

# TELEOPERACIÓN

Rafael Aracil  
Departamento de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática Industrial  
Universidad Politécnica de Madrid

## 1 INTRODUCCIÓN

La teleoperación, como herramienta para la realización de tareas en lugares remotos ha estado presente siempre en el desarrollo de la Robótica. De hecho las primeras realizaciones en robótica se centraron en el desarrollo de robots teleoperados para la manipulación de sustancias peligrosas. Desde entonces han sido numerosos los desarrollos específicos en este campo.

En la actualidad, el desarrollo de los sistemas de transmisión de datos y de comunicaciones basados en la red permite utilizar este medio como instrumento de conexión del operador con los lugares remotos, donde se deben realizar las tareas, y con ello, ampliar la gama de posibilidades de aplicación de los sistemas teleoperados.

Son frecuentes la divulgación de noticias relativas al uso de este tipo de sistemas en diferentes aplicaciones. Por ejemplo en medicina, con lo que se denomina telecirugía, en la realización de tareas en el espacio, en mantenimiento de determinados sistemas que operan en lugares contaminados, peligrosos o inaccesibles, etc.

En el campo de la enseñanza a distancia también los sistemas teleoperados ofrecen una amplia variedad de posibilidades de utilización. En primer lugar hay que destacar las aportaciones de los sistemas teleoperados como herramienta metodológica para un entorno de enseñanza virtual en el que la teleoperación debe ser una herramienta básica. Igualmente estos sistemas deben ser un instrumento básico en los laboratorios virtuales para realizar, desde lugares remotos, las diferentes tareas de manipulación de aparatos u objetos. En tercer lugar muchas de las herramientas desarrolladas para los sistemas de teleoperación pueden servir como instrumento para mejorar las técnicas de aprendizaje incrementando la capacidad de los alumnos para asimilar conocimientos mediante la adecuada excitación de sus órganos de percepción. Finalmente es necesario mencionar el que un sistema teleoperado puede considerarse como un laboratorio remoto de robótica y permite realizar las prácticas de esta disciplina.

En esta exposición se va a realizar una presentación de los desarrollos de carácter general en este marco sin entrar en los detalles específicos del uso de la red Internet como soporte de transmisión de datos ni los

de sus aplicaciones al campo de la enseñanza a distancia.

## 2 ALGUNAS DEFINICIONES

Los conceptos que se manejan en teleoperación se pueden concretar en las siguientes definiciones:

*Teleoperación:* conjunto de tecnologías que comprenden la operación o gobierno a distancia de un dispositivo por un ser humano. Por tanto, *teleoperar* es la acción que realiza un ser humano de operar o gobernar a distancia un dispositivo; mientras que un sistema de *teleoperación* será aquel que permita teleoperar un dispositivo, que se denominará dispositivo *teleoperado*.

*Telemanipulación:* conjunto de tecnologías que comprenden la operación o gobierno a distancia por un ser humano de un manipulador. Por tanto, *telemanipular* es la acción que realiza un ser humano de operar o gobernar a distancia un manipulador, mientras que un *sistema de telemanipulación* será aquel que permita teleoperar un manipulador, que se denominará *manipulador teleoperado*.

*Telerrobótica:* conjunto de tecnologías que comprenden la monitorización y reprogramación a distancia de un robot por un ser humano. Se hablará entonces de la teleoperación de un robot, que se denominará *telerrobot* o *robot teleoperado*.

*Telepresencia:* situación o circunstancia que se da cuando un ser humano tiene la sensación de encontrarse físicamente en el lugar remoto. La telepresencia se consigue realimentando coherentemente al ser humano suficiente cantidad de información sobre el entorno remoto.

*Realidad virtual:* situación o circunstancia que se da cuando un ser humano tiene la sensación de encontrarse en un lugar distinto de donde físicamente está gracias a la información generada exclusivamente por un computador. El entorno que se genera, y en el que el operador se encuentra inmerso se denomina *entorno virtual*, y la situación de estar en él, también se conoce como *presencia virtual*.

*Realidad aumentada:* situación o circunstancia que percibe un operador cuando la información sensorial que le es realimentada de un entorno es modificada

previamente por un computador con el objetivo de añadirle nueva información creada artificialmente, y que es no accesible directamente de la realidad por los sentidos del operador, aunque éste se encontrase en la zona remota.

### 3 ANÁLISIS HISTÓRICO Y EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA

Como se ha dicho los primeros sistemas de teleoperación, que datan del año 1948, son considerados como los precursores de los primeros robots que aparecieron bastantes años después (en 1960). De todas formas, y a nivel de producto comercial, la evolución de los robots y los sistemas teleoperados han corrido caminos paralelos pero diferentes.

La teleoperación, a nivel de aplicación, se ha centrado fundamentalmente en los campos nuclear, el más tradicional, el de trabajos submarinos, el espacial y más actualmente el de la medicina, mantenimiento, etc. La figura 1 presenta los principales desarrollos de esta evolución hasta los años 90.



Figura 1

En paralelo con esta evolución histórica, ha habido una evolución tecnológica motivada principalmente por la incorporación de los desarrollos del control, la informática y la robótica.

Ha habido, por una parte una evolución en el soporte de comunicación entre el puesto del operador y el sistema remoto, pasando de los sistemas de transmisión mecánica, a los eléctricos, fibra óptica, radio o recientemente Internet, medio que suprime prácticamente las limitaciones de distancia.

La incorporación de los desarrollos de la Robótica y la tecnología multimedia han permitido incrementar las capacidades del sistema remoto, especialmente en lo que se refiere a su autonomía, y del puesto local de control, mejorando fundamentalmente las prestaciones de la interfaz hombre máquina.

Esto ha permitido una mejora considerable en las capacidades de telepresencia y telemanipulación. La figura 2 ilustra esta evolución.

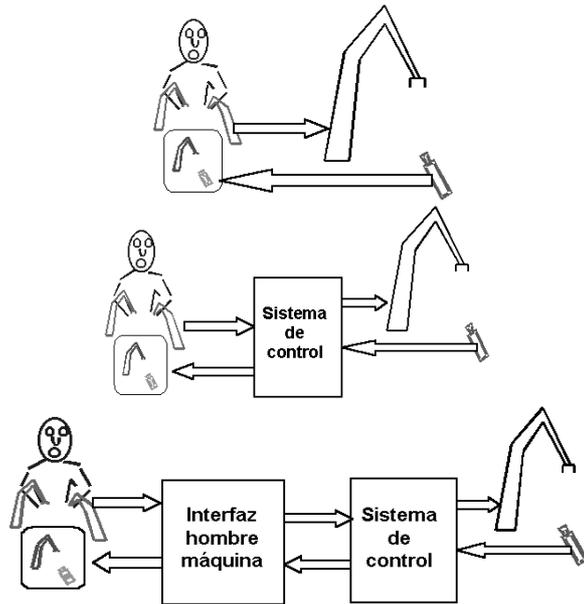


Figura 2

En la actualidad el diseño de los sistemas teleoperados requiere una serie de consideraciones fundamentalmente dedicadas a los aspectos tecnológicos y a los aspectos de control.

### 4 ANÁLISIS HISTÓRICO Y EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA

Además de los problemas derivados del medio de comunicación utilizado para la conexión de los sistemas local y remoto, el elemento específico más característico a desarrollar en un sistema teleoperado es la interfaz entre el operador y el sistema.

Una interfaz de teleoperación debe ser diseñada teniendo en cuenta las siguientes características:

- Debe sumar las prestaciones de la telepresencia y de la telemanipulación.
- Adaptada al máximo a la fisiología humana intentando aprovechar al máximo las capacidades de percepción, de manipulación e, incluso, de movilidad del hombre.
- En telepresencia se deben buscar los mecanismos más eficaces para excitar los sentidos humanos: vista, oído, tacto y cinestesia( movilidad).
- En telemanipulación las capacidades de generar actuaciones: movilidad y voz, fundamentalmente.
- Desde el punto de vista del sistema son aprovechables en su diseño las prestaciones multimedia de los computadores actuales: visualización (tridimensional), recono-cimiento y

síntesis de voz y joystiks y otros dispositivos que captan movimientos.

- Una buena solución es tratar de crear un entorno de realidad virtual, o mejor aumentada, en el que el operador se sienta en el lugar remoto de trabajo realizando éste con sus propias manos.

Los desarrollos específicos para sistemas de teleoperación se centran principalmente en tres campos:

- Sistemas de visualización.
- Dispositivos de manipulación.
- Herramientas informáticas de apoyo.

#### 4.1 SISTEMAS DE VIZUALIZACIÓN

La presentación de la información sobre una pantalla o dispositivo semejante de manera completa y sencilla para el usuario es una de los primeros objetivos que debe tenerse en cuenta en el diseño de la interfaz de teleoperación. En principio esta visualización debería tener las siguientes prestaciones:

- Debe permitir la visualización simultánea de textos, gráficos y video.
- Flexibles en cuanto a su disposición en pantalla.
- Posibilidad de visualizar imágenes en tres dimensiones.

De ellos el más interesante desde el punto de vista de posibilidad de desarrollos de investigación es el tercero en el que existen algunos desarrollos comerciales y muchas actividades de desarrollo en centros de investigación.

La visualización tridimensional de imágenes se realiza fundamentalmente haciendo ver en cada ojo de una persona una imagen del objeto o escena tomada desde un punto de vista diferente. Para ello existen dispositivos específicos, fundamentalmente de dos tipos:

- Gafas con dos pantallas de composición de imágenes situadas una sobre cada ojo.
- Dispositivos de secuenciamiento en el tiempo de las dos imágenes generadas sobre una misma pantalla sincronizados con gafas polarizadas que lleva el espectador.

Estos dispositivos requieren el uso de gafas de precio relativamente elevado y que pueden encarecer especialmente la instalación cuando se prevé su uso por varios espectadores. Existen dispositivos que permiten el uso de gafas más económicas, como las de polarización fija complementaria para cada ojo, o sin gafas. Estos están aún en fase de investigación no existiendo aún equipos comerciales lo suficiente-

mente experimentados. Entre estos últimos se pueden citar los siguientes:

- Cristal semitransparente
- Barreras paralelas
- Pantallas lenticulares
- Holograffa

De todos ellos los que dan buenos resultados, y no requieren es uso de ningún tipo de gafas, los dos últimos, son muy caros y difícilmente utilizables en la actualidad de manera masiva.

#### 4.2 DISPOSITIVOS DE MANIPULACIÓN

Estos dispositivos son los que permiten trasladar los movimientos que realiza el operador en la estación local de operación al lugar remoto donde se deben realizar las diferentes tareas. En las situaciones más generales, constan de dos manipuladores, uno, denominado *maestro*, situado en la estación local y otro, el *esclavo*, en el lugar remoto, conectados entre si de tal modo que el esclavo reproduce los movimientos que realiza el operador sobre el maestro.

La mayor parte de las operaciones realizadas por un dispositivo como el descrito no serían viables con esta solo acción de seguimiento de movimientos ya que el operador sólo tendría una información retardada de que es lo que ocurre en el puesto remoto, no conociendo de manera instantánea si, por ejemplo, el manipulador remoto ha colisionado con un objeto o cualquier otra incidencia que pueda ocurrir en el transcurso de la tarea. La mayoría de los sistemas de manipulación, y en todo caso los que requieren una gran eficiencia en su funcionamiento, tienen, junto a la transmisión de información de movimiento del maestro al esclavo, una realimentación de los esfuerzos a que está sometido el esclavo, medidos por un sensor al efecto, hacia el maestro. De esta manera éste genera, y el operador en contacto con él siente, un esfuerzo similar al producido sobre el esclavo en el lugar remoto.

Existen comercialmente algunos dispositivos, no demasiados de estas características en el mercado. La figura 3 muestra uno de ellos.

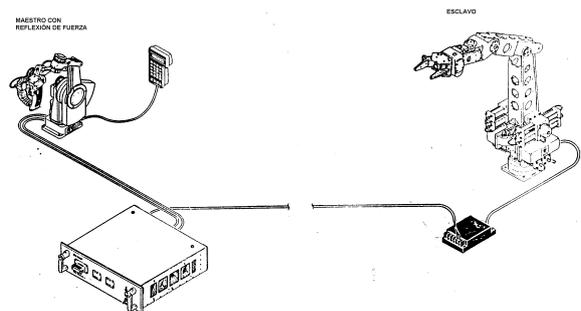


Figura 3

### 4.3 HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS DE APOYO

Los sistemas de simulación complementados con algunas facilidades adicionales constituyen una herramienta muy importante en los sistemas de teleoperación. En principio con un sistema con tales características se pueden alcanzar las siguientes prestaciones:

- Ensayo previo de operaciones.
- Detección de colisiones.
- Coordinación de movimientos entre varios robots.
- Visualización rápida del estado del sistema (blending).
- Generación de objetos virtuales.
- Memorización de tareas.
- Aprendizaje.

Algunas de ellas son extensión de prestaciones de los robots con sistemas de control avanzados, las otras son específicas de la teleoperación. Este es uno de los campos de trabajo más activo en centros de investigación sobre el tema.

## 5 ASPECTOS DE CONTROL EN EL DISEÑO DE SISTEMAS TELEOPERADOS

Los principales problemas de control en los sistemas teleoperados es el citado de seguimiento del esclavo al maestro con las características señaladas. En principio estos sistemas pueden clasificarse en dos tipos:

- Control unilateral: el maestro genera las señales de referencia, ya sean de posición o velocidad, para los bucles de control de la articulaciones del esclavo.
- Control bilateral: existe realimentación de esfuerzos al operador. La forma más habitual de realizarla es mediante la realimentación cinestésica en la que el sistema convierte la fuerza de contacto del esclavo en una fuerza aplicada sobre la mano o el brazo del operador

La realización eficiente de las distintas operaciones de manipulación en un sistema de teleoperación suponen utilizar, como ya se ha dicho, sistemas de control bilateral y es de esta clase de sistemas de los que se tratará en los apartados siguientes.

### 5.1 CONTROL BILATERAL EN TELEOPERACIÓN

El problema de control de robots teleoperados es el de mayor interés en este campo para los expertos en control de robots. El seguimiento por el esclavo de

los movimientos realizados sobre el maestro y la realimentación cinestésica de las fuerzas del esclavo al maestro en un medio de comunicación con retardo, en algunos casos como en Internet variante suponen una complejidad aún no totalmente resuelta. Existen algunos sistemas comerciales muy específicos que funcionan en condiciones singulares.

La presentación de estos problemas se va a realizar considerando que el maestro y el esclavo tienen un cinemática proporcional y por tanto el control entre ellos se realiza articulación a articulación. Los esquemas que se muestran a continuación representan precisamente estos pares de articulaciones. La generalización de estos esquemas supondría la introducción de las correspondientes transformaciones cinemáticas que hacen el problema muy complejo en el caso de robots con seis grados de libertad.

Con esta limitación el problema de control se limita a diseñar los bloques denominados *control del maestro* y *control del esclavo* en el esquema representado en la figura 4 de tal manera que coincidan, o sean proporcionales, los ángulos girados y los esfuerzos en el maestro y el esclavo.

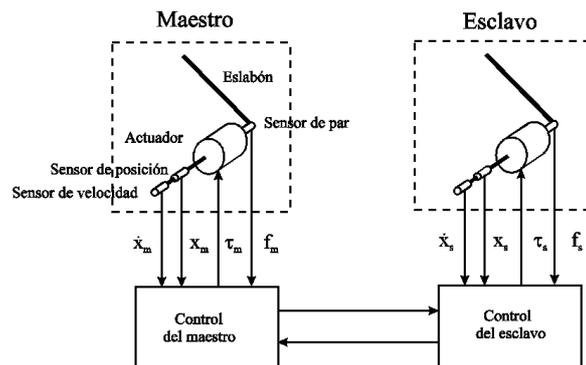


Figura 4

La primera solución adoptada fue cerrar un bucle de control en cada bucle que tomara como referencia la posición del otro. Las fuerzas aparecerían como resultado de la acción de los motores para conseguir este seguimiento (ver figura 5).

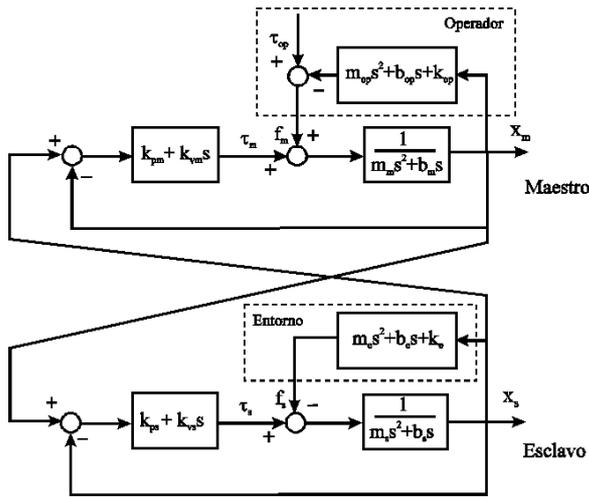


Figura 5

Este esquema aunque genera fuerzas en el maestro, no produce una modulación de las mismas. Mejores resultados se producen cuando éstas se miden en el esclavo y se realimentan físicamente al bucle de control del maestro. Los equipos comerciales existentes en la actualidad utilizan esta técnica. La figura 6 esquematiza este procedimiento.

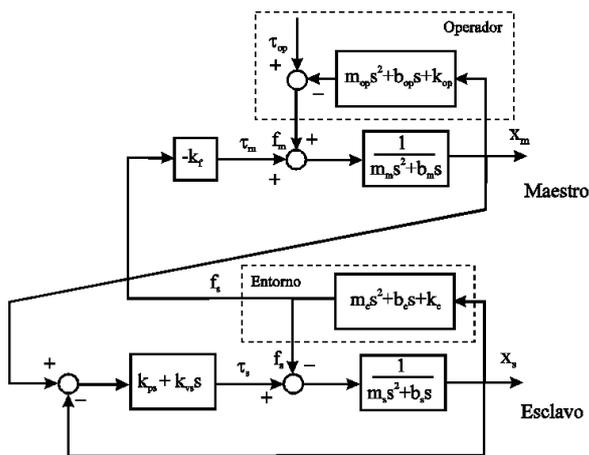


Figura 6

El diseño de estos sistemas es complejo por la dificultad de ajuste de parámetros de los reguladores derivada de:

- Sistema a controlar complejo (cuarto orden e impedancias del operador y del entorno).
- Dificultad de fijar especificaciones:
  - Especificaciones de comportamiento del maestro.
  - Especificaciones de comportamiento del esclavo.
  - Especificaciones de seguimiento del esclavo al maestro.
  - Sensibilidad del maestro a las fuerzas del esclavo.

## 5.2 CONTROL EN EL ESPACIO DE ESTADO

Mejores posibilidades de control se ofrecen cuando se plantea el problema de una manera global utilizando el estado del sistema formado por el conjunto maestro-esclavo.

La idea de estos métodos es conseguir un seguimiento del estado del maestro y el esclavo utilizando el error entre ambos para realizar las acciones de control (ver la figura 7).

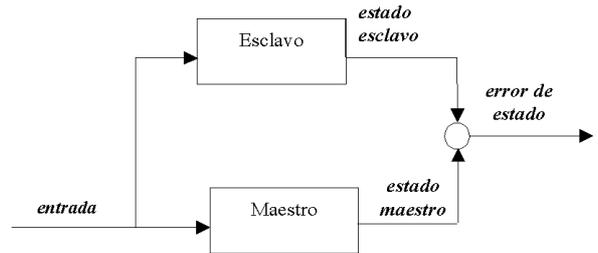


Figura 7

Este planteamiento permite diversas soluciones utilizando algoritmos óptimos, adaptativos, etc. Una simple solución de este problema consiste en asegurar la convergencia asintótica de los dos estados. La figura 8 muestra un esquema de tales características.

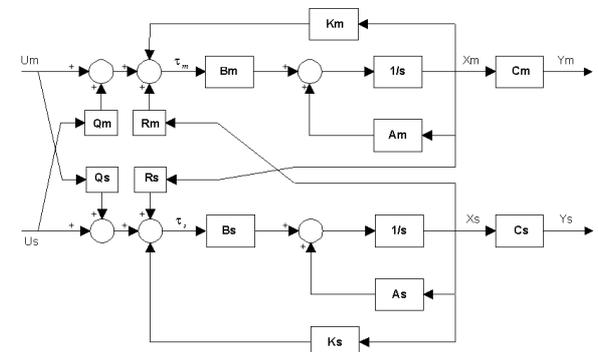


Figura 8

## 5.3 RETARDOS EN LA COMUNICACIÓN

El medio de comunicación, y especialmente el retardo que pueda producir en la misma, puede influir de manera importante en la eficiencia del sistema de teleoperación. Además de los problemas de pérdida de operatividad del sistema derivados del desfase entre acciones del operador, realización de las mismas en el lugar remoto y recepción del resultado de las mismas por el operador, los retardos en las comunicaciones afectan a la estabilidad del sistema de control ya que sus bucles se cierran a través del canal de comunicaciones.

Este problema es muy grave cuando, como ocurre en los sistemas de teleoperación para el espacio, los tiempos de retardo son muy elevados, del orden de

varios minutos. Otra situación especial con relación a este problema ocurre cuando, como ocurre utilizando internet para las comunicaciones, los retardos son variables.

En situaciones razonables de retardos uniformes y relativamente pequeños este problema se está solucionando a base de incluirlos en el modelo del sistema y diseñar el control contando con ellos. La figura 9 muestra el sistema de la figura 8 con estos retardos

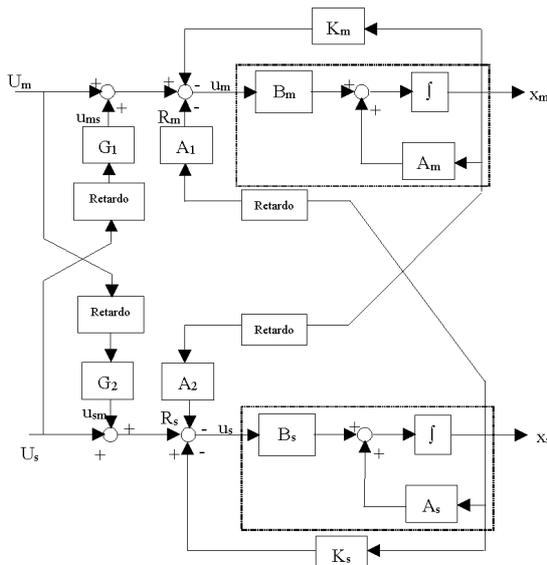


Figura 9

En todo caso este problema está en desarrollo en los centros de investigación en el área y no se han formulado soluciones generales al tema.

En los problemas espaciales en los que no se pueden obviar, ni siquiera a nivel de confortabilidad de la realización de las operaciones, estos retardos el problema se aborda cerrando un bucle de control en el lugar remoto y otro en el centro de operación e intercambiando entre ellos información. El esquema físico de este sistema sería el representado en la figura 2- 3. Tampoco en este problema existen soluciones de tipo general.

## 6. APLICACIONES DE LA TELEOPERACIÓN

Aparte de las aplicaciones tradicionales, ya citadas de los sectores nucleares, submarino y espacial, y motivadas sobre todo por las grandes posibilidades que ofrece la comunicación a través de internet, empiezan a emerger diversos campos en los que la teleoperación puede ser una herramienta importante. Se podrían citar las siguientes:

- Accionamiento remoto de sistemas
- Mantenimiento y servicios

- Cirugía
- Atención a minusválidas
- Teletrabajo
- Enseñanza

La principal dificultad para la generalización de éstas es el excesivo coste de los sistemas de teleoperación actuales. Su uso en estos sectores citados como emergentes permitirá un abaratamiento de los mismos.

## 6. CONCLUSIONES

Aunque la teleoperación es una tecnología relativamente antigua, anterior a la robótica, su uso ha estado limitado a algunas aplicaciones muy restringidas. La incorporación de las herramientas desarrolladas para la robótica y el uso de internet como medio de comunicación permiten pensar en un incremento importante de los sistemas teleoperados.