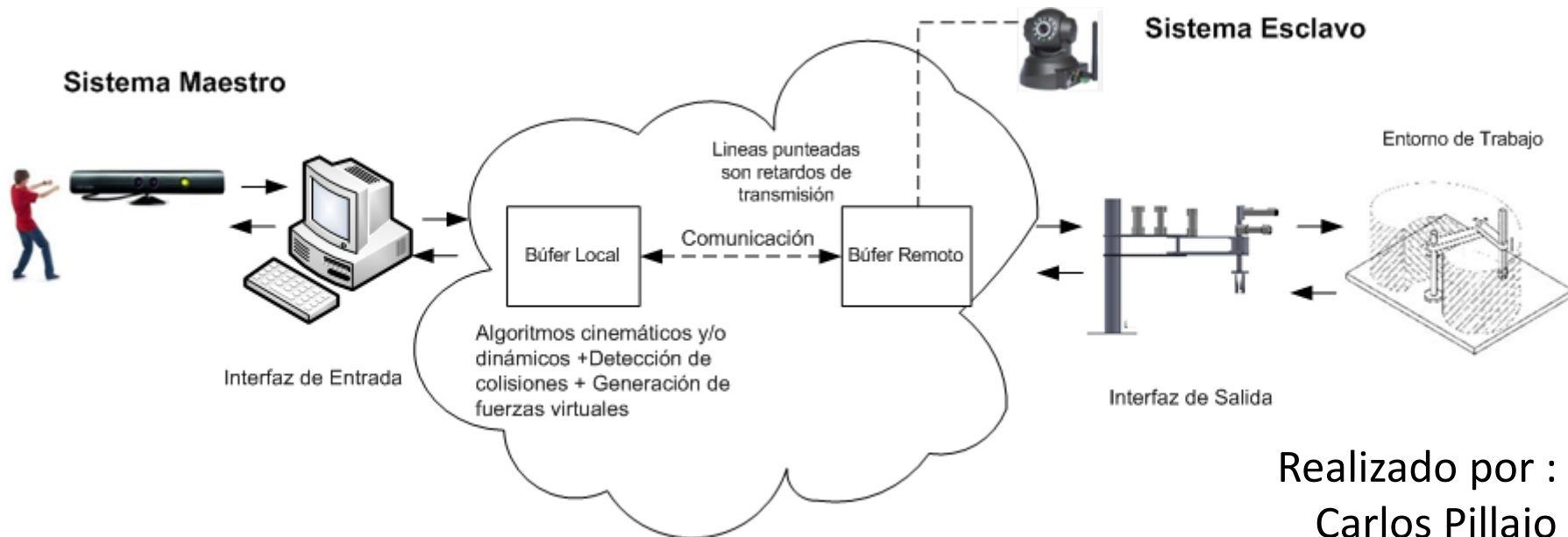


## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA A INVESTIGAR

PhD Javier Sierra

# Control Robusto de Sistemas Teleoperados con Retardos Variables en la Transmisión



Realizado por :  
Carlos Pillajo

La teleoperación es la extensión de las capacidades sensoriales y de destreza humana que afecta el espacio en una localización remota.

Tele-manipulación = Operador – Distancia – Manipulador

Tele-guiado = Operador – Distancia – Vehículo

Tele-actuación = Operador – Comandos – Actuadores

Tele-robotica = Forma evolucionada de teleoperación, es el aumento de la autonomía del sistema remoto

Métodos	1. Control Manual
	2. Control Supervisor
Tele-roboticos	1. Control Automático

Nace de debido al manejo de materiales altamente peligrosos para el ser humano

La tele-rrrobótica pretende integrar las habilidades de los Humanos con las de los robots, aumentando la s capacidades de alguno de ellos

Supera las limitaciones del Ser Humano como : Espacio-Tiempo, Potencia, Seguridad

Supera las limitaciones del Robot como: Conocimiento-Razonamiento, planificación

La elección del tipo de intefaz puede ser una decisión de éxito de la teleoperación en presencia de retardos.

---

Pueden causar inestabilidad en los sistemas teleoperados

- Retardos > 250 mseg -> la teleoperación basada en realimentación de esfuerzos es mas difícil
  - Retardos > 400 mseg. -> el error se hace mas significativo y se necesita de técnicas específicas
  - Retardos > 500mseg. -> se utiliza pantallas predictivas
  - Retardos > 1000mseg. -> Se tiene que dotar de mayor autonomía al sistema remoto y se trabaja con instrucciones de alto nivel.
-

## Teleoperación Directa

Es disponer de objetos que se puedan manipular directamente para indicar movimiento , Ejemplos : Joystic, pulsadores, botones, etc.

En la teleoperación directa se puede controlar las siguientes **variables**:

- a. Control de Variable Posición.-** El sistema maestro envía referencias que indican posiciones articulares en el manipulador remoto.
  - b. Control de la Variable Velocidad:** El sistema maestro envía referencias variables en el tiempo al sistema remoto, este modo es mas sensible a retardos de comunicación.
  - c. Control de la Variable de Esfuerzos:** En este modo el sistema maestro recibe realimentación al operador mediante reflexión de esfuerzos.
-

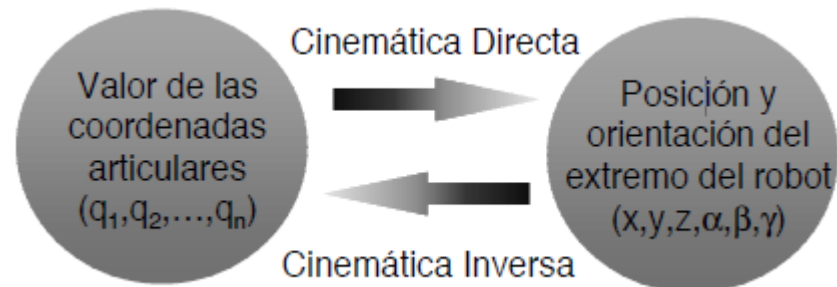
Estudio del movimiento sin importar las fuerzas que lo producen, estudio de su movimiento con respecto a un sistema de referencia

- Descripción analítica del movimiento espacial en función del tiempo
- Relaciones de localización del extremo del robot-valores articulares

**Problema cinemático directo:** Determinar la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de coordenadas de referencia, conocidos los ángulos de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot

**Problema cinemático inverso:** Determinar la configuración que debe adoptar el robot para una posición y orientación del extremo conocidas

**Modelo diferencial (matriz Jacobiana):** Relaciones entre las velocidades de movimiento de las articulaciones y las del extremo del robot



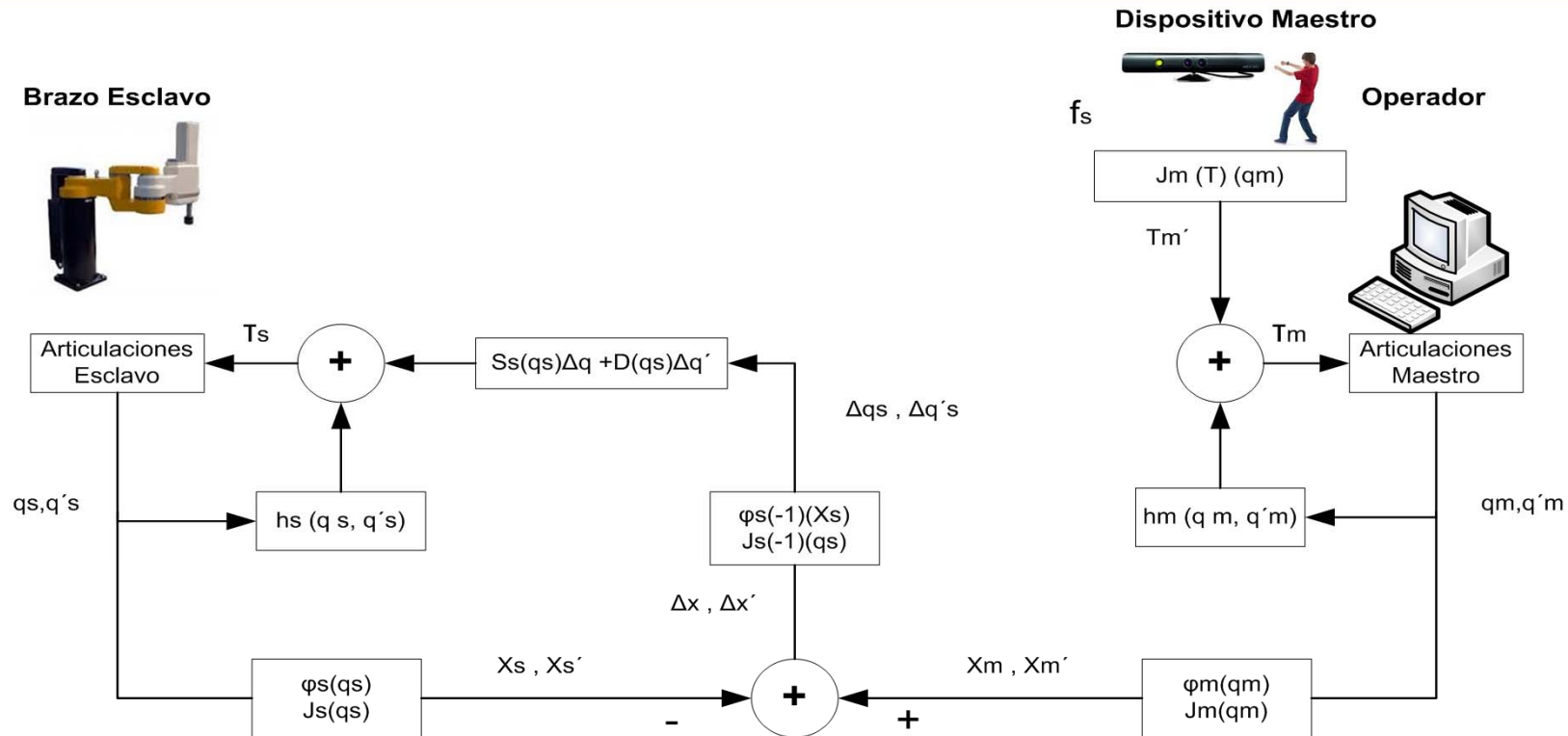


Figura 4. Sistema teleoperador de fuerza cuando el dispositivo maestro y el brazo esclavo son cinemáticamente diferentes

Si hay retardos importantes, entonces los esquemas bilaterales tienden a fallar, se debe emplear realimentación predictiva de esfuerzos empleando modelos de las iteraciones del robot.

Por lo tanto, se utiliza técnicas de acomodación activa usando realimentación sensorial local.

Por lo tanto, se utiliza técnicas de acomodación activa usando realimentación sensorial local.

El termino control de impedancias es usa para indicar que el extremo del robot reacciona ante fuerzas externas.

$$\widetilde{M}_x \ddot{x} + D_x (\dot{x}_d - \dot{x}) + S_x (x_d - x) = f$$

Donde  $\widetilde{M}_x, D_x, S_x$  son las matrices de masa, fricción y rigidez en el espacio de trabajo, y  $\dot{x}_d, x_d$  denotan el movimiento deseado. La dinámica del robot en el espacio cartesiano viene dada por la ecuación:

$$M_x(q)\ddot{x} + h_x(q, \dot{q}) = (J^T)^{-1}\tau + f$$

La teleoperación con reflexión de esfuerzos proporcionan un medio natural de realimentación al operador muy adecuado para aplicaciones donde es necesario la sensación de Tele presencia.

---



Los sistemas de Teleoperación mas avanzados necesitan de técnicas telerrobóticas que aporten nuevas formas de realimentación al operador , así como nuevas capacidades de decisión y actuación autónomas que consiguen sistemas de teleoperación más eficientes, fiables a retardos en la comunicación

Los sistemas telerrobóticos combinan la autonomía con la teleoperación.

Técnicas para reducir problemas debido al retardo.

- Simulaciones predictivas --> Provee herramientas para la teleoperación directa.
  - Desacoplo de Tiempo-Espacio --> Se utilizan cuando los retardos son significativos
  - Control Supervisor
  - Teleprogramación.
-

Cuando existen retardos en la transmisión se emplean técnicas que no utilizan realimentación de esfuerzos sino que emplean solamente realimentación visual.

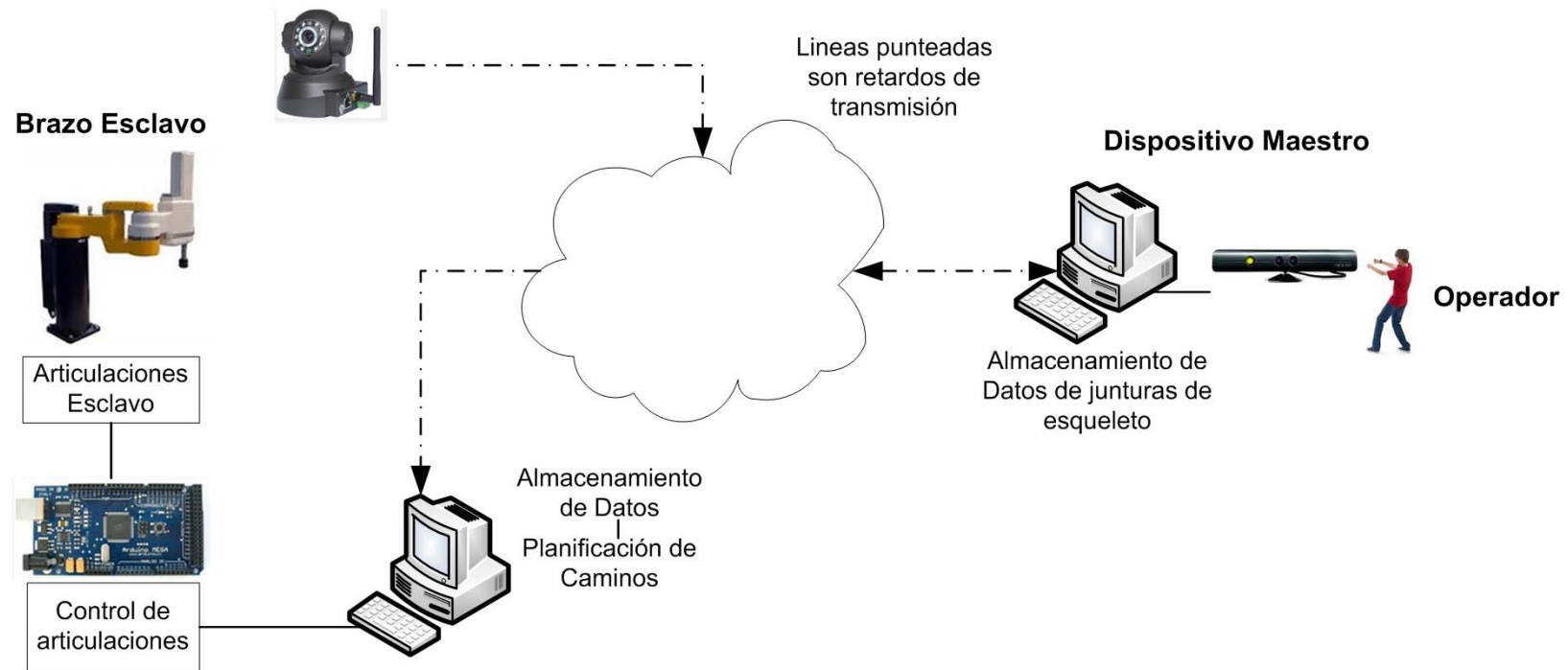


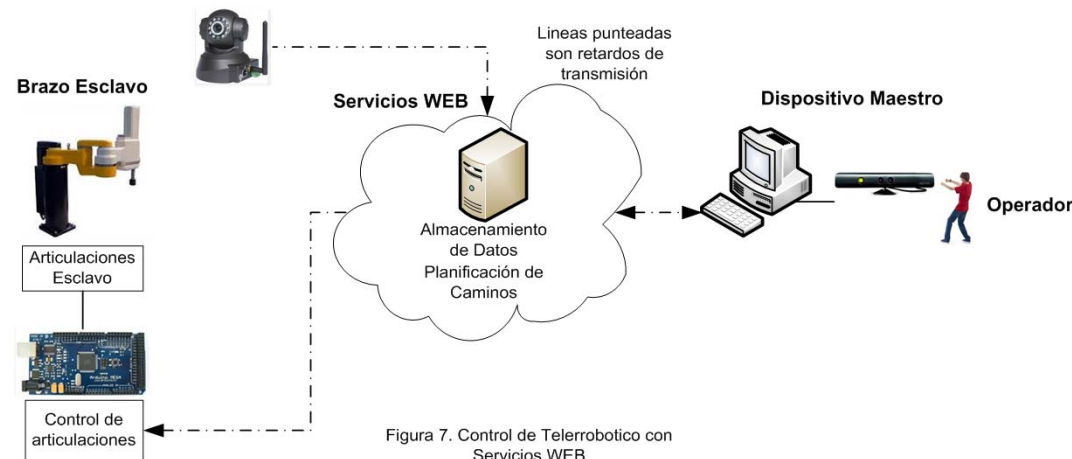
Figura 6. Control de Telerrobotico

En la autonomía supervisada, las órdenes de ejecución autónoma son generadas por el operador humano y enviadas para su ejecución al robot

Dado que el robot es un sistema dotado de una computadora capaz de recibir, almacenar y ejecutar órdenes utilizando sus propios sensores y actuadores, no hay retardo significativo en su lazo de control local remoto, por lo que no hay inestabilidad causada por el retardo de comunicación.

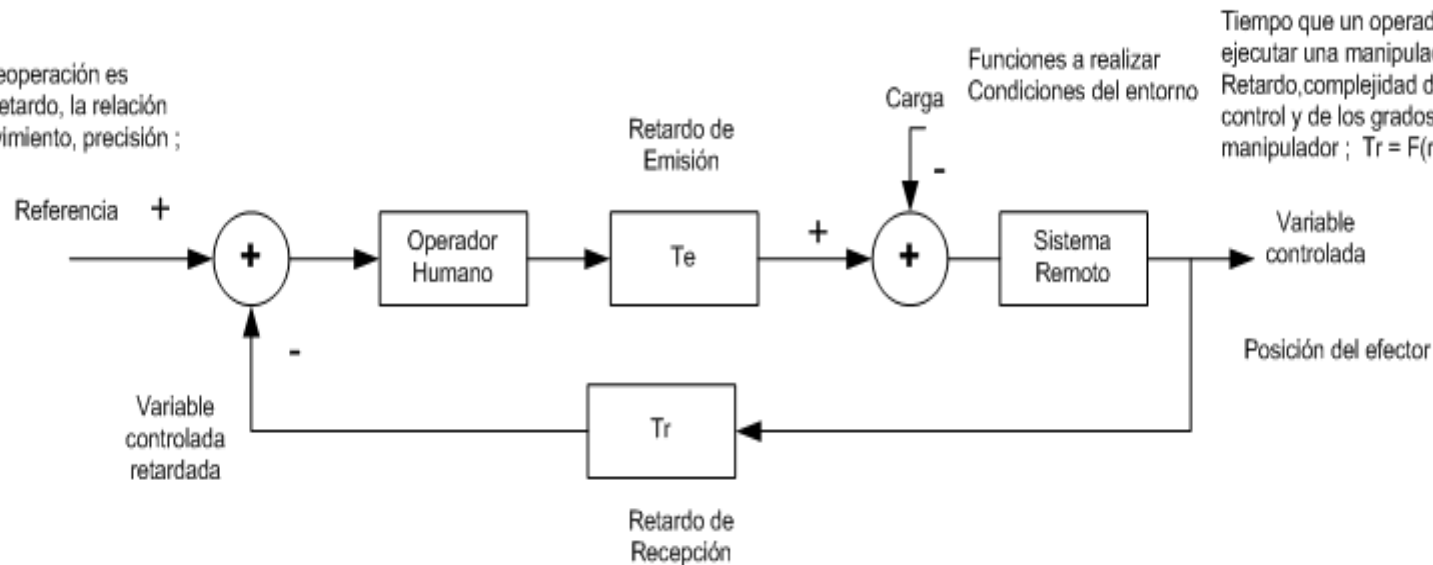
Puede haber retardo en el lazo supervisor, este retardo es aceptable si:

- El retardo es menor que el tiempo de ejecución de la tarea.
- La instrucción es una gran parte de la tarea completa
- Los aspectos no predecibles del entorno no cambian de forma muy rápida.
- El sistema automático remoto es fiable.

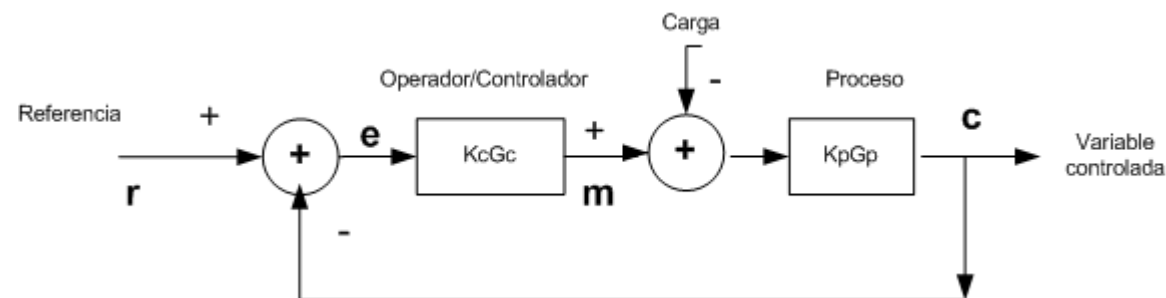


Una operación típica de un operador humano en un sistema de teleoperación es la de controlar el valor de una variable de un sistema remoto haciendo que ésta se mantenga tan cerca como sea posible de los valores de referencia

El rendimiento de la teleoperación es función predecible del retardo, la relación entre distancias de movimiento, precisión ;  
 $\eta = F(r_t, \Delta x, \Delta x / \Delta t)$



Tiempo que un operador humano tarda en ejecutar una manipulación es función de:  
Retardo, complejidad de la tarea, esquema de control y de los grados de libertad del manipulador ;  $T_r = F(r_t, C_t, e_qCtrl, GDL)$



Si la ganancia del lazo de control en un sistema de teleoperación es mayor que la unidad en dicha frecuencia, se produce un efecto de realimentación positiva, en lugar de negativa, con lo que el sistema de control se hace inestable. El problema es que normalmente esta ganancia debe ser mayor que la unidad en dichas frecuencias si se quiere anular el error.

Hay que considerar que los parámetros dinámicos del proceso, incluyendo el retardo de comunicación, no son modificables, el operador debe reducir su ganancia a medida que aumenta la frecuencia del error, o bien intentar reducir dicha frecuencia.

- Para facilitar el análisis de estabilidad se supone que el comportamiento del operador humano es lineal,
  - la estabilidad está determinada por los polos del sistema (raíces de la ecuación característica), los cuales deben tener partes reales negativas para que el sistema sea estable.
  - La presencia de una función de retardo puro (en el dominio de Laplace  $e^{-sT}$ ) en la ecuación característica produce un número infinito de raíces.
-

Modelo simplificado de la tarea de teleoperación de contacto con regresión de esfuerzos

Se modela la respuesta en lazo cerrado del lugar remoto al cambio en las referencias como un sistema mecánico de segundo orden.

$$G(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + bs}$$

### Condición de Estabilidad.

Considérese la estabilidad en lazo cerrado del sistema según el criterio de Nyquist, si no existen ceros o polos inestables en la función de transferencia en bucle abierto  $G(s) \cdot H(s)$ , la condición de estabilidad consiste en que al aumentar la frecuencia, el diagrama polar de dicha función de transferencia en el plano complejo no rodee el punto  $-1+0j$  en dicho plano complejo.

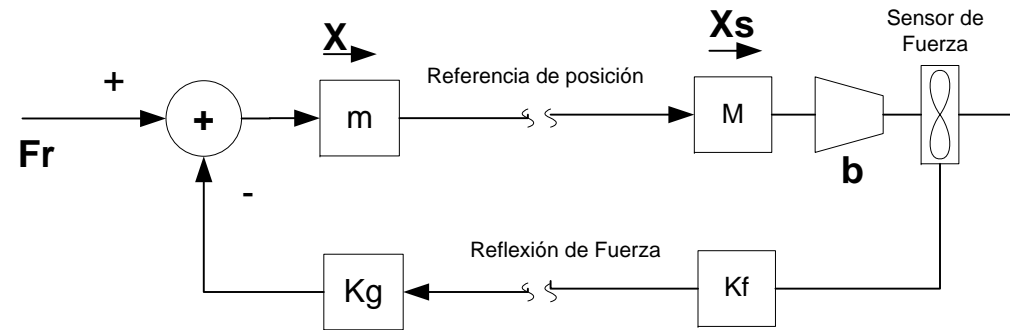


Figura 10 a. Teleoperación directa simplificada

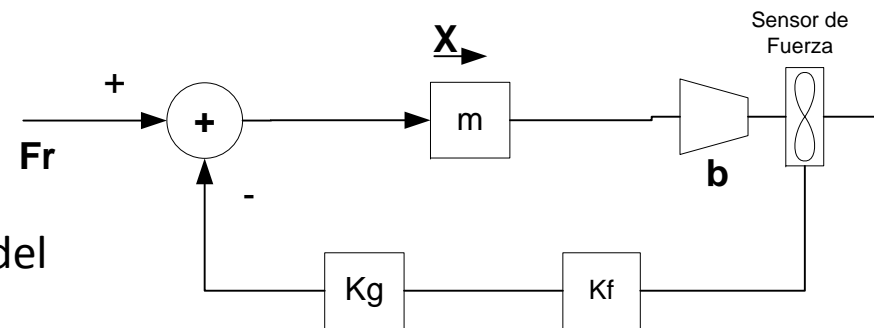


Figura 10 b. Modelo de análisis

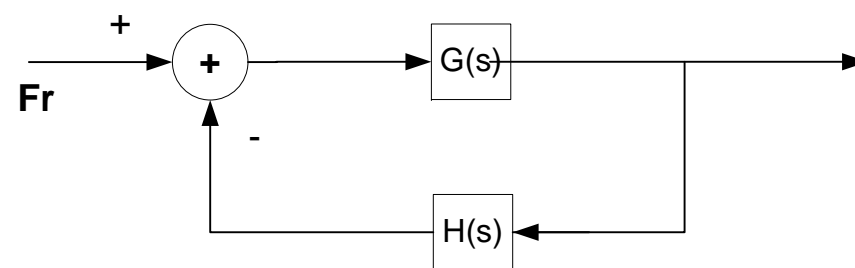


Figura 10 c. Sistema en lazo cerrado

**Teleoperación** .- comprende el conjunto de tecnologías que posibilitan a un operador gobernar un dispositivo remoto mediante el control de un dispositivo local.

Un sistema teleoperado básicamente se compone de un dispositivo maestro y un sistema esclavo.

En sistemas teleoperados avanzados, para mejorar la comunicación del operador con el sistema remoto, se utilizan **interfaces de lenguaje natural** que permiten al operador comandar el sistema.

Asimismo en ocasiones se mejora la interfaz visual incorporando gráficos generados por computador, creándose lo que se denomina *realidad aumentada* [Azuma-97].

Para la comunicación de señales entre el entorno local y el entorno remoto es necesario utilizar canales de comunicación que posean el ancho de banda adecuado. **Cuando la distancia entre el entorno local y el entorno remoto sea excesivamente elevada o el canal no posibilite una velocidad de transmisión alta, aparecerán retardos en la comunicación que deberán ser considerados para el control del sistema teleoperado.** Habitualmente en los sistemas de teleoperación avanzados se utiliza un computador en la zona local y otro en la zona remota para procesar el flujo de señales así como para otros fines (procesamiento lenguaje natural, realidad aumentada,...) [Reinoso-01].

---

## Control en Teleoperación sin retardo.

El primer control utilizado en los sistemas teleoperados fue de tipo unilateral. En este control no existe realimentación desde el esclavo hacia el maestro. Sólo se realiza el control en un sentido, desde el maestro hacia el esclavo. El maestro genera las señales de referencia, de posición o velocidad, para los lazos de control de las articulaciones del esclavo. A este tipo de control también se le denomina control en lazo abierto.

En el control bilateral existen variables de control en el sentido del maestro al esclavo y en el sentido del esclavo al maestro

El control de sistemas teleoperados puede clasificarse en:

- Control independiente [Vertut-85]. En el control independiente el maestro en el mismo instante sólo puede generar señales de referencia a una articulación del esclavo.
  - Control integrado, el maestro genera las señales de referencia de uso simultáneo en todos los bucles de control del esclavo.
  - Control en posición o en velocidad. En esta clasificación se distingue el control según las señales que genera el maestro para controlar el esclavo.
-

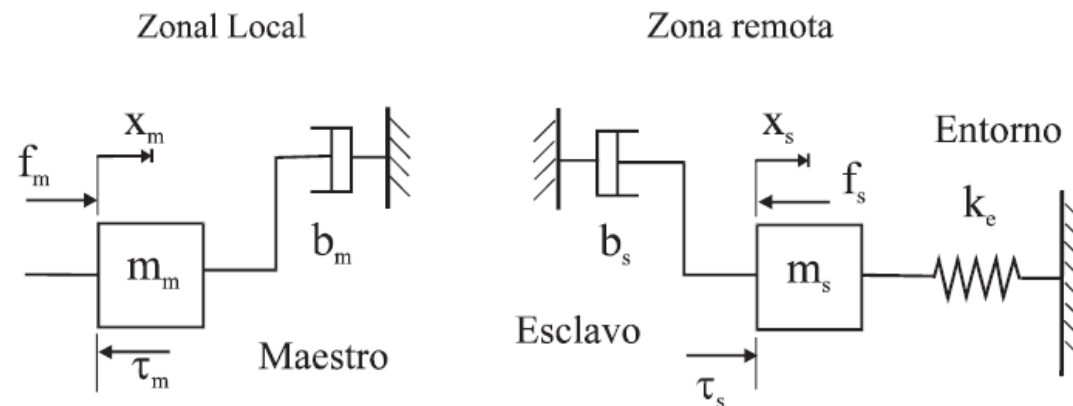


En concreto se van a detallar los esquemas de control bilateral :

- posición – posición,
- fuerza – posición
- presión – posición.

Para describir estos esquemas de control se va a considerar un modelo simplificado lineal de sistema teleoperado de un grado de libertad [Yokokohji-92].

En este modelo se considera el maestro, el esclavo y el entorno, por el contrario no se tiene en cuenta el operador. [Este modelo es válido para los tres esquemas de control bilateral clásicos.](#)



Las ecuaciones que rigen la dinámica del sistema teleoperado, sin considerar las fuerzas generadas en los actuadores del maestro y del esclavo, que vendrán determinadas por la ley de control empleadas, son:

$$f_m - \tau_m = m_m \ddot{X}_m + b_m \dot{X}_m \quad (1)$$

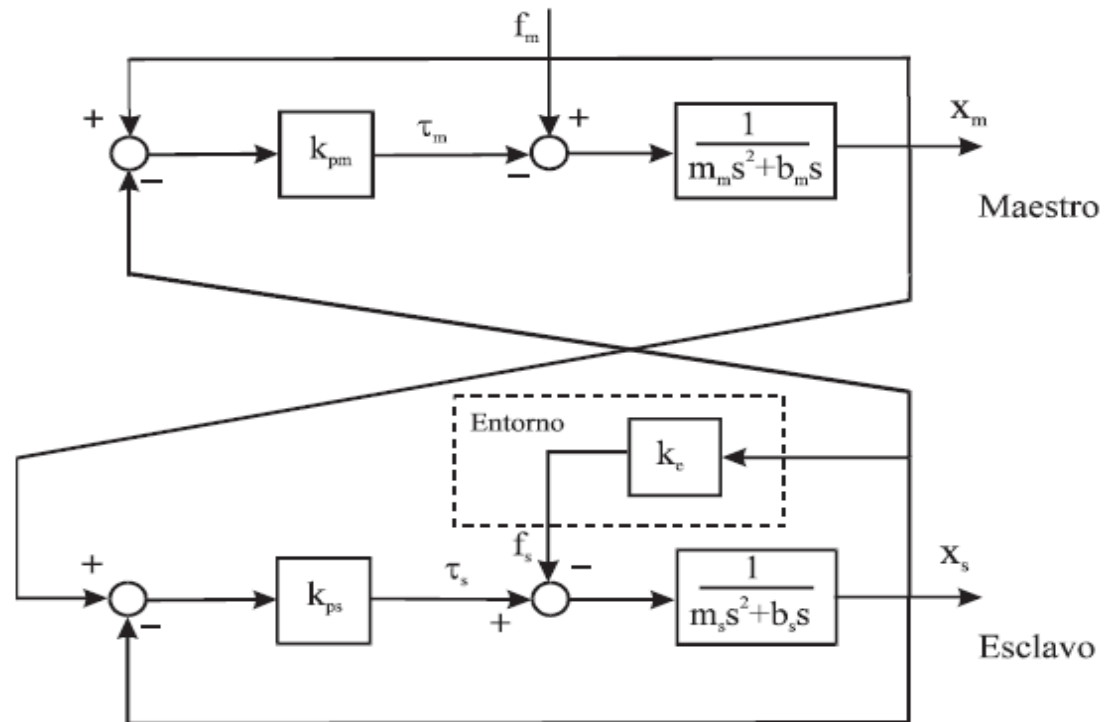
$$\tau_s - f_s = m_s \ddot{X}_s + b_s \dot{X}_s \quad (2)$$

$$f_s = k_e X_s \quad (3)$$

### Control posición – posición

$$\tau_m = k_{pm}(X_m - X_s) \quad (4)$$

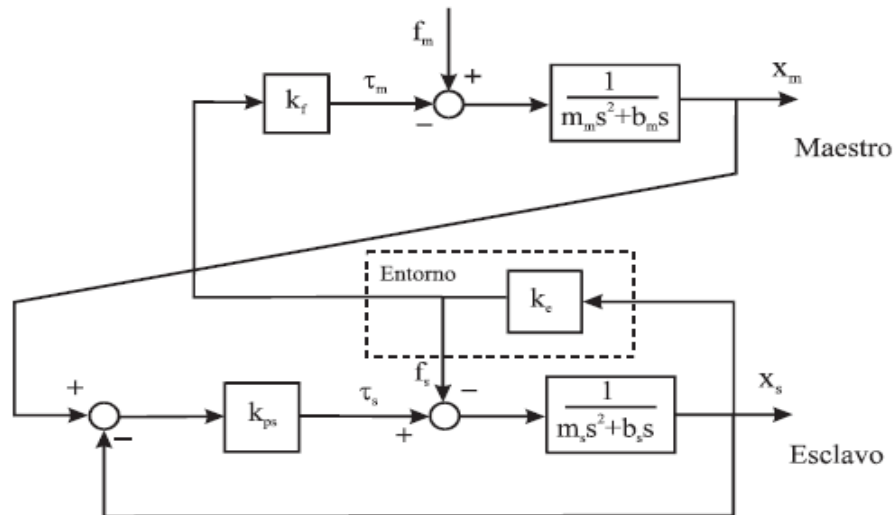
$$\tau_s = k_{ps}(X_m - X_s) \quad (5)$$



### Control fuerza – posición

$$\tau_m = k_f f_s \quad (6)$$

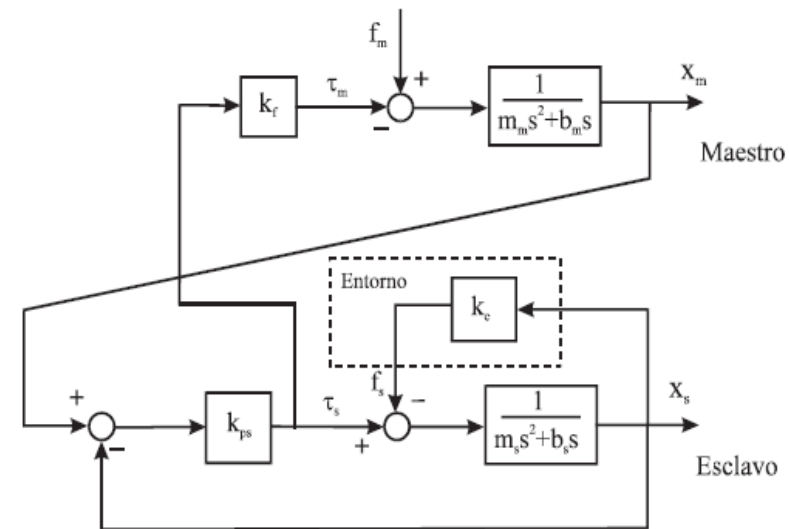
$$\tau_s = k_{ps} (X_m - X_s) \quad (7)$$



### Control presión – posición

$$\tau_m = k_f \tau_s \quad (8)$$

$$\tau_s = k_{ps} (X_m - X_s) \quad (9)$$



## El problema de la inestabilidad con retardos

La existencia de un retardo en un sistema de control en lazo cerrado afecta de forma negativa a la estabilidad del mismo. Para anular el error entre la referencia y la salida del sistema, la mayoría de sistemas utilizan una realimentación negativa y una ganancia mayor a la unidad en el rango de frecuencias de interés. Sin embargo, si la ganancia es mayor a la unidad en una frecuencia tal que el retardo es igual a la mitad de un ciclo, esto provocará que la realimentación sea positiva en lugar de negativa, de forma que la energía en esa frecuencia se estará continuamente sumando al lazo, y la amplitud del sistema crecerá sin límite, inestabilizándose el sistema. Por lo tanto, si se trabaja a frecuencias inferiores a aquella en la que el retardo es igual a la mitad de un ciclo, la ganancia será inferior a la unidad, y el sistema será estable [Sheridan-93].

## Retardos en la realimentación de información visual

En los sistemas de control unilateral una solución ampliamente utilizada es lo que se conoce como visualizadores predictivos (*predictor display*).

Los anteriores visualizadores predictivos utilizaban un modelo cinemático para obtener la configuración del manipulador virtual

---

L. Conway *et al.* extendieron la idea de los visualizadores predictivos en lo que denominaron desincronización espacial y temporal (*time and position clutching*) [Conway-90]. La desincronización espacial y temporal parten de la idea de que el visualizador predictivo no tiene por qué estar sincronizado con la tarea real

Los visualizadores predictivos, así como las técnicas de desincronización espacial y temporal, se enmarcan dentro de lo que se conoce como **teleprogramación** [Funda-91].

Por otro lado la desincronización espacial permite probar comandos en el simulador para comprobar su funcionamiento, sin la necesidad de enviarlos al robot remoto.

Una forma de evitar la problemática de los retardos en teleoperación es utilizar lo que se denomina *control supervisado* [Sheridan-92].

En este control, el operador, en lugar de estar dentro del bucle de control del sistema teleoperado comandando en todo momento al robot, indica la tarea que debe hacer el robot remoto, de forma que únicamente se encarga de supervisar la realización de la tarea.

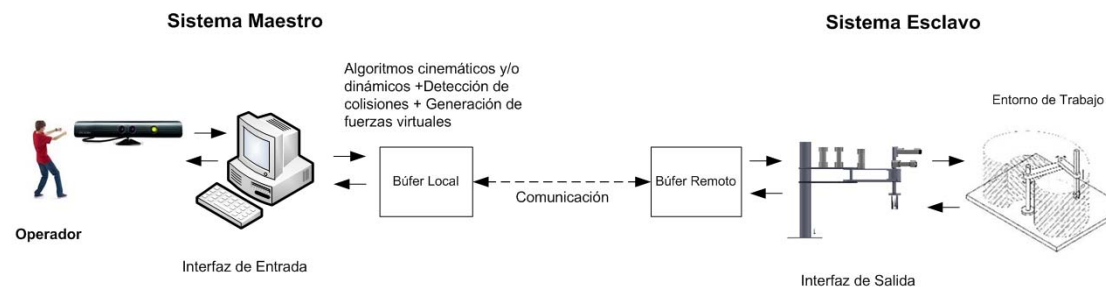
### **Retardos en la realimentación de información cinestésica**

En el control bilateral de sistemas teleoperados existe una realimentación de la fuerza de interacción del esclavo con el entorno hacia el maestro.

---

Se han propuesto diversas alternativas para solucionar el problema originado por la realimentación de fuerza retardada. La más simple consiste en mostrar la realimentación de fuerza de forma visual, aunque en este caso no se trata de un esquema de control bilateral.

Una opción muy utilizada cuando existen retardos importantes en la comunicación es utilizar visualizadores predictivos con generación de fuerzas virtuales. De este modo se realimenta al operador en tiempo real la fuerza virtual. Para realimentar fuerzas al operador de forma virtual es necesario utilizar algoritmos de detección de colisiones [Bon-97] y algoritmos de generación de fuerzas virtuales [Bergamasco-95] [Colgate- 94]. Una característica deseable en los algoritmos de detección de colisiones y generación de fuerzas virtuales es que sean precisos y de bajo coste computacional.



### Control bilateral basado en pasividad

R. J. Anderson y M. W. Spong propusieron un sistema de control bilateral con reflexión de fuerzas que es estable independientemente del retardo existente en la comunicación basándose en el concepto de pasividad [Anderson-89]. Basándose en la teoría del cuadripolo (*two-port approach*) [Raju-89] y utilizando la teoría de la pasividad y la teoría de dispersión (*scattering*), demuestran la estabilidad del sistema independientemente del retardo. La teoría de pasividad indica que un sistema es estable si es pasivo, y para ser pasivo debe disipar energía, nunca incrementar la energía. Un sistema es pasivo si y sólo si la norma de su operador de dispersión (*scattering*) es menor o igual a uno.

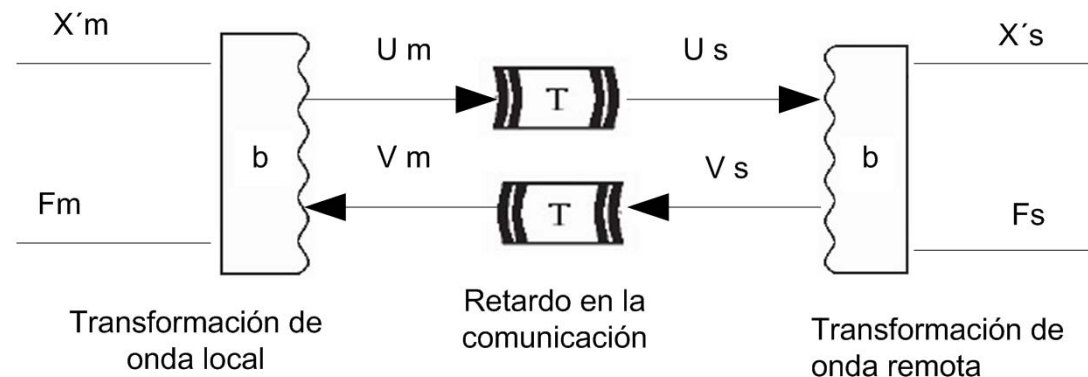
Demostraron que la causa de inestabilidad en los sistemas teleoperados con retardos se debe a que la aparición de retardos transforma el bloque de comunicación entre la zona local y la remota en un elemento no pasivo. Para solucionar el problema de la inestabilidad definen una ley de control que garantiza la pasividad del bloque de comunicación independientemente del tiempo de retardo. Para ello buscan que las características del bloque de comunicación sean idénticas a las de una línea de transmisión sin pérdidas. De este modo se asegura la pasividad del sistema y, por tanto, la estabilidad con retardos en la comunicación.

---

## Control bilateral basado en variables de onda

G. Niemeyer y J.-J. E. Slotine introdujeron el concepto de variables de onda [Niemeyer-91] [Niemeyer-96] efectuando una reformulación del formalismo de pasividad propuesto por R. J. Anderson y M. W. Spong [Anderson-89]. Los autores demuestran que la pasividad de las variables de onda es robusta a retardos en la comunicación de forma que proponen realizar la comunicación en un sistema teleoperado directamente en el dominio de la variable de onda.

Las variables de onda permiten codificar la información de velocidad y de fuerza.



La razón de introducir las variables de onda se debe a su efecto en la pasividad del sistema. Los autores demuestran que los sistemas expresados en variables de onda son pasivos y por lo tanto estables ante cualquier tiempo de retardo.

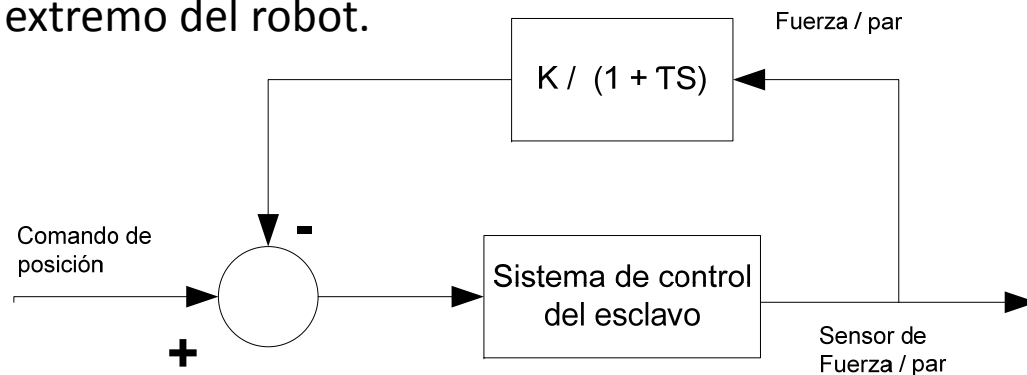


## Control bilateral acomodaticio compartido

W. S. Kim *et al.* propusieron un esquema de control acomodaticio compartido (*shared compliant control*) para solucionar la problemática de la aparición de retardos en los sistemas teleoperados [Kim-92].

En un esquema de control bilateral convencional, cada articulación está servocontrolada en posición con una rigidez del servo elevada. Esto provoca que el robot sea propenso a colisionar fuertemente con objetos del entorno. Con un control acomodaticio se consigue suavizar las fuerzas de contacto del robot con el entorno, de forma que el robot tiene un comportamiento más suave con el entorno, acomodándose a las restricciones del entorno.

La acomodación activa consiste en modificar el comando de posición del robot mediante cálculos por computador que utilizan las fuerzas de contacto obtenidas a partir de un sensor de fuerza/par situado en el extremo del robot.



## Control bilateral con telemonitorización

S. Lee y H. S. Lee presentaron un esquema de control bilateral en el que se utiliza una fuerza de realimentación denominada de *telemonitorización* para solucionar la problemática de los retardos [Lee-93]. Los autores además implementan un control de impedancia generalizado para modificar las características dinámicas del maestro y del esclavo.

Con el esquema de telemonitorización que proponen consiguen un funcionamiento óptimo del sistema teleoperado asegurando la estabilidad del sistema hasta un determinado retardo máximo.

Para solucionar el problema de la incertidumbre del operador y optimizar el funcionamiento del sistema teleoperado asegurando la estabilidad sólo hasta retardos pequeños (hasta 3 s), los autores proponen realimentar al maestro lo que llaman fuerza de *telemonitorización*. La fuerza de telemonitorización ( $f_{ref}$ ) corresponde a una combinación lineal de dos fuerzas, la fuerza debida al error de posición ( $f_{rp}$ ) y el error de fuerza ( $e_f$ ):

$$f_{ref} = e_f - f_{rp} \quad (25)$$

## Control optimizado para transparencia

D. A. Lawrence presentó una arquitectura general de teleoperación para analizar y comparar diversos esquemas de teleoperación en términos de las propiedades de transparencia y estabilidad cuando existen retardos, proponiendo una nueva arquitectura optimizada para transparencia [Lawrence-93]. El autor analiza la estabilidad y transparencia del control bilateral posición – posición, del control fuerza – posición, y del control basado en pasividad [Anderson-89]. La transparencia es una propiedad que mide el acoplamiento del operador con el entorno, es decir, cuantifica de qué forma el operador siente que está interactuando con el entorno [Raju-89].

---

---

## Control bilateral adaptativo de movimiento/fuerza garantizando estabilidad

W. H. Zhu y S. E. Salcudean desarrollaron un esquema de control bilateral adaptativo de movimiento/fuerza para sistemas teleoperados con retardos [Zhu-00]. El método que proponen puede ser aplicado tanto en control en posición como en control en velocidad. Consideran un modelo del entorno incorporado en la dinámica del esclavo, y un modelo del operador incluido en la dinámica del maestro. El maestro y el esclavo poseen controladores adaptativos de movimiento/fuerza independientes que asumen límites de incertidumbre en los parámetros.

---

## Esquemas de control bilateral de sistemas teleoperados con retardo variable

---

En los sistemas teleoperados tradicionales para efectuar la comunicación entre el maestro y el esclavo se utiliza un medio de transmisión privado, por ejemplo un satélite de comunicaciones, un cable de comunicación privado, un canal de radio privado,... En estos casos puede considerarse que existe un retardo en la comunicación constante [Kosuge-96a].

Actualmente el desarrollo de las redes de computadores, como por ejemplo Internet, ha potenciado su uso como medio de transmisión en los sistemas teleoperados. Los sistemas teleoperados que utilizan redes de computadores son más baratos y flexibles en comparación a los que utilizan canales de comunicación privados. Sin embargo, en estos sistemas el retardo existente en la comunicación no es constante, sino que varía en función de la carga de la red. Los esquemas de control bilateral que se utilizan cuando el retardo en la comunicación es constante no son aplicables cuando el retardo es variable. En [Kosuge-96a] se muestran simulaciones donde se verifica que, el esquema basado en pasividad [Anderson-89], que es estable para cualquier retardo constante, se vuelve inestable en el caso de que el retardo sea variable.

---

Oboe y P. Fiorini [Oboe-97] presentaron un entorno para el diseño, simulación y control de sistemas bilaterales teleoperados que utilizan Internet como medio de transmisión. Además, a partir de los parámetros identificados del retardo, diseñaron un controlador que incluía un estimador casi-óptimo (*quasi-optimal estimator*) para compensar pequeñas pérdidas de datos. K. Brady y T.-J. Tarn [Brady-98] realizaron una **formulación de los sistemas teleoperados en el espacio de estados** teniendo en cuenta la naturaleza variable del retardo, proponiendo una arquitectura de **control supervisado**. A. Sano *et al.* [Sano-98] diseñaron controladores para sistemas teleoperados basándose en la teoría de control óptimo  $H_\infty$ . J. Kikuchi *et al.* [Kikuchi-98] también utilizaron el método del retardo virtual para mantener el retardo constante, así como un visualizador predictivo para estimar el comportamiento del entorno remoto. G. Niemeyer and J.-J. E. Slotine [Niemeyer-98] demostraron que la estabilidad de sistemas bilaterales teleoperados con retardo en la comunicación variable puede ser preservada mediante el uso de filtros de variables de onda. Y. Yokokohji *et al.* [Yokokohji-99] indicaron que el uso de variables de onda (*wave variables*) [Niemeyer-91], al mantener la pasividad del sistema, degrada el funcionamiento del sistema, por lo que **propusieron añadir al esquema basado en variables de onda un bloque de compensación en el maestro y en el esclavo para minimizar la degradación.**

---

Sin embargo este sistema de control puede potencialmente generar energía infinita en determinadas situaciones, de forma que la estabilidad no puede ser asegurada. **Para solucionar este problema**, Y. Yokokohji *et al.* [Yokokohji-00] introdujeron un mecanismo de monitorización de balance de energía para limitar la energía que el sistema puede generar, y de este modo, asegurar la pasividad del sistema. J.-H. Park and H.-C. Cho [Park-99] presentaron un **sistema de control bilateral formado por un controlador modificado en modo deslizante** (*sliding-mode controller*) **en el esclavo** [Buttolo-94], **con el que se compensan los efectos del retardo variable**, y un controlador de impedancia en el maestro. Lozano *et al.* [Lozano-02] insertaron **en el esquema de variables de onda** [Niemeyer-91] **una ganancia variable para garantizar la pasividad con retardos variables** y, además, un saturador de velocidad en el esclavo para mejorar la capacidad de seguimiento del sistema

---

### **Se propone un Control Robusto de Sistemas Teleoperados con retardos variables en la transmisión de entrada**

Considere la posibilidad de un sistema lineal escalar con una incertidumbre paramétrica dentro a priori límites conocidos. ¿Cómo se podría diseñar una ley de control de estabilización robusta en presencia de un retardo de entrada arbitrariamente larga pero conocida? Si se intenta utilizar una ley de realimentación predictor de alta ganancia, este enfoque sería un fracaso ya que el modelo de los sistemas no es conocido para calcular el factor de predicción del estado. Este simple ejemplo revela el hecho de que los problemas de control que se puede resolver con las herramientas de diseño existentes para los sistemas de los retrasos son limitados en comparación con los problemas que se han resuelto para los sistemas de dimensión finita. **Para atacar este tipo de problemas en los sistemas de retardo se debe primero mirar en las técnicas que se extienden originalmente desarrollados para sistemas de dimensión finita a dimensión infinita.** Además, ya que los nuevos diseños de dimension infinita deben siempre ir acompañados con una funtional Lyapunov, **se podría tratar de diseñar leyes de control robusto para sistemas de retardo variable utilizando técnicas de rediseño de Lyapunov.**

---



