

Diseño de Brazo Manipulador Háptico Teleoperado

Alvarado Juárez Diego Armando, Butrón Castañeda Marco Antonio, Díaz Loyo Diego y González García Luis César

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica – Unidad Azcapotzalco, Instituto Politécnico Nacional Av. de las Granjas #682, Col. Sta. Catarina

Resumen

Este trabajo presenta el diseño de un sistema robótico que permite la retroalimentación háptica de un brazo manipulador teleoperado. En este prototipo se pretende implementar el control bilateral a un sistema robótico maestro-esclavo para tener una retroalimentación por parte del dispositivo remoto, en la cual se incluyen las fuerzas experimentadas por dicho dispositivo, lo cual nos da la oportunidad de experimentar una mayor sensación de presencia en el ambiente remoto.

El proyecto parte de la problemática de diseñar un sistema que combine las virtudes de las tecnologías de la teleoperación y háptica, ya que es difícil encontrar dispositivos o proyectos que conjuguen estas áreas de la robótica, y los que existen se encuentran en desarrollo o no son comerciales.

En la elaboración de este diseño se utilizó la metodología del Despliegue de la Función de Calidad, QFD por sus siglas en inglés, con la cual se establecen los requerimientos que deberán cumplirse para solucionar la problemática dada. Para satisfacer dichos requerimientos se propone una serie de conceptos en una lluvia de ideas. Una vez que se cuenta con una variedad de conceptos, se aplican ciertos filtros para poder establecer el diseño que represente la solución óptima al problema planteado.

Palabras clave: Teleoperación, háptica, QFD, retroalimentación.

1. Introducción

Gracias a los dispositivos hápticos, el teleoperador puede controlar un manipulador dentro de un espacio de trabajo útil detectando y retroalimentando las fuerzas correspondientes a colisiones entre piezas del mismo robot o piezas externas con el fin de evitar sobrecargas u otro tipo de daños permitiendo una mejor manipulación.

Con el uso de los protocolos de comunicación existentes se ha logrado eliminar el factor distancia en la problemática de la manipulación, permitiendo realizar ésta en tiempo “real”, tomando en cuenta los retardos propios del sistema. La función de estos protocolos será establecer una descripción formal de los formatos que deben presentar los mensajes para poder ser intercambiados entre el dispositivo háptico y el manipulador.

2. Antecedentes.

Con el desarrollo de la tecnología, el hombre ha tratado de entender su propio funcionamiento para así, poder reproducirlo, como menciona Lederman [1], “Si no se entienden las capacidades y limitaciones de los humanos, no se pueden diseñar sistemas que les permitan operar efectivamente en ambientes remotos, virtuales o reales”, esto, haciendo referencia a la teleoperación y a la tecnología háptica.

2.1 Teleoperación.

La teleoperación es el conjunto de tecnologías enfocadas a la operación o gobierno a distancia de un dispositivo por un ser humano [2].

En 1947 en el Argonne National Laboratory de Estados Unidos, Raymond Goertz lideró el comienzo de las primeras investigaciones acerca del desarrollo de un manipulador a distancia mediante el uso de otro manipulador equivalente. Culminando en 1948 con el M1, primer manipulador teleoperado mecánico, antecesor de toda la familia de sistemas maestro-esclavo de telemanipulación existentes actualmente.

Según Bejcsy [3] la capacidad manipuladora del brazo y la mano humana, es extendida por el acto de teleoperar, a ambientes remotos, físicamente hostiles o peligrosos. Así, después de años de investigaciones, se desemboca en lo que actualmente se conoce como Teleoperación Maestro-Esclavo, en donde un manipulador denominado esclavo reproduce fielmente los movimientos de un dispositivo maestro, controlado a su vez por un operador humano.

Desde que surgen estos sistemas de Teleoperación hasta la actualidad se puede notar que ha existido un gran avance; cada vez el área de acción de la teleoperación es más grande y va adquiriendo mayor importancia, las aplicaciones en la actualidad pueden ir desde la diversión y el entretenimiento hasta el rescate de personas en peligro. Un sistema teleoperado consta de cuatro elementos como podemos observar en la figura 2. Basándonos en Nuño [2] describimos estos elementos a continuación:

- Dispositivo teleoperado.-Es la máquina que trabaja en la zona remota y es controlada por el operador.
- Teleoperador.-Es la persona que realiza el control de la operación a distancia, su acción puede ir desde un control continuo hasta intervenciones intermitentes.
- Interfaz.-Se refiere al conjunto de dispositivos que permiten la interacción entre el operador y el sistema de teleoperación.
- Sensores.-Son el conjunto de dispositivos que recogen información, éstos se pueden localizar tanto en la zona remota como la local.

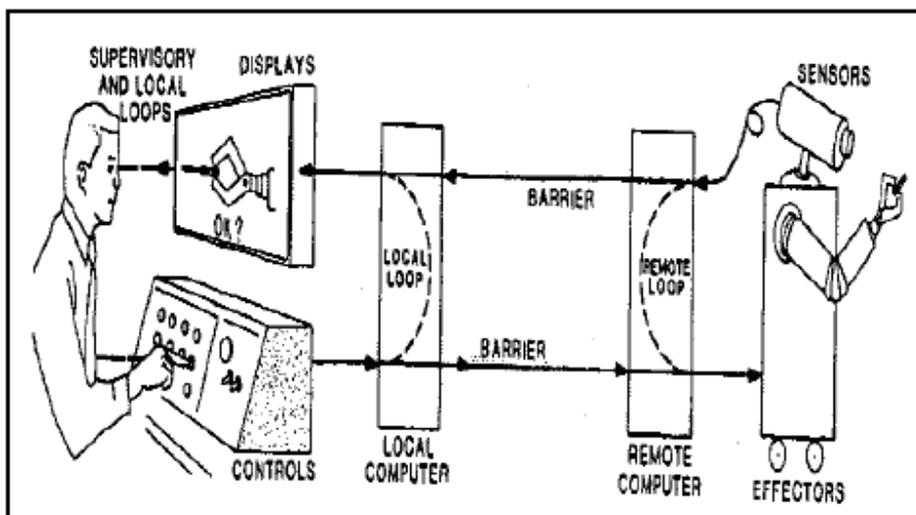


Figura 1, Elementos básicos de un sistema de teleoperación.

En los años sesentas y setentas la teleoperación alcanzó un nuevo nivel con su utilización en el espacio. El estudio de esta tecnología para tales aplicaciones empezó en 1961 cuando la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio de Estados Unidos de América, NASA por sus siglas en inglés, le financió un estudio al Massachusetts Institute of Technology (MIT) para conocer los efectos del tiempo de retardo en la manipulación remota, lo que dirigiría para 1968 al primer programa de investigación de teleoperación patrocinado por la Oficina de Investigación de Aeronáutica y Tecnología de dicho país [4].

2.2 Métodos de control.

La intervención del operador puede producirse en muchas formas diferentes, desde la teleoperación directa de los actuadores, hasta solamente la especificación de movimientos, o tareas que se realizan de manera automática en el entorno remoto dejando un poco de lado la ya mencionada idea de Bejcsy[3], ajustándose más con las ideas de Nuño [2].

Los métodos de control se clasifican en dos grandes ramas y son:

- Control Unilateral.- Este tipo de control es utilizado para aquellas actividades en las que no es indispensable tener retroalimentación por parte del dispositivo remoto. En éstas solo se envían señales del maestro al esclavo.
- Control Bilateral.- Es fundamental para la mayoría de las aplicaciones en teleoperación, pues con él se tiene una retroalimentación por parte del dispositivo remoto. Lo que da la oportunidad de experimentar de manera más efectiva mediante la manipulación del maestro en un ambiente remoto. Se le llama bilateral debido a que cuenta con comunicación en dos vías (Maestro-Esclavo y Esclavo-Maestro).

Los sistemas de telecomunicaciones entre los dispositivos que utilizan directamente el operador y el sistema de control local del robot son de vital importancia, ya que es uno de los principales problemas que se pueden encontrar en muchos de los dispositivos teleoperados hoy en día. Ha habido, una evolución en los sistemas de comunicación, pasando de los sistemas mecánicos a los eléctricos, fibra óptica, radio e Internet, suprimiendo prácticamente las limitaciones de distancia, sin embargo se deben considerar seriamente los tiempos de respuesta entre los dispositivos utilizados.

2.3 Háptica.

Como menciona Barrientos [5] actualmente la palabra Háptica no tiene una definición directa. Sin embargo se puede generar un entendimiento de la misma a partir de su raíz, la cual se deriva del griego "Hapthai", y hace referencia al sentido del tacto.

El sentido del tacto es el primero que se forma en los seres humanos durante la gestación, y debido a esto es el más desarrollado, y aunque no se note, es del que más dependen las personas en la vida diaria. Según Braun [6], el sentido del tacto comprende la percepción de estímulos mecánicos eléctricos, térmicos o químicos.

Los somato-receptores son necesarios para poder detectar estos estímulos y existen 4 tipos:

- Termo-receptores.- Son los encargados de identificar los cambios de temperatura, y así traducirse en señales regulatorias cuando se requiere un ajuste.
- Propioceptores.- Son aquellos que se encargan de informar sobre la posición del cuerpo, y permiten conocer la posición de los órganos con los ojos cerrados.
- Mecano-receptores.- Terminaciones nerviosas libres que poseen un bajo umbral de estimulación y una rápida adaptación.
- Nocio-receptores.- Se activan mediante una
- estimulación mecánica fuerte o temperaturas extremas, las cuales pueden producir daño. Al activarse producen la sensación de dolor.

En tecnología, háptica se refiere a la ciencia que estudia las aplicaciones de interacción entre las personas en ambientes virtuales y teleoperados. Generando una interfaz háptica se permite al usuario manipular objetos que virtualmente están presentes, pero que realmente no existen o se encuentran en otro lugar.

La investigación de la háptica según Kutchenbecker [7] busca recrear el complejo sentido del tacto para los usuarios de realidad virtual y tele-robótica. Ésta inicia en los años 90's como resultado de problemáticas y estudios que se llevaron a cabo en áreas como la robótica, la tele-operación, realidad virtual y psicología experimental, incrementando el número de investigadores en universidades y centros de investigación.

2.4 Teleoperación háptica.

Se puede decir que este tema existe desde que existe la teleoperación, pues cuando ésta empezó se utilizaban sistemas que se encontraban conectados por medios mecánicos, por lo que se transmitían las fuerzas a los mandos a distancia. Cuando se dejan de utilizar mandos remotos directamente conectados se hace la separación entre la teleoperación y la háptica.

Hoy en día se ha retomado la unión de estas dos tecnologías para poder realizar nuevos dispositivos y mejorar los ya existentes, logrando así una infinidad de posibilidades como diría Robles [8], "El único límite de las aplicaciones hápticas está dado por el poder de nuestras mentes".

Con los dispositivos hápticos, el teleoperador puede controlar un manipulador dentro de un espacio de trabajo útil detectando los límites por medio de fuerzas que le impiden salirse del mismo, o bien, sentir las fuerzas correspondientes a colisiones entre piezas del mismo robot o piezas externas con el fin de evitar sobrecargas u otro tipo de daños permitiendo una mejor manipulación.

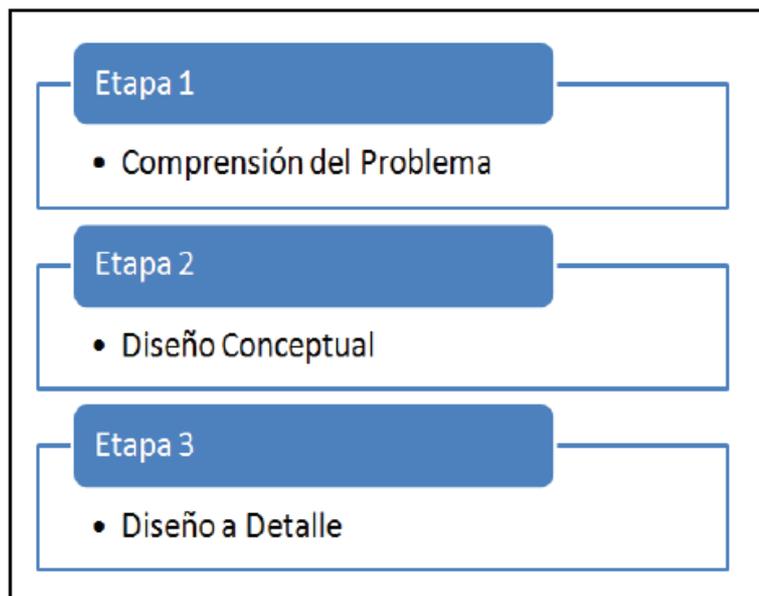
2.5 Protocolos de comunicación.

Concretamente, los protocolos de comunicación definen las reglas para la transmisión y recepción de la información entre los nodos de la red, de modo que para que dos nodos se puedan comunicar entre si es necesario que ambos empleen la misma configuración de protocolos, Almaraz [9].

3. Desarrollo.

La finalidad del diseño es resolver problemas, los cuales pueden tener un número variable de soluciones, correctas o no. Por esta razón el método es de suma importancia en el campo del diseño, gracias a él se pueden evitar acciones o soluciones arbitrarias que no resuelvan adecuadamente los problemas planteados.

Un problema bien definido conducirá a una solución correcta. El problema de diseño surge de una necesidad, el planteamiento debe contener todos los elementos para su solución, por ello es imprescindible localizar, conocer y utilizar dichos elementos. En la figura 3 se presentan las etapas fundamentales para un diseño adecuado.



Para cumplir con estas 3 etapas se pretende utilizar la metodología que propone el Despliegue de la Función de Calidad ó QFD por sus siglas en inglés. Dicha metodología consiste en interpretar lo que el cliente quiere y convertirlo en especificaciones para el producto final, lo que se pretende es traducir los requisitos del cliente en características cualitativas para poder transformarlas al lenguaje ingenieril y así determinar cuál es el diseño del proceso.

3.1 Etapa 1. Comprensión del problema.

Para poder comprender el problema es necesario identificar la necesidad. Para este proyecto la necesidad es diseñar una herramienta para realizar pruebas de manipulación a distancia con la capacidad de retroalimentación de fuerzas.

3.2 Etapa 2. Diseño conceptual.

En esta etapa es en donde se lleva a cabo la mayor parte del QFD. Esta metodología nos indica que una vez que se ha identificado la necesidad, es necesario considerar las exigencias técnicas que requerirá el proyecto para satisfacer las expectativas del cliente.

3.2.1 Requerimientos.

Se debe realizar una investigación de sus necesidades para ser capaces de encontrar las variables de decisión correctas. Con el fin de poder realizar un análisis adecuado se separan los requerimientos en 6 tipos, los cuales se indican en la tabla 1.

3.2.2 Determinación de los requerimientos deseables y su importancia.

Este tipo de requerimientos son más difíciles de valorar ya que están fuera de las expectativas mínimas, con lo cual su ausencia no crea descontento sin embargo su integración al proyecto logra otorgar una satisfacción superior.

Tipo	Requerimientos/Expectativas
Económicos	Bajo costo
Funcionales	Entradas/Salidas analógicas (Medir magnitudes físicas). Paro en caso de emergencia. Configuración cinemática similar al brazo humano. Afectar poco al sistema con retardos. Ancho de banda suficiente para retroalimentar de manera realista. Solo una mano requerida para su operación. Intuitivo para el operador. Limitar fuerzas y velocidades. Evitar vibraciones o movimientos involuntarios. Sentir las fuerzas que actúan en el esclavo. Reproducir de manera confiable los movimientos del maestro. Carga de trabajo de 0.5 kg. Debe tener una pinza de propósito general (Gripper con dedos). Accionamiento eléctrico (motores de C.D.). Fácil de mover o frenar. Buena manejabilidad.
Espaciales	Instalable en cualquier aula de la ESIME UPA (Vol. de trabajo).
De apariencia	-
De manufacturabilidad e instalación	Fácil instalación. Fácil mantenimiento. Durable.
De conservación	Que sea resistente.

Tabla1. Clasificación de los requerimientos.

En la tabla 2 se establece la separación entre los requerimientos obligatorios y todos aquellos que no son completamente indispensables para cumplir con la necesidad, sin embargo, le dan plusvalía al diseño en general.

Se debe de realizar una ponderación de los requerimientos deseables para poder establecer un orden de importancia de éstos, con lo cual podemos identificar en cuales deberíamos enfocarnos primero, claro está, luego de haber cumplido con todos los requerimientos obligatorios. En la tabla 2 ya se encuentran en el orden de importancia que resultado de la consideración de estos requisitos.

Obligatorios	Deseables
Entradas/Salidas analógicas (Medir magnitudes físicas)	Afectar poco al sistema con retardos
Ancho de banda suficiente para realimentar de manera realista	Buena manejabilidad
Configuración cinemática similar al brazo humano	Resistente
Paro en caso de emergencia	Durable
Limitar fuerzas y velocidades	Intuitivo para el operador
Evitar vibraciones o movimientos involuntarios	Bajo costo
Sentir las fuerzas que actúan en el esclavo	Fácil mantenimiento
Reproducir de manera confiable los movimientos del maestro	Fácil instalación
Carga de trabajo de 0.5 kg	Solo una mano requerida para su operación
Debe tener una pinza de propósito general (Gripper con dedos)	
Accionamiento eléctrico (motores de C.D.)	
Fácil de mover o frenar	
Instalable en cualquier aula de la ESIME UPA	

Tabla 2. Separación de requerimientos obligatorios y deseables.

3.2.3 Metas de diseño.

Estas son de suma importancia para poder establecer los alcances del proyecto. Al tener ya los requerimientos obligatorios y deseables perfectamente establecidos, es necesario traducirlos a términos mensurables, lo que ayudará a establecer de manera adecuada los límites que tendrá el sistema una vez terminado.

Como paso en este punto, se utiliza una tabla conocida como la casa de la calidad, la cual muestra una comparación entre los requerimientos, tanto obligatorios como deseables, con los términos mensurables y sus respectivas metas de diseño.

3.2.4 *Análisis funcional.*

Una vez analizados todos los requerimientos del cliente y establecidas las metas de diseño, se procede a realizar un mapa de funciones en el que se visualizan todas aquellas actividades que deberá realizar el dispositivo. Partiendo de las funciones primarias, secundarias, terciarias, y así hasta agotar toda acción posible y llegar al “con qué” se realizará dicha labor.

Este mapa de funciones nos ayudará en el siguiente paso para poder establecer la solución al proyecto en cuestión.

3.2.5 *Generación de conceptos.*

Una vez que se han identificado todas las funciones, se realiza una lluvia de ideas en la que se proponen diversas soluciones que cumplan con dichas actividades. Para poder calcular el número total de posibles soluciones lo que se hace es multiplicar el número de soluciones de cada concepto como se muestra en la ecuación 1.

$$C = 12 \times 4 \times 5 \times 5 \times 4 \times 3 \times 3 \times 5 \times 5 \times 12 \times 4 \times 4 \times 4 \times 3 \times 3 \times 3 \quad (1)$$

Donde C es el número de conceptos generados. Específicamente en este proyecto C alcanzó el orden de los miles de millones; al tener una gran combinación de conceptos, es necesario aplicar ciertos filtros para poder llegar a la solución más adecuada. En esta metodología aplicamos cuatro tipos de evaluaciones para obtener la solución pertinente.

- Evaluación por factibilidad
- Evaluación por disponibilidad tecnológica
- Evaluación basada en los requerimientos del cliente
- Evaluación basada en matrices de decisión

4. Resultados.

El hecho de aplicar los filtros a los conceptos propuestos en un principio da como resultado un concepto ganador, el cual se describe a continuación:

El diseño consiste principalmente en tres partes:

- Dispositivo maestro (figura 4).
Para la representación de fuerzas se utilizarán servomotores de imanes permanentes; además se hará uso de transmisiones por cable o tendones para la transmisión del movimiento. Con el fin de conocer tanto la velocidad y la aceleración del dispositivo se pretende acudir a Encoders incrementales. Por último, se ocuparán microcontroladores AVR en conjunto con una PC para poder realizar el control del mismo.

- **Dispositivo esclavo.**
En este dispositivo se tomarán algunas de las soluciones propuestas para el maestro, como el uso de encoders incrementales, la transmisión por tendones, los servomotores, así como el control por medio de los AVR y la PC. La diferencia estriba en el uso de galgas extensiométricas para conocer la presión y el par que soportará el dispositivo.



Figura 3. Diseño conceptual. Maestro.

- **Comunicación.**
En esta parte se utilizarán como conectores los puertos Ethernet, Serial y USB. En cuanto a la transmisión y recepción de datos, éstas se basarán en los protocolos RS232 y TCP/IP. Por último, las conexiones físicas se darán por medio de un par trenzado.



Figura 4. Diseño conceptual. Esclavo.

5. Conclusiones.

El uso de este tipo de metodologías resulta crucial al momento de diseñar, pues gracias a ellas se obtienen las características principales del dispositivo que cumplirá con las necesidades del cliente.

La eficiencia en la realización de un proyecto, radica en la relación que guarda el mejor uso de los recursos, el tiempo empleado en su elaboración y el resultado obtenido, de ahí la importancia de determinar el concepto que reúna las condiciones de viabilidad, y cumplimiento de requerimientos obligatorios y deseables, y en consecuencia la relevancia del uso de una metodología de desarrollo que muestre de forma precisa, los beneficios o posibilidades de la aplicación de un método de planeación determinado, resultado del análisis de cada una de las partes a considerar.

Lo anterior permite reconocer que la metodología de despliegue de función de calidad, es una herramienta que permite llevar a la realidad un proyecto, en las mejores condiciones que los diversos ámbitos de competencia exigen.

Por último, como objetivo a corto plazo se pretende terminar el Diseño a Detalle de dicho dispositivo, que comprende el diseño mecánico de los dispositivos maestro y esclavo (ya realizado), así como el desarrollo de los sistemas eléctrico, electrónico y de control.

Este tipo de dispositivos tienen una amplia gama de aplicaciones que van desde la industria médica hasta la industria nuclear, entre muchas otras. Es por esto que es importante continuar con el desarrollo de estas tecnologías.

Referencias.

- [1] Lederman, S., et. al. "*Haptic processing of facial expressions of emotion in 2D raised-line drawings.*" IEEE Transactions on Haptics, 2008.
- [2] Nuño, E., Basáñez, L. "*Teleoperación: técnicas, aplicaciones, entorno sensorial y teleoperación inteligente*", UPC, 2004
- [3] Bejcsy, A. "*Towards Development of Robotic Aid for Rehabilitation of Locomotion-impaired Subjects.*" California Institute of Technology, 1993.
- [4] NASA. "*Telerobotics plan program.*" 1997.
- [5] Barrientos, A., et al., "*Fundamentos de Robótica*" 2ª Edición. Ed. McGraw Hill. 2007.
- [6] Braun, E. "*El Saber y los Sentidos*" 2ª Edición. Ed. Fondo de Cultura Económica. 1997.
- [7] Kutchenbecker, K., et. al. "*Haptic Display of Contact Location*". 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. IEEE 2004.
- [8] Almaraz, A. "*Curso de Familia de Protocolos TCP/IP*" 2000.
- [9] Robles, G. "*The Importance of the Sense of Touch in Virtual and Real Environments*". IEEE Multimedia 13(3), Special issue on Haptic User Interfaces for Multimedia Systems. 2006.