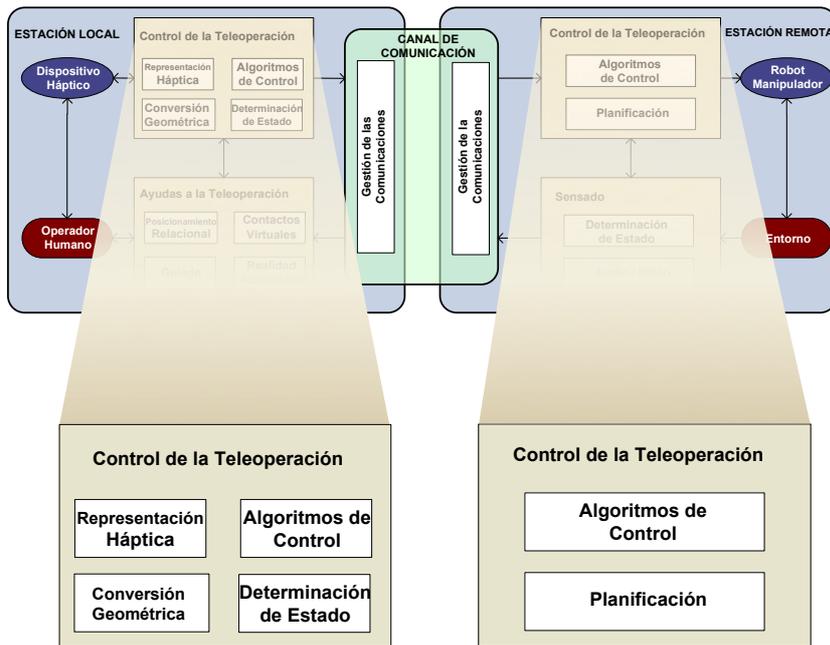
Cuadri-cóptero



# TELE-ROBÓTICA

## Componentes y módulos







## Objetivos del Control

- Hacer que el control manual del operador humano sea robusto ante retardos, saturación de los actuadores y otras no linealidades, e incluso ante los propios errores del operador.
- Permitir elevadas prestaciones en la teleoperación (precisión, tiempo de teleoperación, comodidad).

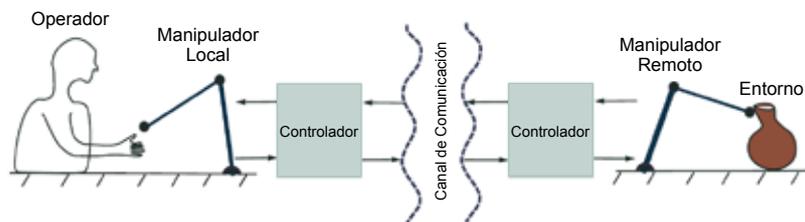


## Métodos de Control

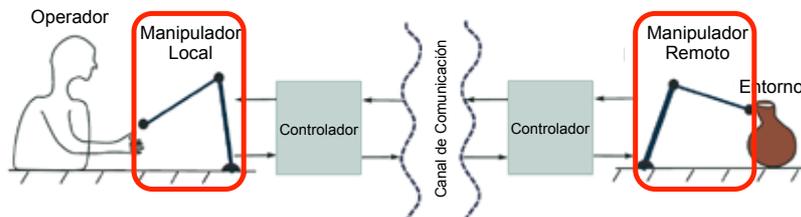
- **Unilateral:** El robot local genera las consignas de posición o velocidad para los lazos de control de las articulaciones del remoto.
- **Bilateral:** Existe realimentación de posición o posición y fuerza del robot remoto al local.
- **Coordinado:** Existen lazos cerrados de control en el robot remoto que son usados cuando el operador no puede controlarlo directamente debido a los retardos en la comunicación.
- **Supervisado:** El robot remoto hace parte de las tareas más o menos autónomamente, mientras que el operador supervisa y da comandos de alto nivel para que el robot los ejecute.

## Control Bilateral

- El *operador* mueve dinámicamente el *manipulador local* que transmite una señal de control, a través del *canal de comunicación*, al *manipulador remoto* que interacciona con el *entorno*.
- Esta interacción es realimentada al operador mediante el manipulador local.



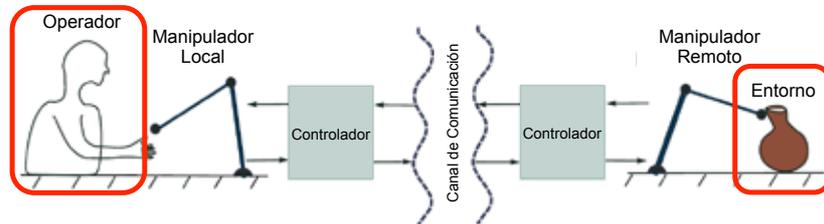
## Modelado del Sistema



$$\mathbf{M}_l(\mathbf{q}_l)\ddot{\mathbf{q}}_l + \mathbf{C}_l(\mathbf{q}_l, \dot{\mathbf{q}}_l)\dot{\mathbf{q}}_l + \mathbf{g}_l(\mathbf{q}_l) = \boldsymbol{\tau}_l^* - \boldsymbol{\tau}_h$$

$$\mathbf{M}_r(\mathbf{q}_r)\ddot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{C}_r(\mathbf{q}_r, \dot{\mathbf{q}}_r)\dot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{g}_r(\mathbf{q}_r) = \boldsymbol{\tau}_e - \boldsymbol{\tau}_r^*$$

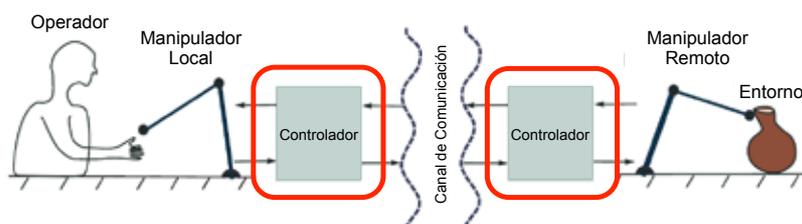
## Modelado del Sistema



$$\mathbf{M}_l(\mathbf{q}_l)\ddot{\mathbf{q}}_l + \mathbf{C}_l(\mathbf{q}_l, \dot{\mathbf{q}}_l)\dot{\mathbf{q}}_l + \mathbf{g}_l(\mathbf{q}_l) = \boldsymbol{\tau}_l^* - \boldsymbol{\tau}_h$$

$$\mathbf{M}_r(\mathbf{q}_r)\ddot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{C}_r(\mathbf{q}_r, \dot{\mathbf{q}}_r)\dot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{g}_r(\mathbf{q}_r) = \boldsymbol{\tau}_e - \boldsymbol{\tau}_r^*$$

## Modelado del Sistema



$$\mathbf{M}_l(\mathbf{q}_l)\ddot{\mathbf{q}}_l + \mathbf{C}_l(\mathbf{q}_l, \dot{\mathbf{q}}_l)\dot{\mathbf{q}}_l + \mathbf{g}_l(\mathbf{q}_l) = \boldsymbol{\tau}_l^* - \boldsymbol{\tau}_h$$

$$\mathbf{M}_r(\mathbf{q}_r)\ddot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{C}_r(\mathbf{q}_r, \dot{\mathbf{q}}_r)\dot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{g}_r(\mathbf{q}_r) = \boldsymbol{\tau}_e - \boldsymbol{\tau}_r^*$$

*Si se asumen controladores con compensación de gravedad:*

$$\mathbf{M}_l(\mathbf{q}_l)\ddot{\mathbf{q}}_l + \mathbf{C}_l(\mathbf{q}_l, \dot{\mathbf{q}}_l)\dot{\mathbf{q}}_l = \boldsymbol{\tau}_l - \boldsymbol{\tau}_h$$

$$\mathbf{M}_r(\mathbf{q}_r)\ddot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{C}_r(\mathbf{q}_r, \dot{\mathbf{q}}_r)\dot{\mathbf{q}}_r = \boldsymbol{\tau}_e - \boldsymbol{\tau}_r$$



## Problemática

- Los manipuladores local y remoto son altamente *no-lineales*.
- Los retardos de transmisión comprometen la *estabilidad*.
- Cuando el manipulador remoto toca el entorno se produce una *desviación de posición*, que se agrava cuando los retardos son variables.
- El efecto del retardo en la estabilidad puede eliminarse transformando el canal de comunicación en una *línea de transmisión sin pérdidas*, pero se produce desviación de posición y no es útil para retardos variables.



## Algoritmos de Control

Hay tres grandes grupos, dependiendo del retardo:

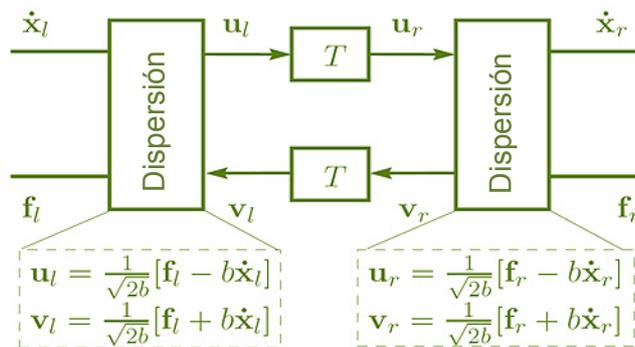
- **Sin retardo** (p.ej. manipuladores local y remoto próximos y conectados por una línea dedicada).
- **Con retardo constante** (p.ej. conexión por una línea dedicada con protocolos síncronos y deterministas).
- **Con retardo variable** (p.ej. conexión mediante redes de conmutación de paquetes como Internet).



## Transformación de Dispersión

Los esquemas basados en *dispersión –scattering–* (Anderson y Spong 1989) han dominado el campo durante mucho tiempo.

**Idea directriz:** enviando *señales dispersas* la línea de transmisión *virtual* resultante es pasiva.



$b$  es la impedancia de la línea virtual de transmisión



## Variables de Onda

Las *variables de onda* (Niemeyer y Slotine 1991) también convierten en pasivo el canal de comunicación.

La clave de las variables de onda es la adaptación de impedancia para evitar reflexiones.

Las variables de onda coinciden con la formulación de dispersión y la impedancia virtual de onda es la impedancia de dispersión de la línea virtual de transmisión.

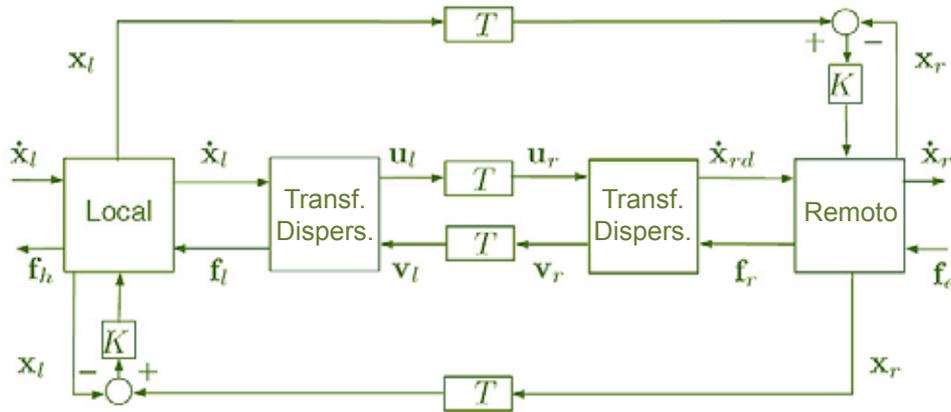
### **Inconvenientes de estos enfoques:**

- No aseguran seguimiento de posición.
- No sirven para retardos variables.



## Seguimiento de posición

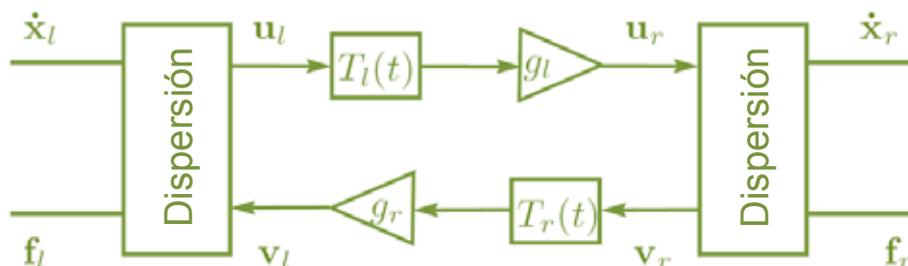
Esquema de Chopra *et al.* (2006) para conseguir seguimiento de posición:



## Transformación de Dispersión

El retardo variable hace perder la pasividad de los esquemas basados en dispersión.

*Propuesta de Lozano et al. (2002):* conseguir la disipación con una ganancia variable en el tiempo:





## **Función de Lyapunov candidata *general***

$$V(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) = V_1(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) + V_2(\dot{\mathbf{q}}_i) + V_3(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i)$$

$$\dot{V}(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) = \dot{V}_1(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) + \dot{V}_2(\dot{\mathbf{q}}_i) + \dot{V}_3(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i)$$



## **Función de Lyapunov candidata *general***

$$V(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) = V_1(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) + V_2(\dot{\mathbf{q}}_i) + V_3(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i)$$

$$\dot{V}(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) = \dot{V}_1(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) + \dot{V}_2(\dot{\mathbf{q}}_i) + \dot{V}_3(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i)$$

$V_1(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i)$  representa la energía cinética de los manipuladores:

$$V_1(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) = \frac{\beta_l}{2} \dot{\mathbf{q}}_l^T \mathbf{M}_l(\mathbf{q}_l) \dot{\mathbf{q}}_l + \frac{\beta_r}{2} \dot{\mathbf{q}}_r^T \mathbf{M}_r(\mathbf{q}_r) \dot{\mathbf{q}}_l \quad \beta_i \in \mathbb{R}^+$$

$$\dot{V}_1(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) = -\beta_l \dot{\mathbf{q}}_l^T (\boldsymbol{\tau}_h - \boldsymbol{\tau}_l) - \beta_r \dot{\mathbf{q}}_r^T (\boldsymbol{\tau}_r - \boldsymbol{\tau}_e)$$



## Función de Lyapunov candidata *general*

$$V(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) = V_1(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) + V_2(\dot{\mathbf{q}}_i) + V_3(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i)$$

$$\dot{V}(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) = \dot{V}_1(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) + \dot{V}_2(\dot{\mathbf{q}}_i) + \dot{V}_3(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i)$$

$V_2(\dot{\mathbf{q}}_i)$  representa la interacción energética del operador con el manipulador local y del manipulador remoto con el entorno:

$$V_2(\dot{\mathbf{q}}_i) = \beta_l \int_0^t \dot{\mathbf{q}}_l^T \boldsymbol{\tau}_h d\sigma + \beta_l \kappa_l - \beta_r \int_0^t \dot{\mathbf{q}}_r^T \boldsymbol{\tau}_e d\sigma + \beta_r \kappa_r > 0 \quad \forall \beta_i \in \mathbb{R}^+$$

$$\dot{V}_2(\dot{\mathbf{q}}_i) = \beta_l \dot{\mathbf{q}}_l^T \boldsymbol{\tau}_h - \beta_r \dot{\mathbf{q}}_r^T \boldsymbol{\tau}_e$$



## Función de Lyapunov candidata *general*

$$V(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) = V_1(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) + V_2(\dot{\mathbf{q}}_i) + V_3(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i)$$

$$\dot{V}(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) = \dot{V}_1(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) + \dot{V}_2(\dot{\mathbf{q}}_i) + \dot{V}_3(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i)$$

$V_3(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i)$  representa la energía de la interconexión entre las estaciones local y remota.

Se diseña para cada esquema de control usando un funcional Lyapunov-Krasovskii o un funcional Lyapunov-Razumikhin.

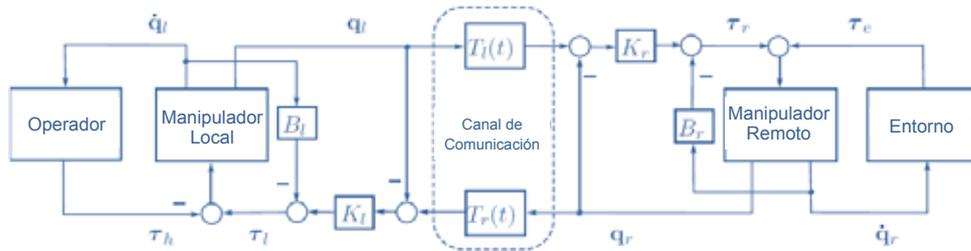
La función  $V(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i)$  ha permitido justificar rigurosamente los esquemas anteriores y proponer otros nuevos sin usar la transformación de dispersión.



## Estrategia de control tipo P+d

$$\tau_l = K_l [\mathbf{q}_r(t - T_r(t)) - \mathbf{q}_l] - B_l \dot{\mathbf{q}}_l$$

$$\tau_r = K_r [\mathbf{q}_r - \mathbf{q}_l(t - T_l(t))] + B_r \dot{\mathbf{q}}_r$$



Funcional de Lyapunov-Razumikhin

$$V_3 = \frac{K_l}{2} |\mathbf{q}_l - \mathbf{q}_r|^2$$

Condición de estabilidad y convergencia de posición:

$$4B_l B_r > ({}^*T_l + {}^*T_r)^2 K_l K_r$$

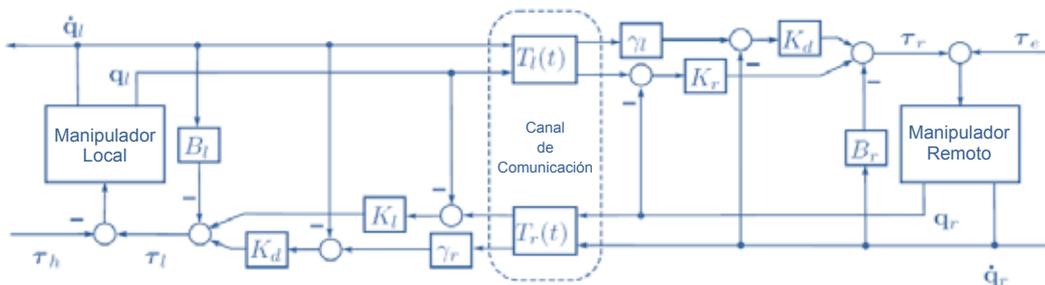


## Estrategia de control tipo PD+d

$$\tau_l = K_d [\gamma_r \dot{\mathbf{q}}_r(t - T_r(t)) - \dot{\mathbf{q}}_l] + K_l [\mathbf{q}_r(t - T_r(t)) - \mathbf{q}_l] - B_l \dot{\mathbf{q}}_l$$

$$\gamma_i^2 = 1 - \dot{T}_i(t)$$

$$\tau_r = K_d [\dot{\mathbf{q}}_r - \gamma_l \dot{\mathbf{q}}_l(t - T_l(t))] + K_r [\mathbf{q}_r - \mathbf{q}_l(t - T_l(t))] + B_r \dot{\mathbf{q}}_r$$



Funcional de Lyapunov-Krasovskii 
$$V_3 = \frac{K_l}{2} |\mathbf{q}_l - \mathbf{q}_r|^2 + \frac{K_d K_l}{2K_r} \int_{t-T_l(t)}^t |\dot{\mathbf{q}}_l(\theta)|^2 d\theta + \frac{K_d}{2} \int_{t-T_r(t)}^t |\dot{\mathbf{q}}_r(\theta)|^2 d\theta$$

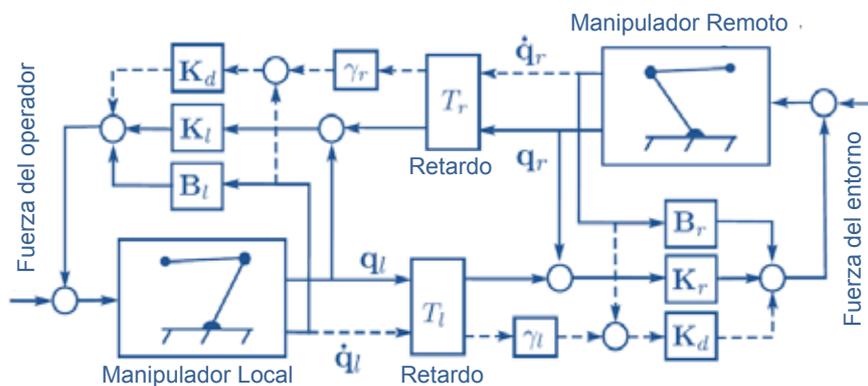
Condición de estabilidad y convergencia de posición:

$$4B_l B_r > ({}^*T_l + {}^*T_r)^2 K_l K_r$$



## Controladores

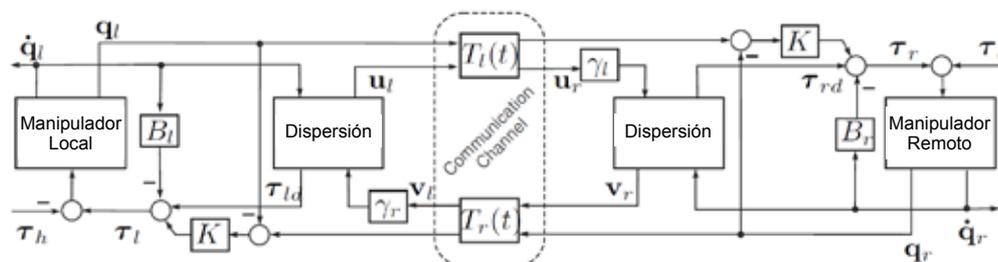
**P+d** (sin líneas de trazos)  
**y PD+d** (con líneas de trazos)



## Controlador basado en dispersión

$$\begin{aligned} \tau_l &= \tau_{ld} + K[\mathbf{q}_r(t - T_r(t)) - \mathbf{q}_l] - B_l \dot{\mathbf{q}}_l & \tau_{ld} &= -K_{dl}[\dot{\mathbf{q}}_l - \dot{\mathbf{q}}_{ld}] & \mathbf{u}_r &= \gamma_l \mathbf{u}_l(t - T_l(t)) \\ \tau_r &= \tau_{rd} + K[\mathbf{q}_r - \mathbf{q}_l(t - T_l(t))] + B_r \dot{\mathbf{q}}_r & \tau_{rd} &= -K_{dr}[\dot{\mathbf{q}}_r - \dot{\mathbf{q}}_{rd}] & \mathbf{v}_l &= \gamma_r \mathbf{v}_r(t - T_r(t)) \end{aligned}$$

$$\gamma_i^2 = 1 - \dot{T}_i(t)$$

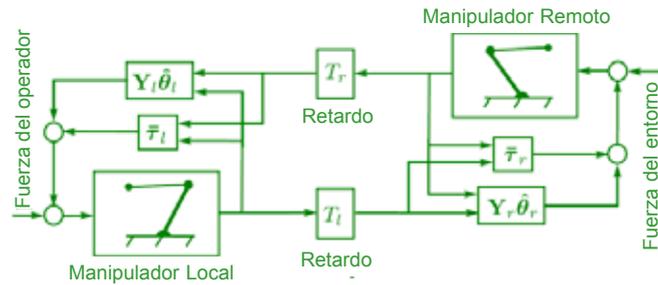


Condición de estabilidad y convergencia de posición:

$$4B_l B_r > (T_l^* + T_r^*)^2 K_l K_r$$



## Controlador adaptativo



Leyes de control	$\tau_l = Y_l(q_l, \dot{q}_l, e_l, \dot{e}_l) \hat{\theta}_l + \bar{\tau}_l$	$\tau_r = -Y_r(q_r, \dot{q}_r, e_r, \dot{e}_r) \hat{\theta}_r - \bar{\tau}_r$
Señales de sincronización	$\epsilon_l = \dot{q}_l - \Lambda e_l$	$\epsilon_r = \dot{q}_r - \Lambda e_r$
Leyes de estimación	$\dot{\hat{\theta}}_l = -\Gamma_l Y_l^T \epsilon_l$	$\dot{\hat{\theta}}_r = -\Gamma_r Y_r^T \epsilon_r$
	$\dot{\bar{\tau}}_l = K_l \epsilon_l - B \dot{e}_l$	$\dot{\bar{\tau}}_r = K_r \epsilon_r - B \dot{e}_r$

Función candidata de Lyapunov-Krasovskii

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i \in \{l, r\}} \left[ \epsilon_i^T M \epsilon_i + \tilde{\theta}_i^T \Gamma_i^{-1} \tilde{\theta}_i + \alpha |e_i|^2 + \beta \int_{t-T}^t |\dot{q}_i|^2 d\sigma \right]$$



## Comparación de las estrategias tipo P+d y PD+d

- Las dos estrategias proporcionan *seguimiento de posición*.
- Ambas estrategias son *robustas* frente a diferencias en las *condiciones iniciales* de los robots local y remoto.
- La estrategia tipo P es la que presenta mejor comportamiento de *reflexión de fuerza*.
- La estrategia tipo PD es más robusta frente a *errores de estimación del retardo*.



## Teleoperación bilateral

### BILATERAL TELEOPERATOR

E. Nuño, L. Basañez, R. Ortega and  
M.W. Spong



## Teleoperación bilateral

### BILATERAL TELEOPERATOR CSL - IOC EXPERIMENTS

E. Nuño, L. Basañez, R. Ortega and  
M.W. Spong

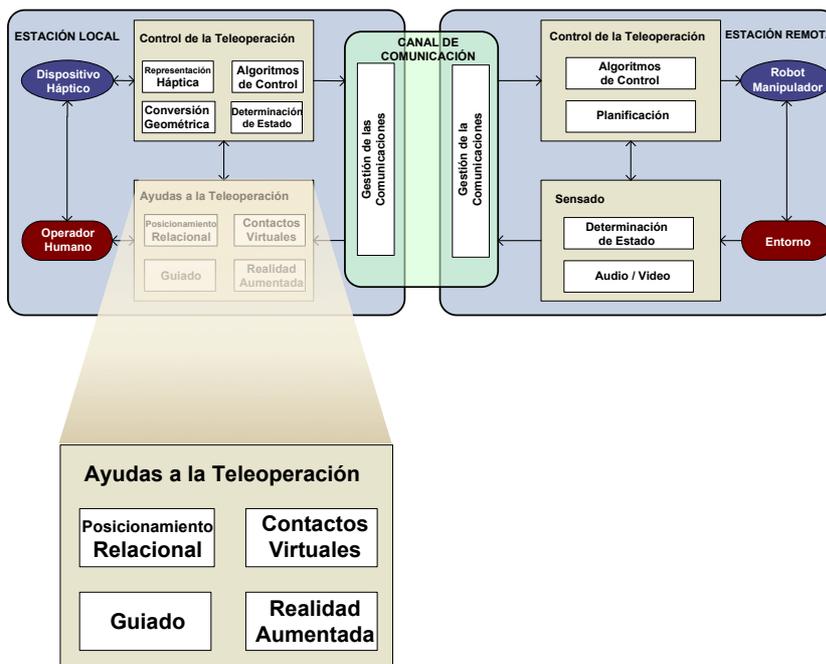


# Teleoperación bilateral



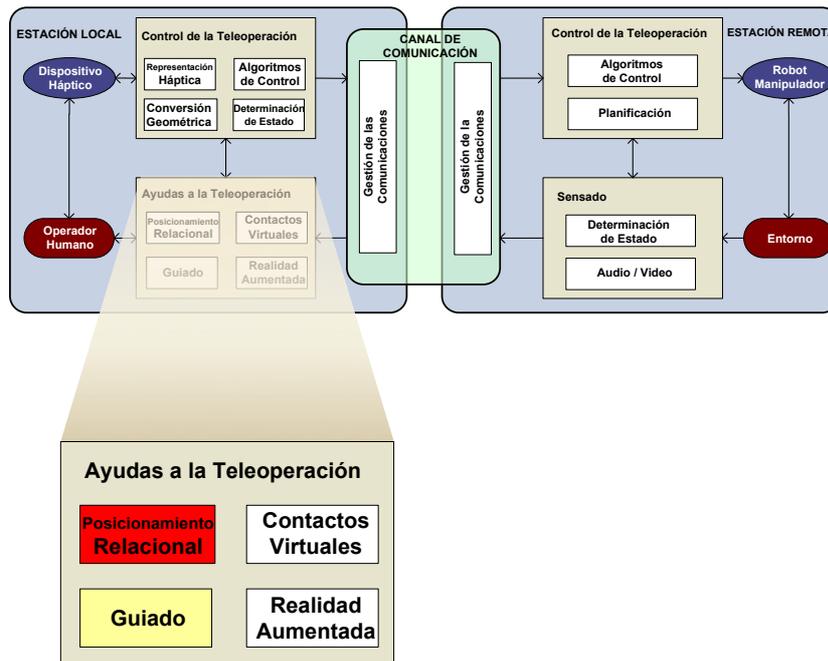
Avances en Telerobótica y Redes de Robots L. Basañez UNED, 12/05/2015

CONTROL DE LA TELEOPERACIÓN

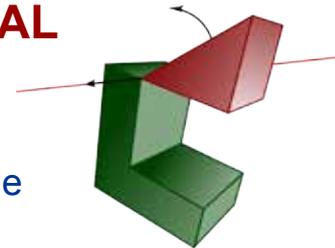


Avances en Telerobótica y Redes de Robots L. Basañez UNED, 12/05/2015

COMPONENTES Y MÓDULOS



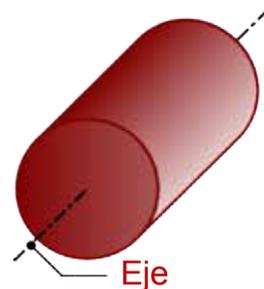
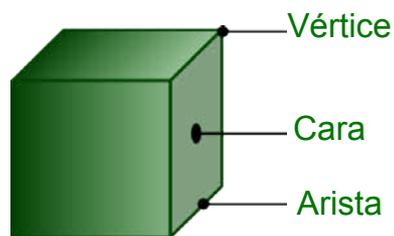
## POSICIONAMIENTO RELACIONAL



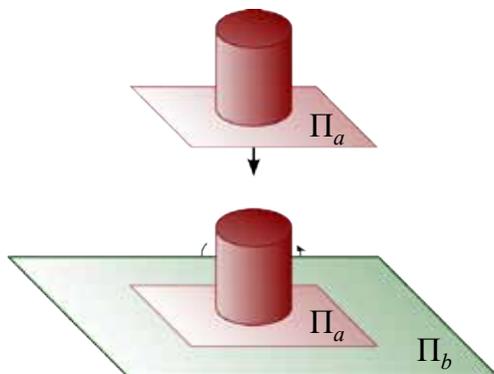
- Herramienta para resolver problemas de *posicionamiento de piezas*.
- Los problemas se formulan en términos de *restricciones geométricas*.
- Un *solucionador* encuentra las posiciones de cada objeto para satisfacer todas las restricciones impuestas.

## Restricciones geométricas

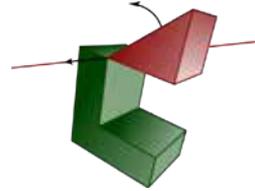
- Una **restricción geométrica** es la especificación de una relación (distancia, ángulo,...) que debe satisfacerse entre dos o más elementos geométricos.
- Estos elementos pueden pertenecer a la **frontera** del objeto o ser una entidad de **referencia**.



Ejemplo: Colocar un cilindro con su base sobre un plano



- Objeto es posicionado con respecto a su *entorno* ( $\Pi_a = \Pi_b$ ).
- Los movimientos del objeto pueden quedar restringidos *total o parcialmente* (2 traslaciones y 1 rotación).

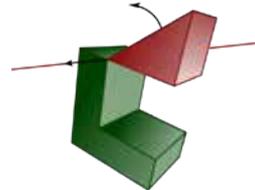


## PMF

Positioning **M**obile with respect to **F**ixed

Restricciones geométricas de entrada

Punto – punto =				d
Punto – línea =				d
Punto – plano =				d
Línea – línea =		∠	⊥	d
Línea – plano =		∠	⊥	d
Plano – plano =		∠	⊥	d



## PMF

Positioning **M**obile with respect to **F**ixed

Restricciones geométricas de entrada

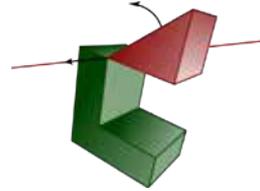
Descomposición de restricciones geométricas

**Traslación** (distancia)

Punto – punto  
 Punto – línea  
 Punto – plano

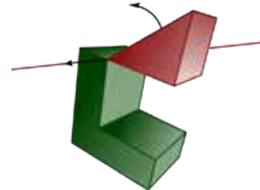
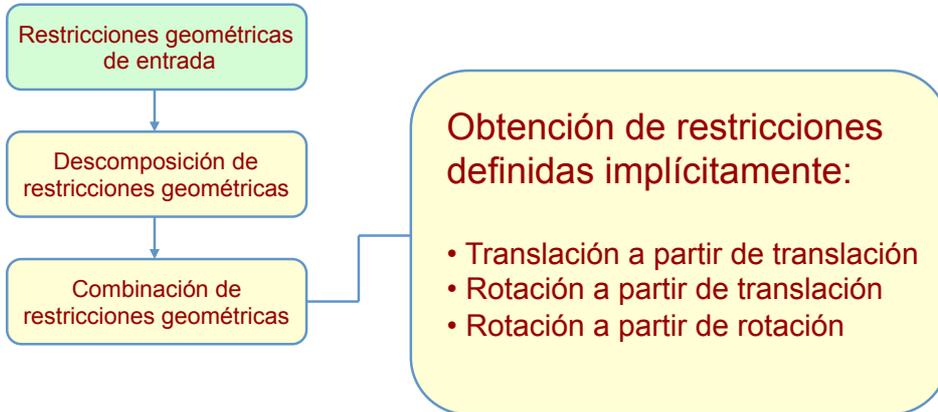
**Rotación** (ángulo)

Vector – vector



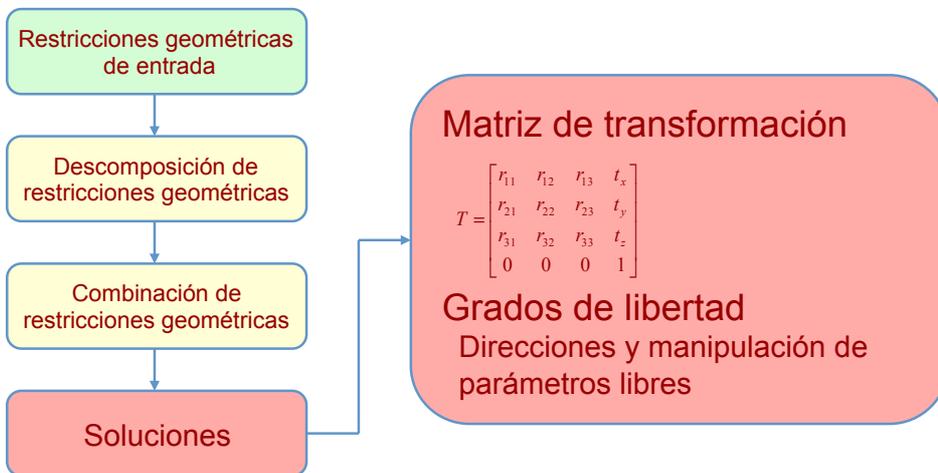
## PMF

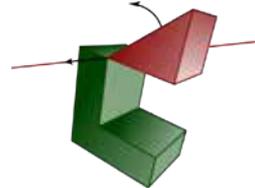
Positioning **M**obile with respect to **F**ixed



## PMF

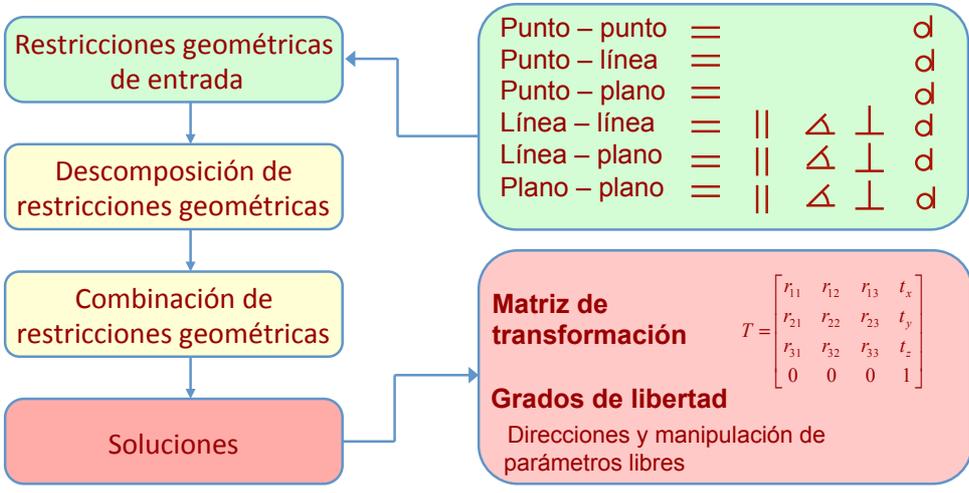
Positioning **M**obile with respect to **F**ixed



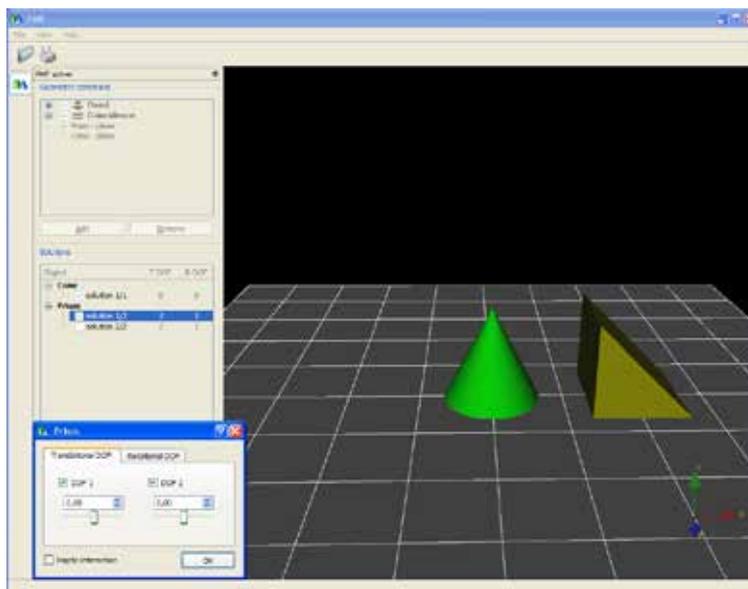


# PMF

Positioning **M**obile with respect to **F**ixed

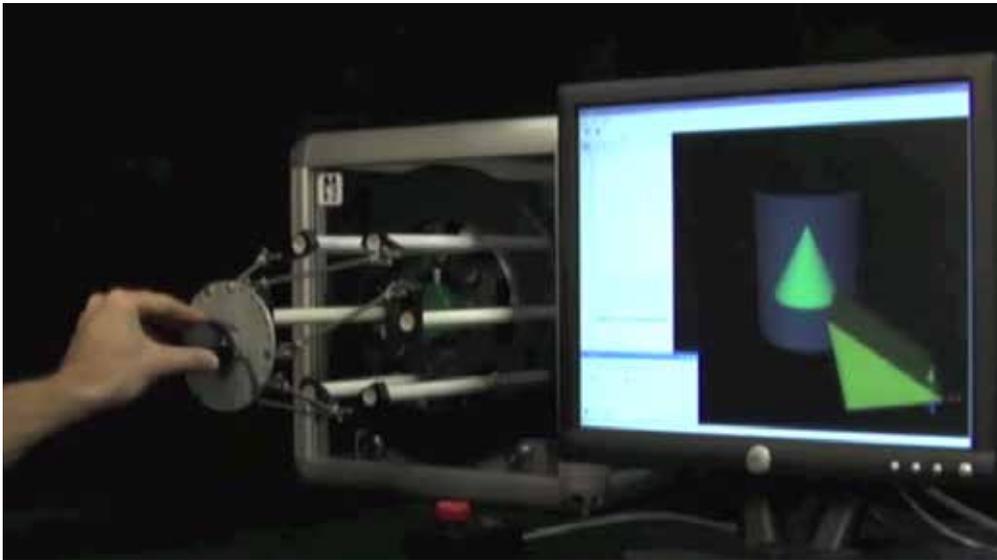


# Interfase PMF





## Interfase PMF



Avances en Telerobótica y Redes de Robots

L. Basañez

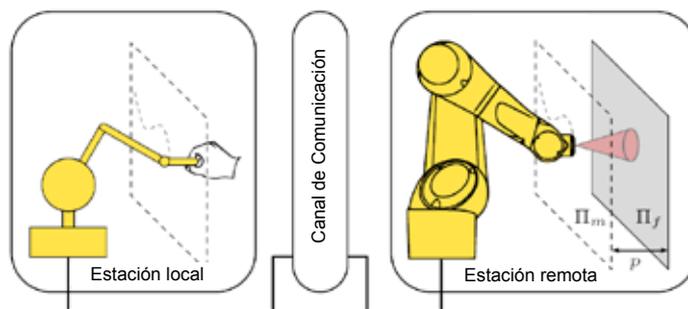
UNED, 12/05/2015

POSICIONAMIENTO RELACIONAL

PMF



Ejemplo: Tarea teleoperada de pintura



### Restricciones:

- Distancia  $p$  desde la pistola de pintura a la superficie a pintar.
- Perpendicularidad de la pistola a la superficie.

Avances en Telerobótica y Redes de Robots

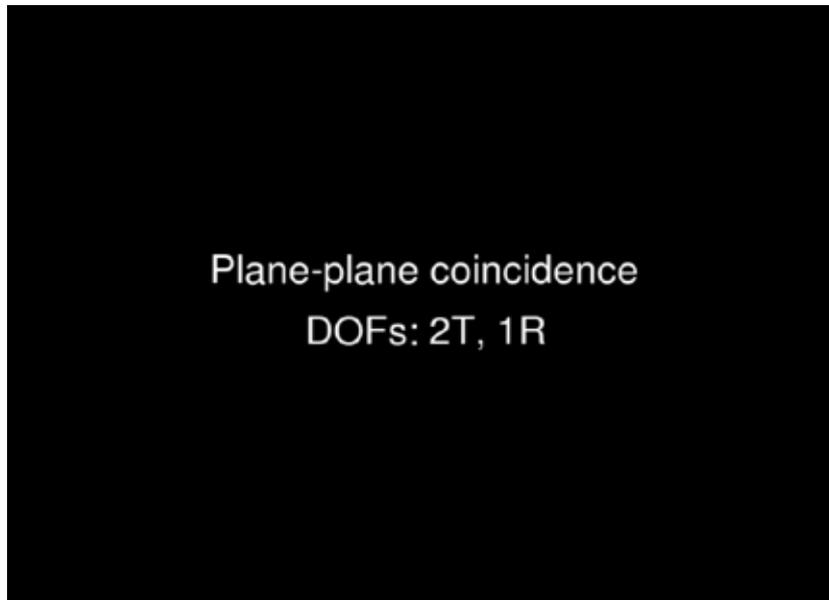
L. Basañez

UNED, 12/05/2015

POSICIONAMIENTO RELACIONAL

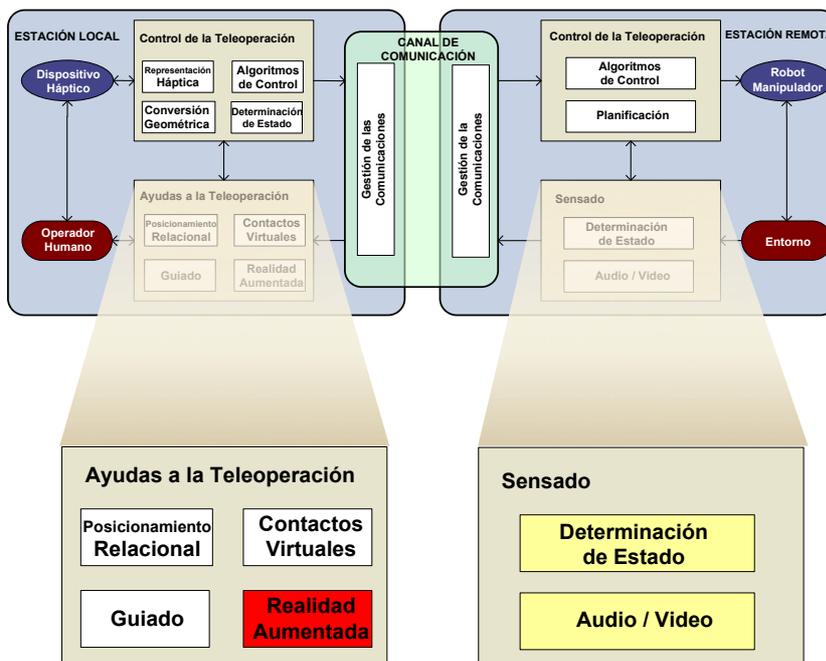
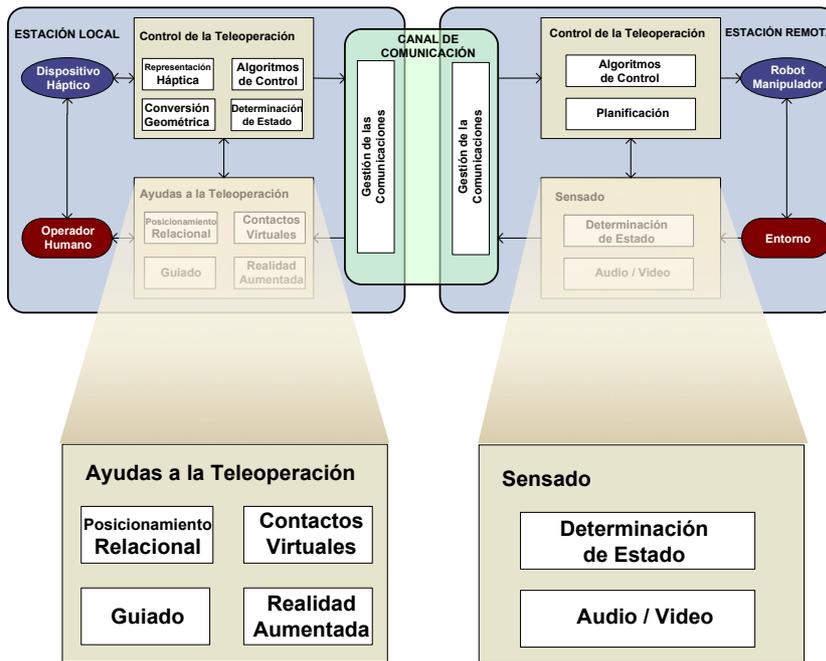


## PMF Tarea teleoperada



## Movimiento de la herramienta a lo largo de un raíl







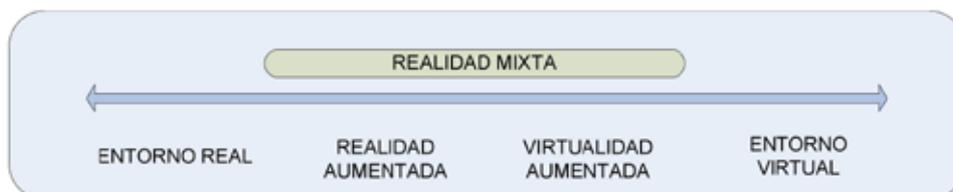
# REALIDAD AUMENTADA



# Realidad Aumentada

Es una forma de interacción Hombre-Máquina que permite agregar información virtual sobre el mundo real.

Enriquece la percepción normal de los sentidos humanos (vista, oído, tacto) a través de la adición de información virtual.







## RA en tele-robótica

### Problemas en tele-robótica

1. Retardo en el canal de comunicaciones.
2. Perdida sensorial en el teleoperador.
3. Capacidad limitada de actuación.

### Soluciones de la RA

1. Previsualización de movimientos.
2. Enriquecimiento sensorial con información virtual (dispositivos hápticos, visión estereoscópica,...).
3. Herramientas virtuales.



## Visión estereoscópica con RA en tele-robótica



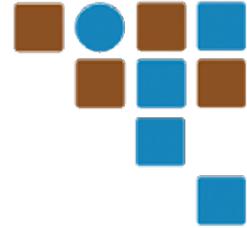
- Restricciones geométricas (superficie plana)
- Sistema coordinado del elemento terminal
- Robot virtual semitransparente en la configuración final



## ARrobTools

- **PMFTool** Restricciones de movimientos
- **RobotTool** Modelo del robot
- **WorkSpaceTool** Espacio de trabajo
- **ForceTool** Fuerzas de interacción
- **HapticTool** Restricciones del háptico
- **PathTool** Trayectorias del robot
- **TutorTool** Guiado de procedimientos
- **ConstructorTool** Entorno
- **ViewTool** Modo de visualización





# TELE-ROBÓTICA

## Interfaces



## Interfaces Directas

- El operador controla el manipulador o vehículo desde controladores de mano como joystics o applets de java.
- Tienen realimentación visual por medio de cámaras montadas en el sitio remoto.
- El nivel de telepresencia es bajo pero significativo.
- Son adecuadas para sistemas de teleoperación en los que el retardo es casi nulo porque necesitan un gran ancho de banda en sus comunicaciones.



## Ejemplos de Interfaces Directas



[www.futuba.com](http://www.futuba.com)

The Tele-Garden:

Desktop  
Teleoperation via the  
World Wide Web

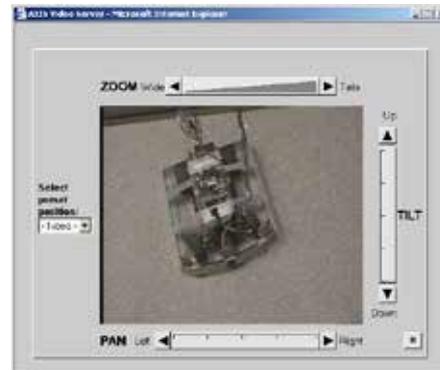
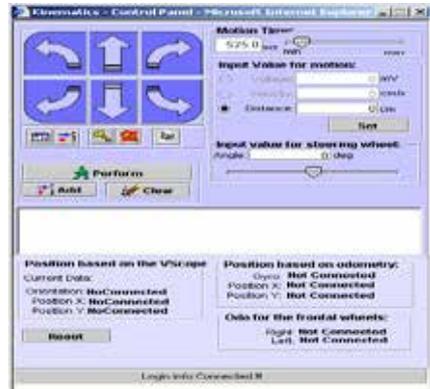


## Interfaces Multimodales

- Proporcionan al operador diferentes maneras de control.
- En general, poseen realimentación gráfica y/o visual.
- En algunos casos, combinan la información de diversos sensores de visión con informaciones gráficas para ayudar al operador a controlar mejor el manipulador.



## Ejemplo de Interfaces Multimodales



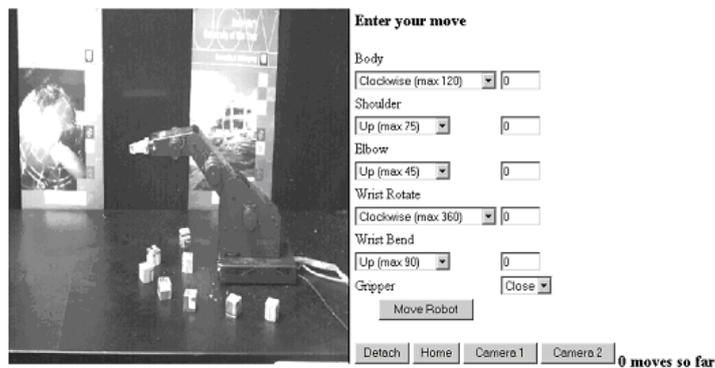
<http://www.merlin.informatik.uni-wuerzburg.de/>



## Ejemplo de Interfaces Multimodales

School of Electrical, Computer and Telecommunications Engineering  
University of Wollongong - Robotoy

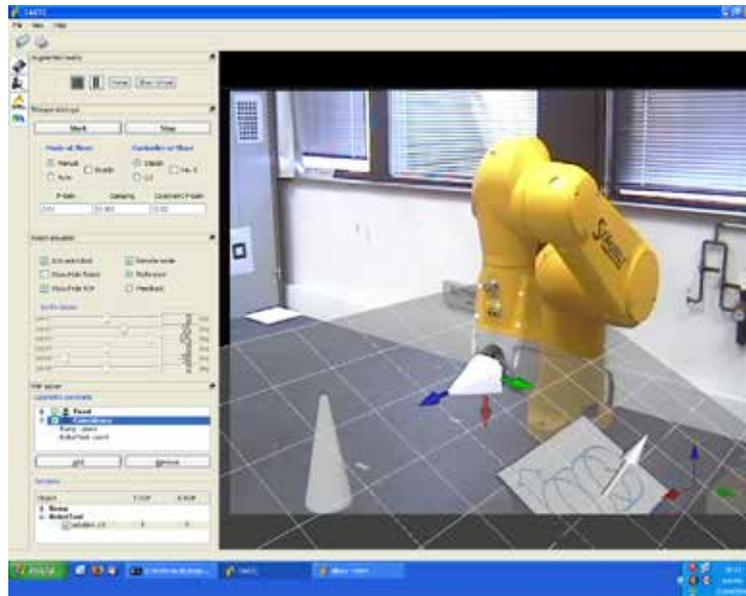
As and exclusive for you Internet Explorer users, for a pop-up window of a live image of the robot, click [here](#)



<http://robotoy.elec.uow.edu.au/roboframe.html>



## Interface Multimodal del IOC



## Ejemplos de Dispositivos Hápticos





## Teleoperación entre Tarragona y Barcelona

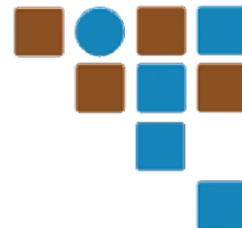


Avances en Telerobótica y Redes de Robots

L. Basañez

UNED, 12/05/2015

INTERFACES



## ROBOTS EN RED

Avances en Telerobótica y Redes de Robots

L. Basañez

UNED, 12/05/2015



## Sincronización

- **Sincronizar:** Hacer que coincidan en el tiempo dos o más movimientos o fenómenos (RAE).
- **Sincronización:** Coordinación de eventos que hacen operar a un sistema al unísono.
- La sincronización es ubicua.



## Bandada de aves



## Banco de peces

Avances en Telerobótica y Redes de Robots

L. Basañez

UNED, 12/05/2015

ROBOTS EN RED

Sincronización



## Luciérnagas parpadeantes

Avances en Telerobótica y Redes de Robots

L. Basañez

UNED, 12/05/2015

ROBOTS EN RED

Sincronización



## Hormigas obreras

Avances en Telerobótica y Redes de Robots

L. Basañez

UNED, 12/05/2015

ROBOTS EN RED

Sincronización



## Escuadrillas de aviones

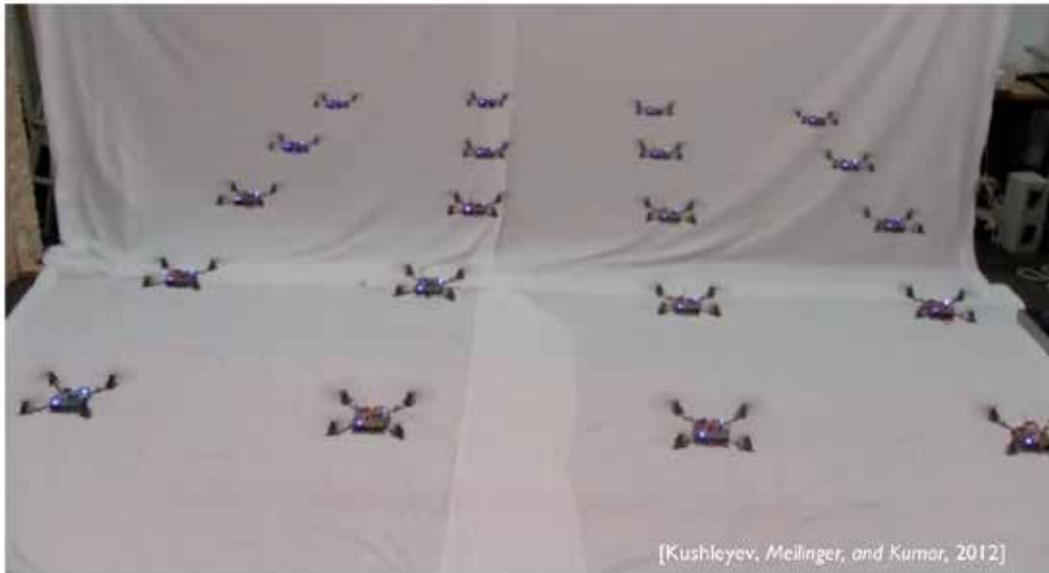
Avances en Telerobótica y Redes de Robots

L. Basañez

UNED, 12/05/2015

ROBOTS EN RED

Sincronización



## Formación de drones

Avances en Telerobótica y Redes de Robots

L. Basañez

UNED, 12/05/2015

ROBOTS EN RED

Sincronización



## Personas desfilando

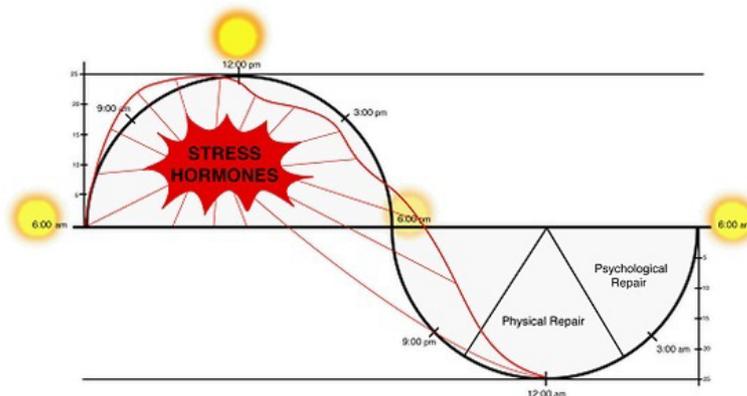
Avances en Telerobótica y Redes de Robots

L. Basañez

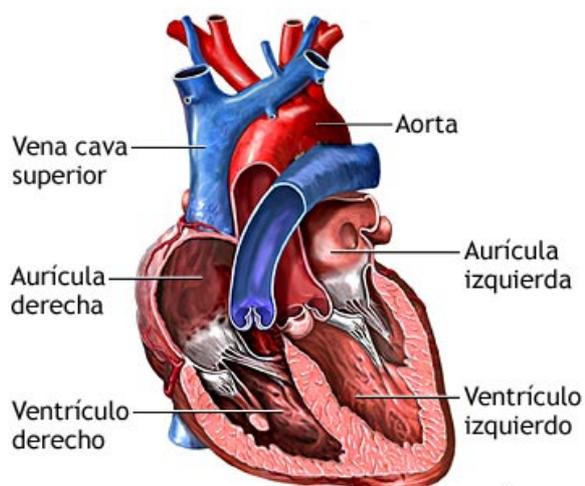
UNED, 12/05/2015

ROBOTS EN RED

Sincronización

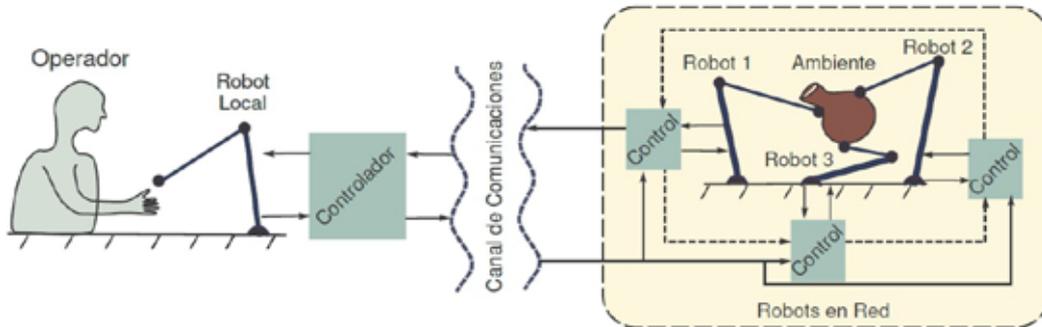


## Ritmo circadiano

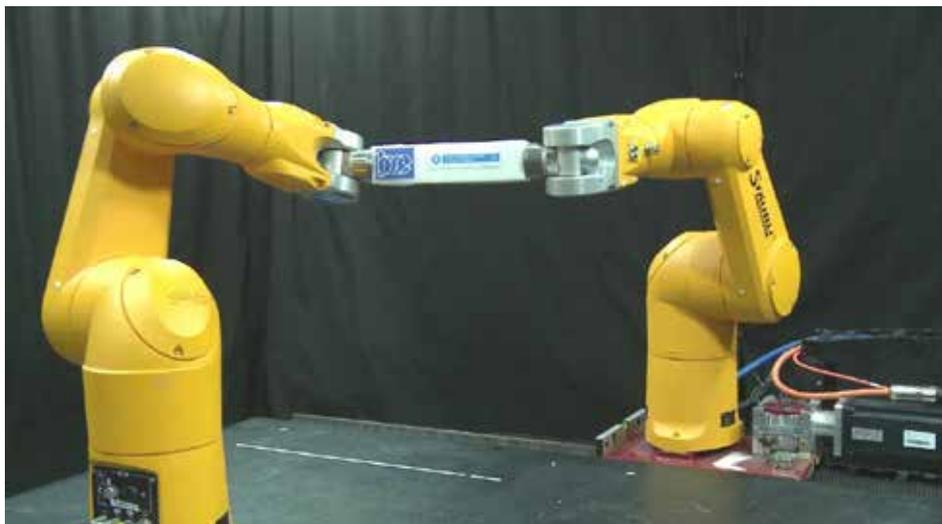


## Células coronarias

## Teleoperación de una red de robots



## Teleoperación de una red de robots

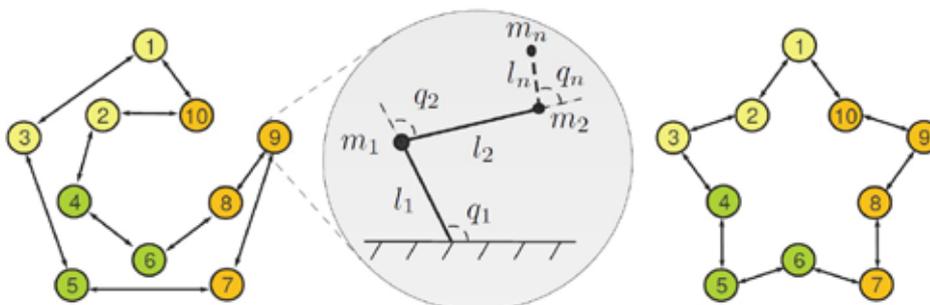


## Teleoperación de una red de robots



## Dinámica de una red de robots

- I. Comportamiento dinámico de cada nodo de la red
- II. Dinámica de la interconexión de los nodos





## Comportamiento dinámico de cada nodo de la red

- Cada nodo representa un sistema Euler-Lagrange EL con  $n$  gdl.
- Usando el Lagrangiano  $L_i(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_i^T \mathbf{M}_i(\mathbf{q}_i) \dot{\mathbf{q}}_i - U_i(\mathbf{q}_i)$ , las ecuaciones de Euler-Lagrange del movimiento son:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L_i}{\partial \dot{\mathbf{q}}_i} - \frac{\partial L_i}{\partial \mathbf{q}_i} = \boldsymbol{\tau}_i$$

- En forma compacta:

$$\mathbf{M}_i(\mathbf{q}_i) \ddot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{C}_i(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) \dot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{g}_i(\mathbf{q}_i) = \boldsymbol{\tau}_i$$



## Dinámica de la interconexión de los nodos

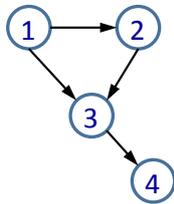
- La red se modela utilizando teoría de grafos.
- El grafo se supone únicamente *conectado*
- El grafo de interconexión se modela usando la matriz Laplaciana  $\mathbf{L} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ , cuyos elementos son:

$$l_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^N a_{ik} & i = j \\ -a_{ij} & i \neq j \end{cases} \quad \text{con } a_{ij} = \begin{cases} 1 & j \in \mathcal{N}_i \\ 0 & j \notin \mathcal{N}_i \end{cases}$$

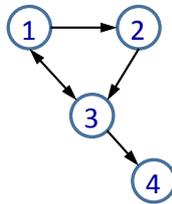
$\mathcal{N}_i$  es el conjunto de sistemas EL vecinos que transmiten información al nodo  $i$ .



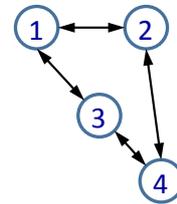
## Ejemplos de matrices Laplacianas



$$\mathbf{L}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$



$$\mathbf{L}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$



$$\mathbf{L}_3 = \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & 2 \end{pmatrix}$$



## Propiedades de las matrices Laplacianas

**Para una red *conectada*:**

**P1.**  $\mathbf{1}_N$  es un vector propio por la derecha de  $\mathbf{L}$ :  $\mathbf{L}\mathbf{1}_N = 0$ .

**P2.**  $\text{rango}(\mathbf{L}) = N - 1$

**P3.**  $\mathbf{L} + \mathbf{L}^T$  es semidefinida positiva.

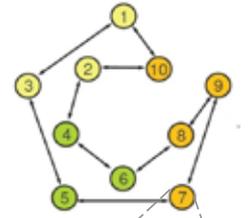
**P4.**  $\mathbf{L}$  tiene un único valor propio nulo y los demás tienen parte real positiva.

**P5.** Si, adicionalmente la red es balanceada,  $\mathbf{1}_N$  es también vector propio por la izquierda, asociado al valor propio nulo:  $\mathbf{1}_N^T \mathbf{L} = 0$ .

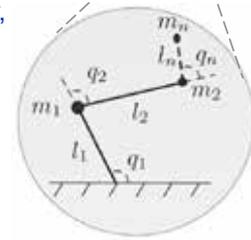


## Control de una red de robots

**TSP (Tracking Synchronization Problem):** dada una trayectoria deseada, acotada  $\mathbf{x}_d(t) = \text{col}(\mathbf{q}_d^T(t), \dot{\mathbf{q}}_d^T(t)) \in \mathbb{R}^{2n}$ , con  $\ddot{\mathbf{q}}_d \in \mathcal{L}_\infty$  todos los agentes deben seguir esa trayectoria, es decir,  $\lim_{t \rightarrow \infty} |\tilde{\mathbf{x}}_i(t)| = 0$  donde  $\tilde{\mathbf{x}}_i := \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_d$



**CP (Consensus Problem):** cuando no hay señal de referencia,  $\mathbf{q}_d(t) \equiv 0$ , todos los agentes deben alcanzar un consenso, es decir,  $\lim_{t \rightarrow \infty} |\mathbf{q}_i(t)| = \mathbf{q}_c$  y, además,  $\lim_{t \rightarrow \infty} |\dot{\mathbf{q}}_i(t)| = 0$



**AACP (Approximate Average Consensus Problem):** problema de consenso con  $\mathbf{q}_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{q}_i(0) + \Delta$ , en que  $\Delta \in \mathbb{R}^N$  puede hacerse arbitrariamente pequeño.



## Control adaptativo de redes de robots

### Características

- resuelve los problemas de sincronización y de consenso
- robots con dinámicas diferentes y parámetros desconocidos
- grafo de interconexión conectado (no hace falta que sea balanceado)
- sin retardos o con retardos constantes desconocidos



## Control adaptativo de redes de robots

$\alpha = 1$  para TSP

$\alpha = 0$  para CP

Error generalizado de posición

$$\mathbf{e}_i = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} [\tilde{\mathbf{q}}_i - \tilde{\mathbf{q}}_j(t - T_{i,j})] + \alpha \tilde{\mathbf{q}}_i$$

Señal de sincronización

$$\boldsymbol{\epsilon}_i = \dot{\tilde{\mathbf{q}}}_i + \lambda \mathbf{e}_i$$

Ley de estimación

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}_i = -\boldsymbol{\Gamma}_i \boldsymbol{\Phi}_i^T \boldsymbol{\epsilon}_i$$

Controlador sin retardos

$$\boldsymbol{\tau}_i = \boldsymbol{\Phi}_i(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i, \mathbf{e}_i, \dot{\mathbf{e}}_i) \hat{\boldsymbol{\theta}}_i - \mathbf{D}_i \boldsymbol{\epsilon}_i$$

Controlador con retardos

$$\boldsymbol{\tau}_i = \boldsymbol{\Phi}_i(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i, \mathbf{e}_i, \dot{\mathbf{e}}_i) \hat{\boldsymbol{\theta}}_i - \mathbf{D}_i \boldsymbol{\epsilon}_i - (1 - \alpha) b_i \dot{\mathbf{e}}_i$$

$b_i > 0$



## Control adaptativo de redes de robots



Guadalajara (México) – Barcelona (España)



IOC – UPC Barcelona



## Manipuladores móviles

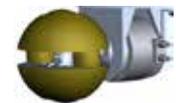
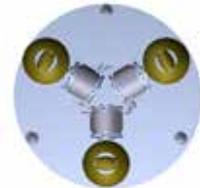


BMM1

Barcelona Mobile Manipulators  
IOC-UPC



BMM2



## Teleoperación de manipuladores móviles





## Teleoperación de manipuladores móviles



Avances en Telerobótica y Redes de Robots

L. Basañez

UNED, 12/05/2015

ROBOTS EN RED

Control adaptativo de redes de robots



## Publicaciones

E. Nuño, L. Basañez, R. Ortega, M. W. Spong (2009). Position tracking for nonlinear teleoperators with variable time-delay. *Int. Jour. Robotics Research*, 28(7):895–910.

Pérez, J. Rosell (2009). A Roadmap to Robot Motion Planning Software Development. *Computer Applications in Engineering Education*, ISSN: 1061-3773

L. Basañez and R. Suárez. "Teleoperation". *Handbook of Automation*, cap. 27, pp. 449-468, Editor S.Y. Nof, Springer, 2009. ISBN: 978-3-540-78830-0

E. Nuño, L. Basañez, R. Ortega. "Control of Teleoperators with Time-Delay: A Lyapunov Approach". *Topics in Time-Delay Systems: Analysis, Algorithms and Control*. pp. 371-381. Springer series Lecture Notes in Control and Information Sciences 388. 2009. ISSN: 0170-8643. ISBN: 978-3-642-02896-0.

E. Nuño, R. Ortega, L. Basañez (2010). An adaptive controller for nonlinear bilateral teleoperators. *Automatica*, 46(1):155–159.

Avances en Telerobótica y Redes de Robots

L. Basañez

UNED, 12/05/2015



## Publicaciones

A. Rodríguez, L. Basañez, J. E. Colgate, E. L. Faulring (2010). A Framework for the Simulation and Haptic Display of Dynamic Systems Subject to Holonomic Constraints. *Int. Jour. Robotics Research*, 29(4): 336-352.

J. Rosell and R. Suárez, F. Penalba. Chapter: "Automatic Determination of Fixturing Points: Quality analysis for different Number of Points and Friction Values". *Frontiers of Assembly and Manufacturing*, pp. 53 - 67. Springer, 2010. ISBN 978-3-642-14115-7.

E. Nuño, L. Basañez, R. Ortega (2011). Passivity-based control for bilateral teleoperation: a tutorial. *Automatica*, 47(3): 485-495.

E. Nuño, R. Ortega, L. Basañez, D. J. Hill (2011). Synchronization of networks of nonidentical Euler-Lagrange systems with uncertain parameters and communication delays. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 56(4): 935-941.

E. Nuño, L. Basañez, R. Ortega. Correction to: An Adaptive Controller for Nonlinear Bilateral Teleoperators. *Automatica*. En prensa. ISSN: 0005-1098.



## Publicaciones

J. Rosell, R. Suárez, A. Pérez. Path planning for grasping operations using an adaptive PCA-based sampling method. *Autonomous Robots*, Volume 35, Number 1, 2013, pages 27-36, ISSN 0929-5593.

L. Colasanto, R. Suárez, J. Rosell. Hybrid Mapping for the Assistance of Teleoperated Grasping Tasks. *IEEE transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems*, Volume 43, Issue 2, 2013, pp. 390-401

E.I Nuño, R. Ortega, B. Jayawardhana, L. Basañez. Coordination of multi- agent Euler-Lagrange systems via energy-shaping: Networking improves robustness. *Automatica*, Volume 49, Issue 10, October 2013, pages 3065-3071, ISSN 0005-1098.

E. Nuño, I. Sarras, L. Basañez. Consensus in Networks of Nonidentical Euler-Lagrange Systems Using P+d Controllers. *IEEE Transaction on Robotics*. Volume 29, Issue 6, December 2013, pages 1503-1508.

E. Nuño, R. Ortega, B. Jayawardhana, L. Basañez. Networking improves robustness in flexible-joint multi-robot systems with only joint position measurements. *European Journal of Control*, V. 19, Issue 6, December 2013, pages 469-476. ISSN: 0947-3580



## Publicaciones

E. Nuño, L. Basañez, C. López-Franco and N. Arana-Daniel. Stability of Nonlinear Teleoperators Using PD Controllers Without Velocity Measurements. *Journal of the Franklin Institute*, Volume 351, Number 1, 2014, Pages 241-258, ISSN 0016-0032

J. Rosell, P. Cabras. A three-stage method for the 3D reconstruction of the tracheobronchial tree from CT scans. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, Volume 37, Issues 7-8, October-December 2013, pages 430-437, ISSN 0895-6111.

I. Sarras, E. Nuño and L. Basañez. An Adaptive Controller for Nonlinear Teleoperators with Variable Time-Delays. *Journal of the Franklin Institute*, Volume 351, Number 10, 2014, Pages 4817-4837, ISSN 0016-0032.

E. Nuño, I. Sarras, L. Basañez and M. Kinnaert. Control of Teleoperators with Joint Flexibility, Uncertain Parameters and Time-Delays. *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 62, Number 12, 2014, Pages 1691-1701, ISSN 0921-8890.

C. Aldana, E. Nuño, L. Basañez, E. Romero. Operational space consensus of multiple heterogeneous robots without velocity measurements. *Journal of the Franklin Institute*, Volume 351, Number 3, 2014. Pages 1517–1539, ISSN 0016-0032.



## Publicaciones

C. Aldana, E. Romero, E. Nuño, L. Basañez. Pose consensus in networks of heterogeneous robots with variable time-delays. *Journal of Robust and Nonlinear Control*. In press, ISSN 1099-1239, doi: 10.1002/rnc.3200.

C. Aldana, E. Romero, E. Nuño, L. Basañez. Operational Space Consensus in Networks of Robots: The Leader-Follower Case. In M. A. Armada, A. Sanfeliu, M. Ferre (Eds.), *ROBOT2013: First Iberian Robotics Conference*, Volume 253, 2014, Pages 585–599, Springer International Publishing, ISBN 978-3-319-03652-6.