

ESTUDIO DEL EFECTO DE LOS FACTORES FUNCIONALES SOBRE LA EFICIENCIA DE LOS SISTEMAS DE TELEMANIPULACIÓN

Adrián Mora Casas y Antonio Barrientos Cruz

*Departamento de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática Industrial (DISAM)
Universidad Politécnica de Madrid*

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid - España

e-mail: amora@etsii.upm.es antonio.barrientos@upm.es

Resumen: En el presente trabajo se analiza el efecto que sobre la eficiencia de un sistema de telemanipulación tienen sus factores funcionales. Se comienza identificando estos factores y se propone una clasificación al objeto de sistematizar el estudio de su influencia. Se hace una experimentación rigurosa y exhaustiva, realizándose cuatro diseños factoriales experimentales. Los resultados de estos diseños analizan, no solo los efectos individuales de los factores, sino también los efectos de sus interacciones. Finalmente se propone la división de tareas de telemanipulación en subtareas básicas, lo que permite la generalización de los resultados y la obtención de reglas generales de diseño de sistemas de telemanipulación. *Copyright © 2006 CEA-IFAC*

Palabras Clave: Telemanipulación, Manipulación, Robótica, Sistemas Maestro-Eslavo, Análisis Estadístico.

1. INTRODUCCIÓN

Desde los primeros estudios relativos a los sistemas de teleoperación, y más concretamente en la telemanipulación, los investigadores se han preocupado por evaluar la calidad del sistema. El poder establecer qué configuración del sistema de telemanipulación obtiene mejores resultados, es un aspecto de gran interés que permite diseñar y construir sistemas más eficientes, derivando en una disminución de los costes y riesgos asociados habitualmente a las misiones a las que están asociadas los sistemas de telemanipulación. Esta tarea ha sido abordada por diferentes investigadores desde diferentes puntos de vista: así los trabajos de Peñín (1998) y Daniel & McAree (1998) cuantifican la eficiencia del sistema en base a parámetros propios de la teoría de control. Schloerb, (1995) y Welch, (1999), utilizan el punto de vista del operador para evaluar el grado de eficiencia del sistema telemanipulado. Por su parte otros investigadores como Das *et al.*, (1992), Hannaford & Kim, (1989)

Lane *et al.*, (2002) Massimino & Sheridan, (1993) o Williams *et al.*, (2002), evalúan la calidad de la tarea, siendo esta última alternativa la más aceptada por los investigadores del área.

Los elementos que componen un sistema de telemanipulación están ubicados en dos zonas: Zona Local y Zona Remota (Sheridan, 1992). Cada uno de los componentes del sistema tiene ciertos factores que condicionan su comportamiento, afectando por lo tanto, al funcionamiento y la calidad de todo el sistema de telemanipulación. El número e influencia de estos factores es elevado, abarcando desde el tipo y capacidades de los dispositivos de entrada, hasta el tipo de control (unilateral o bilateral) que se utilice, pasando por la capacidad de telepresencia de que disponga el sistema. En la Figura 1 se presenta el esquema de un sistema de telemanipulación donde se pueden observar sus principales componentes así como los factores que afectan a los mismos. A estos factores se les ha dado el nombre de factores funcionales.

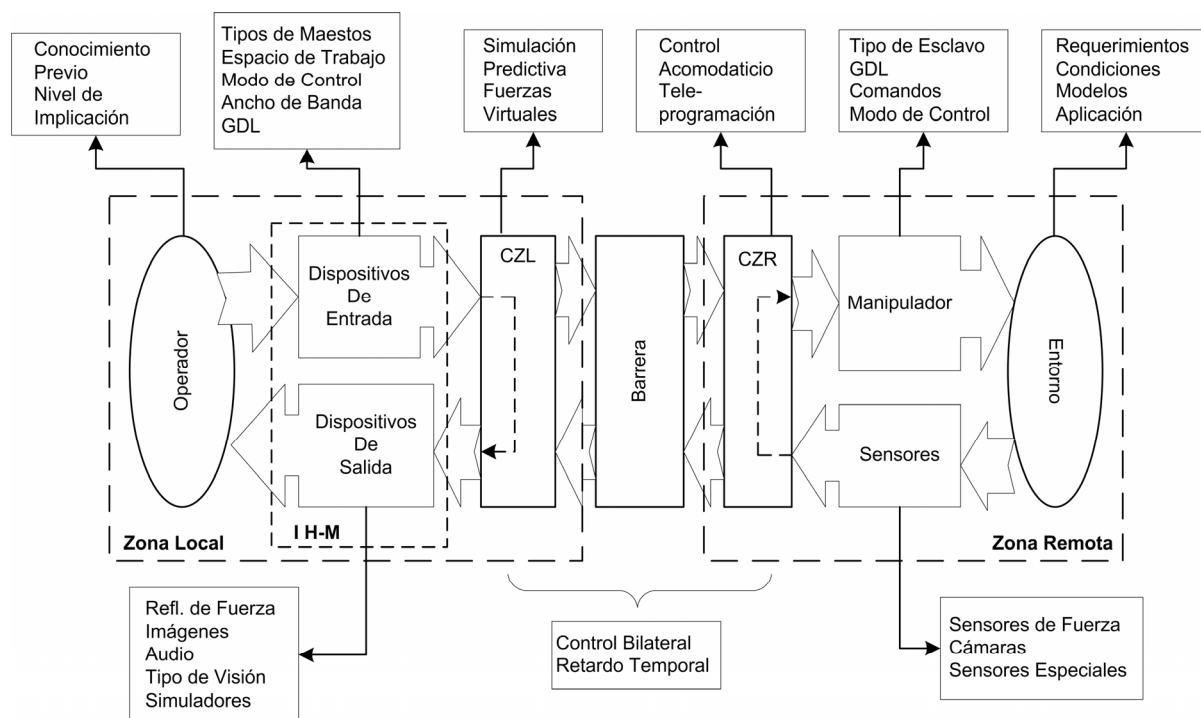


Figura. 1. Esquema de un sistema de Telemanipulación en el que se observan los factores funcionales que afectan a cada uno de sus componentes.

La principal dificultad al analizar el efecto que estos factores tienen sobre el funcionamiento de un sistema de telemanipulación es la apreciable interacción que se presenta entre ellos, lo que origina que el análisis individual de cada factor no proporcione información suficiente sobre su efecto real sobre la eficiencia del sistema. Se hace por ello necesario el análisis en conjunto de todos los factores incluyendo las interacciones que puedan producirse.

En la literatura pueden encontrarse diferentes estudios sobre los factores funcionales de los sistemas de teleoperación. El acoplamiento cinemático ha sido estudiado por Ben-Porat, *et al.*, (2000), el control bilateral por Kim, *et al.*, (1992); Das, *et al.*, (1992) y Kazi, (2001) entre otros, el tipo de visión por Kim, *et al.*, (1987) y Tendick, *et al.*, (1993), el modo de realimentación de fuerzas del esclavo por Massimino & Sheridan, (1993); Williams, *et al.*, (2002) y Rosen, *et al.*, (1999), el número de imágenes por segundo por Richard *et al.*, (1996) y el retardo temporal por Lane, *et al.*, (2002) y Lawn & Hannaford, (1993), entre otros.

En la mayoría de los trabajos mencionados anteriormente solo se estudia el efecto individual de un factor, no abordándose, salvo en muy pocas excepciones, la interacción entre ellos ni el efecto de ésta en la eficiencia del sistema. En Ben-Porat, *et al.*, (2000) se estudia la interacción entre el acoplamiento cinemático y el tipo de tarea, encontrando que es una interacción significativa. Kazi, (2001), estudia la interacción entre diferentes tipos de control bilateral y el tipo de tarea y también encuentra que es una interacción significativa. Finalmente, Richard *et al.*,

(1996), analiza la interacción entre el número de imágenes por segundo y el tipo de visión utilizado, teniendo como resultado que en algunas circunstancias esta interacción es significativa. Por lo tanto, aún siendo escasos los estudios realizados sobre la influencia de la interacción entre los factores, en todos se coincide en que ésta es significativa, mostrando así el interés de realizar un estudio detallado y completo del efecto de las interacciones de los factores al objeto de obtener un conocimiento más detallado y fiable sobre la eficiencia de sistemas de telemanipulación.

Por ello los autores se han planteado evaluar de manera detallada el efecto de los factores funcionales y sus interacciones en la eficiencia de un sistema de telemanipulación, tratando de llegar a conclusiones generalizables aplicables a diferentes sistemas. Esta generalización no ha podido ser abordada por otros trabajos como consecuencia de tratar los diferentes factores de manera individual. Este trabajo presenta los resultados de un estudio intensivo, basado en un desarrollo experimental riguroso, sobre el efecto de los factores funcionales en la calidad de la tarea realizada con un sistema de telemanipulación. Para el diseño experimental como para el análisis de los resultados se usó como técnica estadística los diseños factoriales (Box, Hunter & Hunter, 1999). Ésta es una herramienta estadística del diseño de experimentos que permite evaluar el efecto que sobre una variable respuesta tienen varios factores, pudiendo determinar qué factores y qué interacciones tienen efectos significativos.

El artículo se estructura de la siguiente manera: inicialmente se identifican los factores y se presenta una clasificación de los mismos destinada a facilitar el estudio de sus efectos sobre el sistema. Seguidamente se describe el diseño y el método experimental, se describen los resultados obtenidos de la experimentación para, finalmente, presentar las reglas generales obtenidas.

2. FACTORES FUNCIONALES

Se entiende por factores funcionales aquellos elementos del sistema que afectan a su comportamiento. La definición formal que propone el presente trabajo es: *“Todo elemento asociado al sistema o a su utilización que afecta su funcionamiento y por consiguiente la calidad de la tarea realizada por dicho sistema”*.

Al objeto de facilitar el estudio propuesto, se hace necesario establecer una clasificación de los factores. Ésta se ha realizado en base a la apreciación que el diseñador del sistema de telemanipulación tiene del mismo. Se establecen así dos tipos de factores: Factores intrínsecos y factores extrínsecos. Los factores intrínsecos se definen como: *“Factores propios del sistema teleoperado, cuyo valor puede ser escogido o modificado, antes o durante la tarea por el diseñador u operador del sistema”*. Los factores extrínsecos se definen como *“Factores sobre los que el diseñador no tiene control ya que son en su mayoría requerimientos o condiciones de diseño del sistema. Están ligados al tipo de aplicación para el cual el sistema está diseñado”*. En la Tablas 1 y 2 se observan los factores intrínsecos y extrínsecos, respectivamente.

La principal diferencia entre los factores intrínsecos y extrínsecos radica en que sobre los factores intrínsecos el diseñador tiene control, pudiendo modificarlos al objeto de que el comportamiento del sistema sea el deseado. Por el contrario, los factores extrínsecos son requerimientos y condiciones de la tarea, estando impuestos por la aplicación y no teniendo el diseñador del sistema capacidad para actuar sobre ellos. El retardo temporal aparece dentro de los factores extrínsecos, aunque en algunas aplicaciones, como las asociadas al sector espacial, puede ser considerado como factor intrínseco asociado al propio sistema de comunicaciones. Sin embargo en este trabajo el retardo temporal se trata como una perturbación externa del sistema. Adicionalmente es un factor sobre el cual el diseñador no tiene control, siendo su tarea la de configurar al sistema de manera que el efecto del retardo sea el mínimo posible.

Si bien algunos de los factores funcionales son bien conocidos y no precisan de explicación, se detallan a continuación algunos cuya interpretación puede ser menos evidente: el acoplamiento cinemático se refiere a la manera como es percibido el movimiento por el operador. Puede ser directo o indirecto. El acoplamiento es directo cuando los movimientos

espaciales que realiza el operador se ven reflejados en el esclavo. En el indirecto, las direcciones espaciales entre maestro y esclavo no se corresponden. La realimentación de fuerzas cinestésica directa es la forma más comúnmente utilizada para la realimentación de fuerzas, en ella se usa un maestro con accionamientos para realimentar las fuerzas al brazo que envía comandos de posición al esclavo. En la realimentación cinestésica indirecta las fuerzas se realimentan al otro brazo, para ello es necesario el uso de dos maestros. En Mora, (2004) se encuentra con más detalle la descripción de los factores.

Tabla 1 Factores Intrínsecos

Grupo	Factor	Posibles Valores
Cinemática	Sistema de Referencia de Comandos	Coordenadas Articulares
		Coordenadas Cartesianas
		Coordenadas Herramienta
	Acoplamiento	Directo Indirecto
	Factor de Escala Maestro-Esclavo	Valor numérico
Control	Movimiento	Posición
		Velocidad
	Bilateral	Posición – Posición
		Fuerza – Posición
		Fuerza – Velocidad
		Fuerza – Fuerza
	Esquemas Avanzados de Control	Control Supervisado
		Control Compartido
		Tele-programación
		Técnicas de compensación retardo temporal
Realimentación de Información al Operador	Modo de Realimentación de Posición del Esclavo	Visual
		Auditiva
		Cinestésica Directa
		Cinestésica Indirecta
	Modo de Realimentación de Fuerzas del Esclavo	Visual
		Auditiva
		Cinestésica Directa
		Cinestésica Indirecta
Calidad de Información	Frecuencia de actualización de los comandos de control	Valor numérico
	Ancho de Banda del Maestro	Valor numérico
	Resolución de Imágenes	Valor numérico
	Imágenes por segundo	Valor numérico
	Tipo de imágenes	B / N
		Color
	Tipo de Visión	Monocular
Binocular - Estéreo		
Otras		

La clasificación propuesta pretende determinar qué configuración del sistema (elección de factores intrínsecos) obtiene mejor calidad de la tarea ante condiciones de operación y requerimientos de diseño del sistema (factores extrínsecos). Lo anterior puede ser llevado a cabo realizando un correcto diseño experimental que permita analizar las interacciones entre factores intrínsecos y extrínsecos.

Tabla 2 Factores Extrínsecos

Factor	Posibles Valores
Operador	Con entrenamiento
	Sin entrenamiento
Modelo del Entorno	Con modelo
	Sin modelo
Retardo Temporal	Valor del Retardo
Tipo de Aplicación	Espacial
	Submarina
	Nuclear
	Medicina

3. DISEÑO EXPERIMENTAL

En este trabajo se busca obtener conocimiento basado en experimentación rigurosa, por lo tanto es necesario disponer de un método estadístico adecuado que permita obtener los resultados buscados. Para ellos se usan los diseños factoriales, (Box, Hunter & Hunter, 1999). En concreto se usan los diseños factoriales 2^k (k factores con 2 niveles) y factoriales completos. En el primer tipo, los factores solo pueden tener dos niveles (posibles valores) cada uno, mientras que en el factorial completo, cada factor puede tener el número de niveles necesario. Este tipo de diseño intenta explicar cómo es el efecto de diferentes factores y de sus interacciones sobre una variable respuesta. Se proponen cuatro diseños cada uno de ellos con un objetivo específico.

Diseño No 1

Objetivo: Análisis de las interacciones entre los factores intrínsecos y extrínsecos.

Factores analizados:

- Operador: Experto vs. Inexperto.
- Tipo de tarea: Inserción vs. Seguimiento.
- Control de movimiento: Posición vs. Velocidad.
- Modo de realimentación de fuerzas del esclavo: Cinestésica Directa vs. Visual.
- Ancho de banda del maestro: Alto vs. Bajo.

Con este diseño se pretende establecer si realmente son importantes las interacciones entre los dos tipos de factores y comprobar la hipótesis planteada inicialmente la cual establece que para cada tarea puede existir una configuración diferente del sistema que obtenga los mejores resultados. (Diseño $2^5 = 32$ Exp.).

Diseño No 2

Objetivo: Análisis de los factores afectados por el ancho del sistema.

Factores analizados:

- Resolución de imágenes: Alta (480x480) vs. Baja (384x288).
- Imágenes por segundo: Alta (27 fps) vs. Baja (7 fps).

- Frecuencia de actualización de comandos de control: Alta (100 Hz) vs. Baja (30 Hz).
- Control de movimiento: Posición vs. Velocidad.
- Modo de realimentación de fuerza del esclavo: Cinestésica Directa vs. Visual.

En este diseño se pretende analizar las interacciones entre tres factores que se ven afectados por el ancho de banda del sistema (resolución de imágenes, imágenes por segundo y frecuencia de actualización de comandos de control), con otros dos factores que se ha demostrado (Diseño 1) que son importantes en el comportamiento del sistema (control de movimiento y modo de realimentación de fuerza del esclavo). Debido al hardware de captura de imágenes del que se disponía, fue necesario dividir el diseño en dos sub-diseños 2^4 cada uno, (cuatro factores con dos niveles). Primer sub-diseño: resolución de imágenes, frecuencia de actualización de comandos de control, control de movimiento y modo de realimentación de fuerzas al esclavo. Segundo sub-diseño: imágenes por segundo, frecuencia de actualización de comandos de control, control de movimiento y modo de realimentación de fuerzas al esclavo. (Diseño total $2 \times 2^4 = 32$ Exp. - de los 32 experimentos 8 son repetidos en ambos diseños por lo tanto son 24 experimentos diferentes.).

Diseño No 3

Objetivo: Estudio de los factores que afectan la precisión de movimientos.

Factores analizados:

- Control de movimiento: Posición vs. Velocidad.
- Acoplamiento cinemático: Directo vs. Indirecto.
- Factor escala maestro-esclavo: 0.5, 1 y 1.5.
- Frecuencia de actualización de comandos de control: Alta (100 Hz) vs. Baja (30 Hz).
- Operador: Experto vs. Inexperto.

En este diseño se analizan los factores que afectan la calidad con que se realizan los movimientos del esclavo. Se está interesado principalmente en la interacción entre el entrenamiento del operador y el acoplamiento cinemático ya que es una interacción de considerable importancia en aplicaciones tales como las de cirugía mínimamente invasiva. (Factorial completo: $2 \times 2 \times 3 \times 2 \times 2 = 48$ Exp.).

Diseño No 4

Objetivo: Estudio del efecto del retardo temporal.

Factores analizados:

- Retardo temporal: 0, 100, 250, 500, 1000 y 1500 ms.

- Control de movimiento: Posición vs. Velocidad.
- Modo de realimentación de fuerzas del esclavo: Cinestésica Directa, Cinestésica Indirecta y Visual.
- Tipo de tarea: Inserción vs. Movimiento Restringido.

El objetivo principal de este diseño es analizar cómo afecta el retardo temporal a los otros factores. Se analizan dos tipos de tareas muy diferentes: una tarea de inserción y otra de movimiento muy restringido en un entorno muy rígido donde la realimentación de fuerzas es muy importante. (Factorial completo: $6 \times 2 \times 3 \times 2 = 48$ Exp.).

Los cuatro diseños fueron realizados secuencialmente. Los factores que no se analizaban en cada diseño se fijaron a un solo valor, como se puede observar en la Tabla 3. En la tabla se muestra que en todos los diseños, se usaron coordenadas cartesianas como referencia de comandos; la realimentación de posición del esclavo se realizó usando cámaras (generalmente dos cámaras no estéreo). No se incluyó modelo del entorno. Los esquemas de control bilateral usados fueron fuerza-posición cuando se usaba control en posición y fuerza-velocidad cuando el control de movimiento era en velocidad. Cabe resaltar que el estudio se restringe para modos de control bilateral, es decir en que el operador hace parte del bucle de control, no se incluye ningún tipo de ayuda al operador mas que las propias ventajas que pueda tener cada una de las configuraciones del sistema.

Tabla 3 Valores de los factores fijos

Factor	Valor Asignado
Sistema de referencia de comandos	Coordenadas Cartesianas
Acoplamiento Cinemático	Directo
Factor Escala Maestro-Eslavo	1
Control Bilateral	Fuerza-Posición / Fuerza-Velocidad
Esquemas avanzados de control	Ninguno
Modo de realimentación de posición del esclavo	Visual
Frecuencia de actualización de comandos	Alta (100 Hz)
Ancho de banda del maestro	Alta
Resolución de imágenes	Alta (480x480)
Imágenes por segundo	Analógico 60 Hz (PAL - 25)
Tipo de Imágenes	Color
Tipo de Visión	Dos Cámaras - No estéreo
Modelo del entorno	Sin modelo
Operador	Sin entrenamiento

4. MÉTODO EXPERIMENTAL

Una vez definidos los experimentos que se quieren realizar, se describe el método experimental que se ha llevado a cabo.

4.1 Sistemas de Telemanipulación

Los sistemas de telemanipulación empleados durante los experimentos fueron implementados usando la plataforma de experimentación con sistemas de telerobótica desarrollada en DISAM (Mora & Barrientos, 2002). Esta es una plataforma abierta y flexible que permite la implementación de diferentes sistemas de telerobótica de una forma sencilla.

Durante el desarrollo de los experimentos se usaron tres maestros:

- PHANToM: Maestro háptico con 6 GDL, aunque con reflexión de fuerzas en solo 3. Este maestro se usó en todos los experimentos.
- CyberNet: Maestro cartesiano con 6 GDL y reflexión de fuerzas en todos los ejes. Debido a su construcción mecánica y a la fricción asociada, tiene un bajo ancho de banda. Se usó en el Diseño No 1.
- Joystick: Joystick con 3 GDL y reflexión de fuerzas en solo 2. Se usó en el Diseño No 4 para implementar la reflexión cinestésica indirecta de fuerzas.

Como esclavo se usó un robot manipulador PUMA 560. Se instaló un sensor de fuerza con 6 GDL en la muñeca de éste para medir las fuerzas del entorno.

La zona local estaba compuesta por el maestro, un monitor donde se mostraban las imágenes de las cámaras de la zona remota (Figura 2.) y, cuando era necesario, los gráficos de fuerzas utilizados para la realimentación visual de las mismas (Figura 2.). La zona remota estaba compuesta por el esclavo, un tablero de pruebas donde se implementaron las diferentes tareas llevadas a cabo y dos cámaras (Figura 2): una cámara en la muñeca del robot para tener una visión subjetiva y otra con una visión general de toda la zona remota.

Como se ha mencionado, los controles bilaterales implementados fueron fuerza-posición y fuerza-velocidad. El esquema fuerza-posición se implementó como se muestra a continuación:

$$X_s = k_p X_m \quad (1)$$

$$f_m = k_e f_e \quad (2)$$

X_s es la posición de referencia del esclavo, obtenida como la posición del maestro, X_m , multiplicada por una ganancia de posición, k_p . La fuerza que refleja el maestro, f_m , es la fuerza medida en el entorno, f_e , por una ganancia de fuerza, k_f .

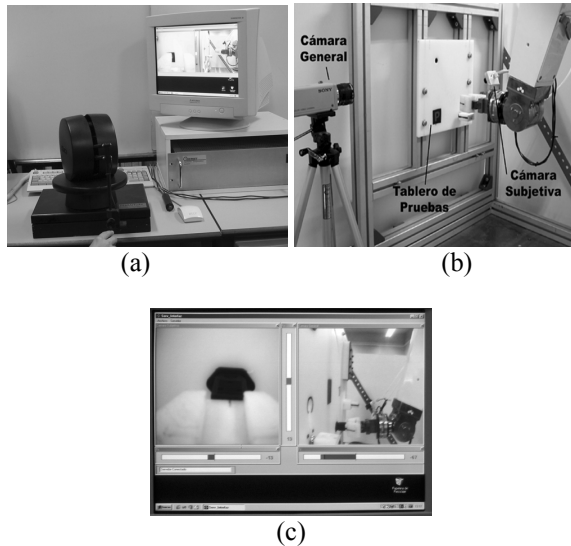


Figura 2. (a) Zona Local. (b) Zona Remota. (c) Monitor con imágenes de las cámaras y gráficos de fuerzas.

El esquema fuerza-velocidad se implementa como muestran las ecuaciones (3) y (4).

$$\dot{X}_s = k_v X_m \quad (3)$$

$$f_m = k_f f_e + k_r (X_m - X_{ref}) \quad (4)$$

En este caso, la referencia de velocidad del esclavo, X_s punto, es igual a la posición del maestro, X_m , multiplicado por una ganancia de velocidad. La fuerza que ejerce el maestro, f_m , está compuesta por dos componentes: la primera es la fuerza del entorno, f_e , multiplicada por una constante de fuerza, k_f . La segunda componente es debida a un resorte virtual que se implementa en el maestro al objeto de que su comportamiento sea como el de un joystick, con función de autocentrado. Este resorte se implementa como la diferencia entre la posición actual del maestro, X_m , con una posición de referencia, X_{ref} , (posición cero para este caso en particular) ($X_{ref} = 0$), multiplicada por una constante elástica, k_r . Con este esquema de control cuando el sistema esta en movimiento libre el operador solo siente la fuerza del resorte (comportamiento como Joystick).

4.2 Operadores

Se usaron dos tipos de operadores: inexpertos y expertos. Como inexpertos se seleccionaron ocho personas del Laboratorio de Automática de la E.T.S.I. Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid. Todos con conocimientos sobre teleoperación pero sin ningún entrenamiento con los sistemas de telemanipulación. Los operadores hicieron una prueba inicial sencilla para tener una toma de contacto con el sistema.

Como operador experto se seleccionó una persona experta en el manejo de sistemas de

telemanipulación, con muchas horas de trabajo con el sistema y con experiencia en el ajuste del sistema.

Para asegurar la homogeneidad de la toma de datos, se realizó la asignación de configuraciones del sistema a los operadores de forma aleatoria. El orden en que se hicieron las pruebas también se obtuvo de forma aleatoria. Los operadores no conocían, hasta momentos antes de hacer la prueba, qué configuración de sistema iban a probar.

4.3 Tareas

Durante los experimentos se realizaron seis tipos de tareas, tres de ellas de inserción con diferentes características.

Tarea Inserción: Esta tarea consistía en la inserción de un conector estándar. Se usaron dos tipos de conectores: uno IEC de potencia estándar (Diseños 1 y 4) y otro, un conector de laboratorio tipo “Banana” (Diseño 3). Se partía de una posición inicial en la que el conector estaba en su zócalo, el sistema remoto, de acuerdo a las órdenes del operador, debía ir a esta posición, coger el conector y extraerlo de su zócalo. Una vez retirado el conector, éste debía ser llevado a la posición de un segundo zócalo, donde debía ser insertado. Figura 3 (a).

Tarea de Seguimiento (Diseño 1): En esta tarea, que requiere una alta precisión de movimientos, el operador debía coger una herramienta, sujeta rígidamente a un amortiguador neumático al objeto de presentar una fuerza constante perturbadora durante todo el desarrollo de la prueba. Con la herramienta agarrada, el operador debía conseguir que el extremo del manipulador remoto siguiera una trayectoria marcada sobre el tablero de pruebas. La trayectoria se componía de tramos rectos y curvos, algunos de gran dificultad. Figura 3 (b).

Tarea de Separación de Tejido (Diseño 3): Con esta tarea se pretendía evaluar situaciones de contacto no rígido en entornos muy restringidos, situación típica en aplicaciones como la cirugía mínimamente invasiva. Para esta tarea fue necesario desarrollar un simulador de cirugía endoscópica. El simulador consta de cubo cerrado, una de cuyas paredes está formada por una lámina elástica de 3 mm de espesor, simulando las paredes musculares. A través de esta pared se inserta un tubo de 5.1 mm de diámetro interno que simula el trocar. En la pared opuesta se implementa el espacio de trabajo usando materiales blandos para simular las propiedades visco-elásticas de los tejidos. La visión endoscópica se simula mediante una mini cámara rodeada de diodos de alta luminosidad. Figura 3 (c).

La tarea implementada pretende simular la separación de tejido. Para ello se debían separar tres bandas elásticas superpuestas, las cuales debían ser movidas en orden, cada una de ellas a una posición predeterminada. La prueba exigía gran precisión de

movimientos, el área de trabajo era aproximadamente un cuadrado de 10 cm de lado. Figura 3 (d).

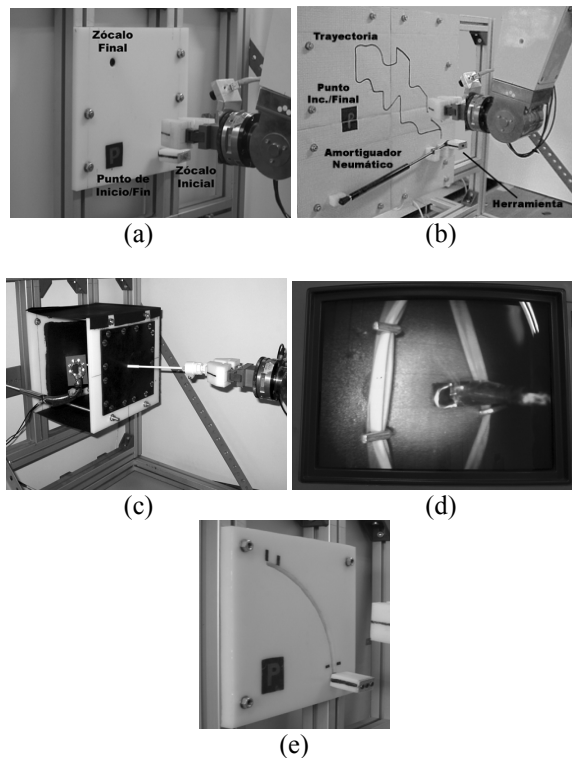


Figura 3. Detalles de las Tareas. (a) Tarea de inserción. (b) Tarea de seguimiento. (c) Simulador de endoscopia. (d) Tarea de separación de tejido. (e) Tarea de movimiento restringido.

Tarea de Movimiento Restringido (Diseño 4): Esta tarea, de características completamente diferentes a las de las anteriores, se lleva a cabo en un entorno muy rígido, donde la reflexión de fuerzas es decisiva para su correcta realización en modo remoto. La tarea consistía en mover una herramienta a lo largo de una ranura realizada en el tablero de pruebas, formada por un tramo circular. Todas las direcciones del movimiento estaban totalmente restringidas a excepción de la marcada por la ranura en cada momento. El operador debía recorrer la ranura en una dirección y volver en la contraria. Figura 3 (e).

4.4 Variables Analizadas

Las variables analizadas durante el desarrollo de los experimentos fueron seis:

- Tiempo de la Tarea
- SOSF (Suma del cuadrado de las fuerzas)
- Error de Seguimiento
- Fuerza Máxima de Inserción
- SOSFZ
- Errores de Inserción

El tiempo de la tarea y SOSF fueron analizados para todas las tareas. El error de seguimiento fue calculado para la tarea de seguimiento. Este error se calculó como el área entre la curva de referencia y la curva descrita por el operador con el esclavo. La fuerza máxima de inserción y los errores de inserción fueron

analizados para las tareas de inserción. El SOSFZ, que es SOSF pero solo en la dirección perpendicular al tablero de pruebas, fue calculado para las tareas de separación de tejido y para el movimiento restringido.

El SOSF se calculó como en Hannaford & Kim, (1989):

$$SOSF = \sum_{i=1}^N f_i^2 \Delta t \quad (5)$$

Donde N es el número de muestras, f es la fuerza en el instante i y Δt es el intervalo entre muestras, en este caso 0.01 s (100 Hz).

Los datos registrados fueron el tiempo de la tarea, la fuerza y posición del esclavo (estos datos fueron registrados a una frecuencia de 100Hz). Adicionalmente, se registraron el número de errores de inserción. Una vez terminada la prueba se pedía al operador que rellenara un cuestionario donde reflejará su opinión sobre la configuración que acababa de probar. Cada experimento fue repetido cinco veces.

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

Antes de analizar los datos usando los modelos de diseños factoriales, es necesario comprobar que éstos cumplen las hipótesis de los modelos estadísticos (Box, Hunter & Hunter, 1999). Es necesario comprobar especialmente la homocedasticidad (homogeneidad de la varianza) y la normalidad. La homocedasticidad se comprueba analizando los gráficos de residuos vs. valores estimados por el modelo, buscando tendencias especiales que puedan indicar que la varianza no es constante (Peña, 2002). La normalidad se comprueba mediante tests de normalidad.

De estas comprobaciones se obtuvo que la mayoría de los datos no cumplían con las hipótesis, por lo tanto, como propone Peña, (2002), es necesario transformar los datos para asegurar que se ajusten a las hipótesis. Las transformaciones usadas fueron: inversa, raíz cuadrada, logaritmo o la inversa de la raíz cuadrada.

Al comprobar los datos transformados se encontró que cumplían con las hipótesis de los modelos. Adicionalmente, se analizaron los residuos de los modelos transformados para comprobar su normalidad. Una duda razonable que existe con respecto a los diseños planteados es la diferencia en el número de operadores inexpertos (seis operadores) con respecto a un solo operador experto. Para comprobar la validez de esta comparación se analizaron las varianzas residuales (análisis ANOVA) con el fin de comprobar que no había diferencias significativas entre las varianzas de los dos grupos (inexpertos y expertos) y así poder comparar sus

medias sin lugar a dudas. El resultado de esta comprobación muestra que no hay diferencias significativas entre las varianzas de los dos grupos en todos los diseños analizados.

Es necesario aclarar que aunque los resultados obtenidos en este estudio y por consiguiente las conclusiones, fueron a partir de datos transformados, este hecho no afecta estas conclusiones debido a que el principal interés está en los resultados cualitativos más que en los cuantitativos.

Una vez comprobado que los datos cumplen con las hipótesis de los modelos estadísticos, éstos son analizados mediante análisis ANOVA multifactor, (Box, Hunter & Hunter, 1999). Este tipo de análisis permite establecer cuales son los factores significativos e igualmente cuales interacciones son significativas. Se realizó un análisis ANOVA para cada variable en cada diseño. Solo se tuvieron en cuenta los efectos principales y las interacciones de segundo orden. A continuación se describen los principales resultados obtenidos de cada uno de los diseños.

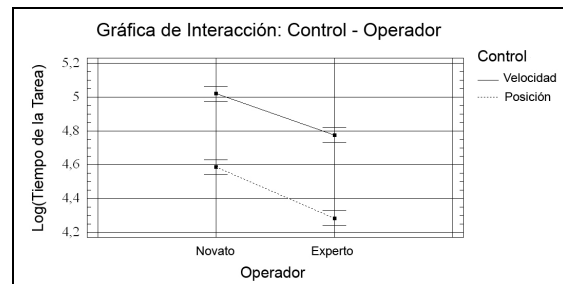
5.1 Diseño No 1: Factores Extrínsecos vs. Intrínsecos.

Al analizar los factores extrínsecos, el primer resultado que llama la atención es que el tipo de tarea resulta ser un factor significativo, no solo en cuanto a sus efectos individuales, sino adicionalmente en cuanto a sus interacciones. Este resultado soporta la hipótesis planteada inicialmente relativa a que para cada tarea existirá una configuración del sistema que obtenga los mejores resultados.

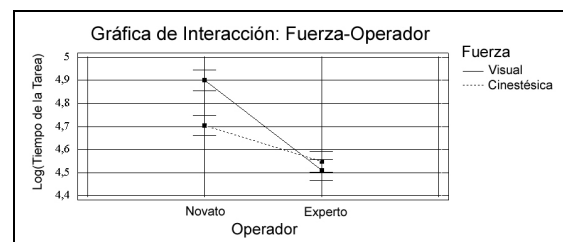
Cuando se analiza el entrenamiento del operador, se encuentra que su efecto depende del factor intrínseco que se analice. Así por ejemplo, el factor control de movimiento afecta a ambos tipos de operadores de igual forma, esto es: si por ejemplo el control en posición da mejores resultados para operador experto, el efecto para el operador novel es el mismo. Figura 4 (a). Sin embargo, si se consideran factores como el modo en que se realimentan las fuerzas o el ancho de banda del maestro, se observa que mientras el operador con entrenamiento es capaz de adaptarse a los diferentes valores de estos factores, obteniendo resultados similares independientemente del valor de éstos, el operador novel realiza la tarea con diferente resultado dependiendo del valor tomado por el factor. Figura 4 (b).

En cuanto al análisis de los resultados obtenidos, al variar los factores intrínsecos se observa que los resultados dependen de la variable que se analice. Así por ejemplo, si se pretende acortar el tiempo de la tarea, los mejores resultados los obtiene el control en posición; sin embargo, si se considera más importante el conseguir un error de seguimiento pequeño, el mejor resultado lo obtiene el control en velocidad. Lo anterior indica que es necesario definir

cual es el parámetro que mide mejor los requerimientos de la tarea para poder determinar qué configuración del sistema obtiene los mejores resultados.



(a)



(b)

Figura 4. (a) Interacción Control-Operador: Ambos tipos de control afectan al operador de igual forma. (b) Interacción Fuerza-Operador: El operador experto se adapta a la diferencia entre los tipos de realimentación de fuerzas.

5.2 Diseño No 2: Factores afectados por el ancho de banda del sistema.

El resultado más destacable de este diseño experimental es el encontrar que los factores más importantes son el control de movimiento y el modo de realimentación de fuerzas al operador. Se observa además que no solo sus efectos individuales son significativos, sino que la interacción entre ellos dos es la interacción más significativa entre todas las variables analizadas. El hecho que estos factores resulten con efectos más significativos que los factores afectados por el ancho de banda (resolución de imágenes, imágenes por segundo y frecuencia de actualización de comandos de control), soporta la hipótesis planteada por Welch, (1999), según la cual un aumento de telepresencia del operador no necesariamente indica un aumento de la calidad de la tarea.

Lo anterior no significa que los factores afectados por el ancho de banda no sean importantes. Lo que mostraron los resultados del diseño es que afectan a la calidad del sistema de forma diferente de acuerdo a la variable que se analice. Así, la resolución de imágenes por segundo es significativa para los errores de inserción, indicando que para los movimientos de aproximación previos a la inserción es necesario tener buena resolución de imágenes para tener una inserción exitosa. Las interacciones de este

factor con los otros factores no resultaron significativas.

De la misma manera, los resultados mostraron que las imágenes por segundo no tienen efectos principales significativos, sin embargo sus interacciones con otros factores sí afectan a la tarea en especial cuando se analiza el SOSF. Por el contrario, se obtuvo que la frecuencia de actualización de comandos de control tiene efectos significativos en todas las variables analizadas (efecto diferente según la variable considerada), tanto en su efecto aislado, como en sus interacciones con los demás factores.

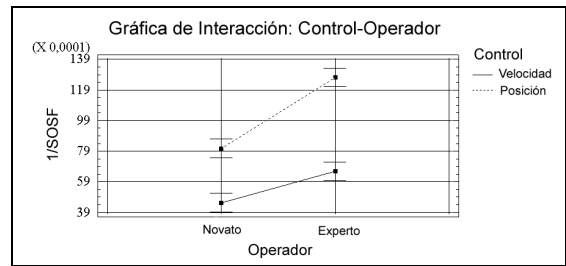
5.3 Diseño No 3: Factores que afectan la precisión de movimientos.

Coincidiendo con el resultado obtenido en el Diseño No 1, en este diseño se obtiene que el control de movimiento afecta a operadores expertos y noveles de la misma manera, Figura 5 (a). El mismo resultado se obtiene en referencia al factor acoplamiento cinemático, con el matiz interesante de que se observa que tanto los operadores noveles como los expertos se adaptan con rapidez y facilidad a los diferentes tipos de acoplamiento considerados (directo, indirecto). En cuanto a la frecuencia de actualización de comandos, se obtiene que el operador experto es capaz de adaptarse fácilmente a los diferentes valores de frecuencia, Figura 5 (b).

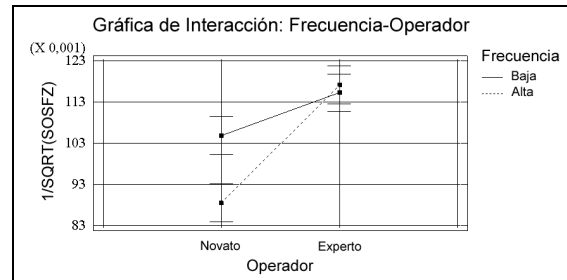
Si se analizan los otros factores, se observa que en este diseño el control en posición obtiene los mejores resultados en todas las variables. Esto demuestra que cuando son necesarios movimientos cortos con correcciones pequeñas es mejor el control en posición que el control en velocidad. Sin embargo, cuando se usa control en velocidad no hay diferencia entre los valores de frecuencia de actualización de comandos de control ni en las escalas entre maestro y esclavo, Figura 5 (c). Otro resultado importante es que el acoplamiento cinemático solo es significativo cuando se analiza el tiempo de la tarea, no teniendo efectos significativos en las variables relativas a fuerzas.

5.4 Diseño No 4: Efecto del retardo temporal.

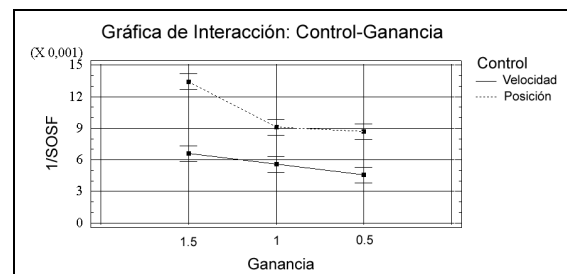
Tras un primer conjunto de experimentos sobre este diseño y debido a las inestabilidades que causaba el retardo especialmente en la tarea de movimiento restringido, se hizo necesario dividir el Diseño No 4 en dos sub-diseños. En el primero se fijó la tarea a la de inserción y el resto de los factores se dejaron tal y como se indica en el Diseño No 4. En el segundo sub-diseño se fijó la tarea a la de movimiento restringido, el retardo máximo utilizado fue de 500 ms (0, 100, 250 y 500 ms). El factor operador se fijó a operador experto debido a la dificultad que presentaba la prueba y se analizaron las diferencias de resultados entre utilizar reflexión de fuerza cinestésica directa vs. visual.



(a)



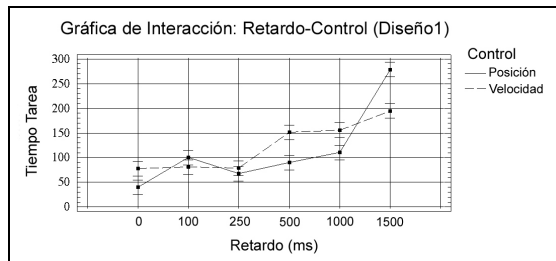
(b)



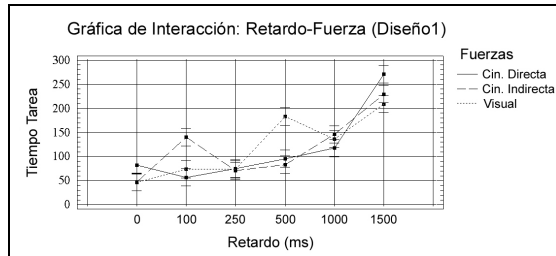
(c)

Figura 5. (a) Interacción Control-Operador: El control de movimiento afecta a ambos operadores de la misma forma. (b) Interacción Frecuencia-Operador: El operador experto se adapta a los dos valores de frecuencia. (c) Interacción Control-Ganancia: En control en velocidad se obtienen los mismos resultados con cualquier valor de ganancia.

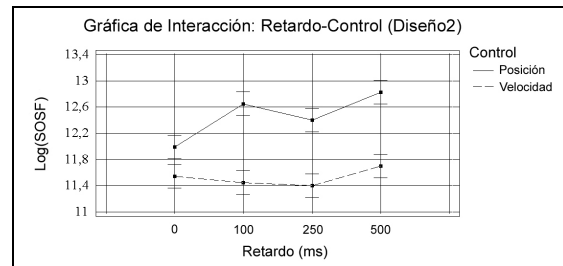
Sub-Diseño 4.1: En este sub-diseño se encontró que el factor más significativo de entre los analizados fue el retardo temporal, condicionando el comportamiento de los otros factores, Figura 6. Asimismo, la interacción retardo-control resultó ser la más significativa para todas las variables. Se encontró que la realimentación de fuerzas cinestésica indirecta (realimentar las fuerzas en una mano diferente a la utilizada para gobernar los movimientos) no obtuvo resultados satisfactorios. Esto se puede explicar debido a que el maestro utilizado para realizar la realimentación indirecta de fuerzas disponía solo de 2 GDL. Sin embargo, algunos operadores valoraron positivamente este modo de realimentación de fuerzas ya que les permitía hacer correcciones durante la inserción aun en presencia de retardo temporal sin causar ninguna inestabilidad.



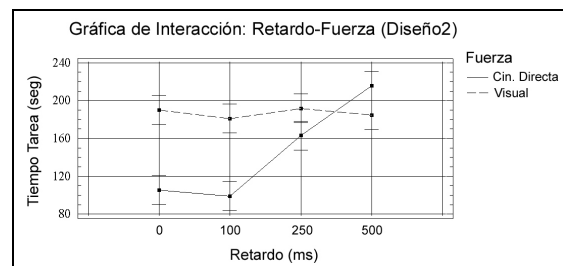
(a)



(b)



(a)



(b)

Figura 6. (a) Interacción Retardo-Control. (b) Interacción Retardo-Fuerzas. En ambas gráficas se observa cómo el retardo condiciona los resultados de los otros factores.

Sub-Diseño 4.2: En este diseño se obtuvo como resultado que aunque el retardo es un factor importante no es tan significativo ni condiciona tanto a los otros factores como en el diseño anterior. Se encontró que en presencia de retardo el control de velocidad ofrece muchas ventajas sobre el control en posición, obteniendo mejores resultados especialmente cuando se analizan las fuerzas, Figura 7 (a). El control en velocidad obtiene los mismos resultados independientemente del retardo, especialmente cuando se analiza el SOSF. Algo similar ocurre con la realimentación visual de fuerzas, Figura 7 (b).

Es relevante el indicar que en los estudios previos realizados por otros autores sobre la presencia de retardo temporal (Hannaford & Kim, 1989; Kim, et al., 1992; Lawn & Hannaford, 1993; Lane et al., 2002), aun siendo algunos de ellos muy completos, no se estudia el efecto del control en velocidad cuando existe retardo temporal, utilizándose siempre en los experimentos el control en posición. En este trabajo se analiza el control en velocidad en presencia de retardo temporal, obteniendo unos resultados muy satisfactorios, inclusive cuando se usa realimentación cinestésica de fuerza. Este resultado puede ser explicado por un comportamiento acomodaticio detectado en el esquema de control fuerza-velocidad implementado, (ecuaciones (3) y (4)). Este comportamiento hace que en presencia de fuerzas en el entorno, el esclavo ejerza una especie de guiado sobre el maestro, que a su vez guía al operador, facilitando la tarea.

Figura 7. (a) Interacción Retardo-Control: En control en velocidad se obtienen los mismos resultados independientemente del retardo. (b) Interacción Retardo-Fuerzas: Con realimentación visual de fuerzas se obtienen los mismos resultados independientemente del retardo.

6. GENERALIZACIÓN

Una vez obtenidos los resultados de los diseños por separado, el siguiente paso es tratar de generalizarlos con el fin de obtener las reglas de diseño de sistemas de telemanipulación que se están buscando.

6.1 Generalización de Resultados

Se encuentran dos problemas al intentar generalizar los resultados obtenidos para que puedan ser aplicados a cualquier sistema de telemanipulación. El primero es que, como se ha visto, la mejor configuración del sistema depende fuertemente del tipo de tarea que se realiza con él. El segundo es que aun dentro de cada tarea la mejor configuración del sistema depende de la variable que se quiere optimizar (la configuración para tener un tiempo de tarea bajo es diferente a si se quiere bajas fuerzas de contacto). Para cada variable medida (que cuantifica cada uno de los requerimientos de la tarea), hay una configuración del sistema que obtiene los mejores resultados.

Teniendo lo anterior como punto de partida, generalizar los resultados no es inmediato. La solución que se propone para este inconveniente es dividir las tareas en subtareas básicas. Cada una de estas subtareas tiene asociados requerimientos específicos que son fácilmente identificados y medidos. Así en cada una de las tareas realizadas se pueden identificar las siguientes subtareas: *Tarea de inserción:* movimiento libre, movimiento de aproximación e inserción; *Tarea de seguimiento:* movimiento libre, movimiento de precisión y

contacto no rígido; *Tarea de separación de tejido*: movimiento libre, movimiento de aproximación, movimiento de precisión y contacto no rígido; *Tarea de movimiento restringido*: movimiento libre, movimiento de precisión y contacto rígido.

Se identifican seis subtareas básicas, cada una con requerimientos específicos que pueden ser medidos fácilmente. En la Tabla 4 se observa un resumen de estas subtareas con sus requerimientos y las variables que los miden.

El hecho de dividir las tareas en subtareas ofrece dos ventajas: la primera es que con esta división en subtareas básicas, es sencillo determinar cual es la principal medida de calidad de cada subtarea, no presentándose ambigüedades relativas sobre cual es la variable que cuantifica mejor su calidad. Por lo tanto, para cada una de las subtareas identificadas se han definido las variables que mejor miden su calidad.

La segunda ventaja que ofrece la división en subtareas es que permite generalizar los resultados a cualquier tarea compleja. Se parte del hecho de que cualquier tarea compleja puede ser descompuesta en una secuencia de subtareas. Por ejemplo, la tarea de inserción realizada en este estudio puede ser descompuesta en un movimiento libre, seguido de un movimiento de aproximación y finalmente de una inserción. De esta forma es posible generalizar los resultados obtenidos en los experimentos realizados a cualquier otra tarea de telemanipulación que pueda ser descompuesta en estas subtareas. En la Figura 8. se observa un diagrama que resume la utilidad de la división de tareas en subtareas para poder generalizar los resultados.

6.2 Obtención de Reglas Generales para el Diseño de Sistemas de Telemanipulación

Usando la técnica de división en subtareas propuesta, el siguiente paso es establecer qué configuración del sistema obtiene los mejores resultados para cada subtarea.

Para realizar esto se ha partido de los resultados de los diseños; para cada tarea y cada variable analizada se ha buscado cual es la configuración del sistema que obtiene los mejores resultados. Teniendo la mejor configuración del sistema para cada variable se obtiene cual es la mejor configuración para cada subtarea. Al hacer un resumen de estos resultados se obtiene la Tabla 5. En la columna de la izquierda se observan las tareas realizadas en los experimentos y en la siguiente columna (Subtarea) la descomposición de cada tarea en subtareas. En cada fila, correspondiente a cada subtarea, se observa la combinación del sistema que obtiene los mejores resultados. En la tabla los factores en negrita significan que son significativos y N.A. que no afectan.

Tabla 4 Subtareas con sus correspondientes requerimientos y variables que mejor lo miden

SubTarea	Requerimiento	Variable
Mov. Libre (ML)	Rapidez	Tiempo
M. Aproximación (MA)	Precisión	Errores Inserción, Tiempo
Inserción (I)	Bajas Fuerzas y Precisión	SOSF, Fuerzas Ins., Errores de Ins.
Mov. Precisión (MP)	Precisión	SOSF, Error Seguimiento, Errores Ins.
Contacto no Rígido (CS)	Estable y Bajas fuerzas	SOSF
Contacto Rígido (CR)	Estable y Bajas fuerzas	SOSF

A partir del resumen de resultados mostrado en la Tabla 5, es posible proponer finalmente cual es la mejor configuración del sistema para cada una de las subtareas. Estas configuraciones idóneas quedan recogidas en la Tabla 6 que constituye las reglas de diseño de sistemas de telemanipulación. En ella se indica para cada tipo de subtarea qué configuración debe tener el sistema para obtener los mejores resultados. Los factores que son significativos para cada subtarea están resaltados en negrita, mientras que los que no afectan al resultado están marcados con N.A.

Al realizar el paso de obtener una configuración para cada subtarea (Paso de la Tabla 5 a la Tabla 6), se observa que no hay ninguna contradicción en los resultados. La misma subtarea analizada en diferentes tareas (diseños) obtiene la misma configuración del sistema. Solo hay un caso en el que se presenta cierta contradicción, en la subtarea de movimiento de precisión, aparecen como adecuados los dos modos de control de movimiento (posición y velocidad). Esto es debido a que en las tareas en las que aparece este movimiento se evaluaron movimientos de precisión con características diferentes. Así por ejemplo, en la tarea de separación de tejido los movimientos de precisión son cortos con muchas correcciones en un breve espacio de tiempo, para este tipo de movimientos la mejor opción es el control en posición. Sin embargo en la tarea de movimiento restringido o en la tarea de seguimiento, el movimiento de precisión es más continuo, con menos correcciones o correcciones más suaves. Para este tipo de movimientos el control en velocidad obtiene los mejores resultados.

Otro aspecto importante es que en la tarea de inserción aparece la combinación de alto número de imágenes por segundo y baja frecuencia de actualización de comandos, o bajo número de imágenes por segundo y alta frecuencia de actualización de comandos. Esto es debido a que en esta subtarea existe una fuerte interacción entre estos dos factores. Analizando esta interacción se encuentra que cuando uno de estos factores toma el valor alto el otro factor no afecta los resultados por lo que puede ser utilizado en su menor valor.

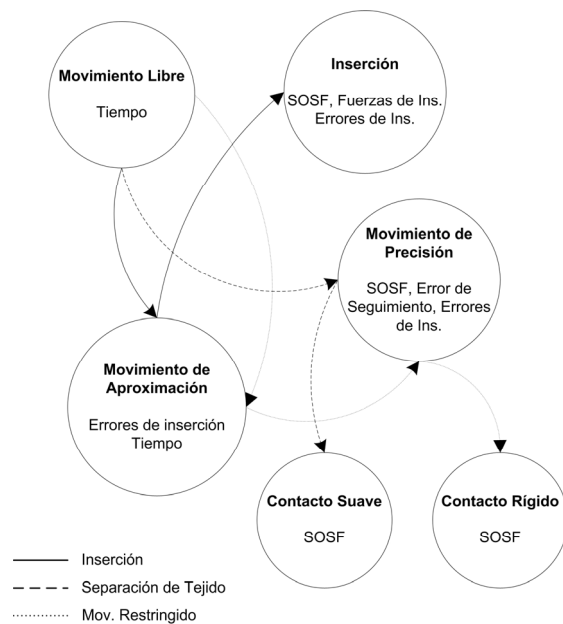


Figura 8. Subtareas identificadas, cada una con la variable que mejor mide su calidad. Cualquier tarea compleja puede ser descompuesta como secuencia de subtareas.

6.3 Efectos del Entrenamiento del Operador

Como se ha visto, la tarea (factor extrínseco) condiciona fuertemente la configuración del sistema. El otro factor extrínseco analizado durante el desarrollo de los experimentos ha sido el operador. De los resultados de los experimentos se puede obtener una relación de cómo los factores intrínsecos se relacionan con el operador. En la Tabla 7 se presenta un resumen de estos resultados.

En la Tabla 7 se puede observar cómo hay factores, como el control de movimiento, el acoplamiento cinemático o la frecuencia de actualización de comandos de control, que afectan ambos operadores de igual forma. Esto no debe interpretarse como que ambos operadores obtengan los mismos resultados con los valores de estos factores, sino que cualitativamente el efecto es el mismo. Así, si el operador experto obtiene mejores resultados con el control en posición, sucederá lo mismo con el operador novel. Es decir, variando estos factores en la configuración del sistema, los resultados mejorarán o empeorarán de igual forma, independientemente de si el operador está entrenado o no.

Por el contrario, hay otros factores como el ancho de banda del maestro o el modo de reflexión de fuerzas del esclavo con los cuales el operador experto puede adaptarse a la diferencia entre sus valores y obtener resultados equivalentes independientemente del valor tomado por el factor, cosa que no ocurre con el operador novel. Este resultado puede ser útil ya que permite saber que es posible modificar la

configuración del sistema persiguiendo algún otro fin y que un operador debidamente entrenado podrá obtener los mismos resultados con ambas configuraciones.

7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El trabajo realizado pretende completar la falta de conocimiento sobre cual es el efecto que tienen cada uno de los factores funcionales de un sistema de telemanipulación en la calidad del propio sistema. Se identifican los factores funcionales y se clasifican desde el punto de vista del diseñador del sistema para facilitar el estudio encaminado a encontrar qué configuración del sistema obtiene los mejores resultados ante los diferentes requerimientos de la tarea. Se proponen cuatro diseños factoriales que buscan evaluar aspectos concretos del sistema de telemanipulación, se hace una experimentación rigurosa y exhaustiva.

Con los resultados obtenidos de los experimentos se intenta generalizar para obtener conocimiento aplicable a cualquier sistema, se propone dividir las tareas en subtareas como método de generalización. De esta forma se identifica claramente que configuración del sistema obtiene los mejores resultados para cada subtarea. Los resultados pueden ser aplicados a cualquier tarea compleja que pueda ser compuesta por secuencia de las subtareas básicas definidas.

En este punto es necesario aclarar que aunque las reglas obtenidas fueron basadas en experimentación con un sistema de telemanipulación concreto (aunque abierto y con posibilidad de cambio de configuración del sistema), los resultados pueden ser extrapolados a cualquier sistema, ya que la generalización se basa en las características y requerimientos de cada subtarea. Por lo tanto, se pueden aplicar las reglas obtenidas en este estudio a cualquier sistema que vaya a realizar una tarea (compuesta por las subtareas descritas).

El objetivo final de todo el trabajo, una vez obtenidas las reglas de diseño de un sistema de telemanipulación, es poder implementar un sistema concreto de modo que obtenga los mejores resultados en el desarrollo de una tarea. Al intentar implementar un sistema que cumpla estas condiciones se parte del problema que representa el hecho de que una tarea compleja, dividida en subtareas, obtendrá los mejores resultados utilizando para cada subtarea una configuración particular en cada caso. Es decir, el mejor resultado global se obtendrá reconfigurando el sistema en cada subtarea.

Tabla 5 Resumen de los resultados de los diseños factoriales realizados

Tarea Exp.	Sub. Tarea ¹	Factores							
		Control ²	Fuerza ³	Ancho Banda Maestro ⁴	IPS ⁵	Frec. ⁶	Res. Imgs. ⁷	Acopl. Cinem. ⁸	Gan. M-E ⁹
Inserción	ML	<i>P</i>	N.A	N.A	A	N.A	N.A	-	-
	MA	<i>P</i>	N.A	A	N.A	N.A	<i>A</i>	-	-
	I	<i>P</i>	<i>C</i>	A	A/N.A	N.A/A	N.A	-	-
Separación tejido (MIS)	ML	<i>P</i>	-	-	-	N.A	-	<i>D</i>	<i>A</i>
	MA	<i>P</i>	-	-	-	N.A	-	N.A	<i>B</i>
	MP	<i>P</i>	-	-	-	N.A	-	D	<i>B</i>
	CS	<i>P</i>	-	-	-	A	-	N.A	B
Seguimiento	ML	<i>P</i>	N.A	N.A	-	-	-	-	-
	MP	<i>V</i>	<i>C</i>	<i>A</i>	-	-	-	-	-
	CS	<i>P</i>	<i>C</i>	A	-	-	-	-	-
Movimiento Restringido	ML	<i>P</i>	N.A	-	-	-	-	-	-
	MP	<i>V</i>	<i>C</i>	-	-	-	-	-	-
	CR	<i>V</i>	<i>C</i>	-	-	-	-	-	-

Tabla 6 Reglas generales obtenidas: Mejor configuración del sistema para cada subtarea

SubTarea	Mejor Combinación								
	Control	Fuerza	Ancho Banda Maestro	IPS	Frec.	Res. Imgs.	Acopl. Cinem.	Gan. M-E	
Movimiento Libre	<i>P</i>	N.A	N.A	<i>A</i>	N.A	N.A	<i>D</i>	<i>A</i>	
Movimiento Aproximación	<i>P</i>	N.A	<i>A</i>	N.A	N.A	<i>A</i>	N.A	<i>B</i>	
Inserción	<i>P</i>	<i>C</i>	<i>A</i>	A/N.A	N.A/A	N.A	N.A	N.A	
Movimiento de Precisión	<i>P/V</i>	<i>C</i>	<i>A</i>	N.A	N.A	<i>A</i>	<i>D</i>	<i>B</i>	
Contacto Suave	<i>P</i>	<i>C</i>	<i>A</i>	N.A	<i>A</i>	N.A	N.A	<i>B</i>	
Contacto Rígido	<i>V</i>	<i>C</i>	<i>A</i>	N.A	<i>A</i>	N.A	N.A	<i>B</i>	

Tabla 7 Efectos del entrenamiento del operador sobre los factores intrínsecos

Factor	Operador	
	Experto (Con entrenamiento)	Inexperto (Sin entrenamiento)
Acoplamiento Cinemático	Afecta a ambos por igual	
Factor de escala Maestro-Esclavo	Diferencias en todos los valores de ganancia, mejor 1.5	No diferencia entre 1 y 1.5. Mejor que con 0.5
Control de Movimiento	Afecta a ambos operadores por igual, en todas las variables y tareas	
Modo de realimentación de fuerzas del esclavo	Se adapta a la diferencia entre los modos	Mejor con cinestésica
Frecuencia de actualización de comandos de control	Afecta a ambos operadores por igual	
Ancho de Banda de Maestro	Se adapta a la diferencia de maestros	Mejor con maestro con alto ancho de banda

Como solución al problema que representa lo anterior, se propone disponer de un sistema re-configurable, esto es, un sistema que pueda cambiar su configuración durante la ejecución de la tarea. Este concepto representa una serie de dificultades que deben ser tenidas en cuenta a la hora de implementar un sistema de este tipo. Nuestros trabajos actuales

están encaminados a solucionar estos problemas para implementar un sistema re-configurable y poder evaluar su viabilidad y eficiencia. Las primeras pruebas realizadas con el sistema re-configurable ya desarrollado han dado resultados satisfactorios.

¹ SubTarea: ML: Movimiento Libre. MA: Mov. Aproximación. I: Inserción. MP: Mov. Precisión. CS: Contacto Suave. CR: Contacto Rígido.

² Control de Movimiento: P: Posición. V: Velocidad.

³ Modo de Realimentación de Fuerzas del Esclavo: C: Cinestésica V: Visual. N.A: No Afecta. - : No analizado.

⁴ Ancho de Banda del Maestro: A: Alto. B: Bajo. N.A. No Afecta. - : No analizado.

⁵ Imágenes por Segundo: A: Alta. B: Baja. N.A. No Afecta. - : No analizado.

⁶ Frecuencia de Actualización de Comandos: A: Alta. B: Baja. N.A. No Afecta. - : No analizado.

⁷ Resolución de Imágenes: A: Alta B: Baja. N.A. No Afecta. - : No analizado.

⁸ Acoplamiento Cinemático: D: Directo. I: Indirecto. N.A. No Afecta. - : No analizado.

⁹ Factor Escala Maestro-Esclavo: A: Alta B: Baja. N.A. No Afecta. - : No analizado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Profesora Camino González del Departamento de Estadística de la ETSI Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid por sus valiosos aportes en los conceptos estadísticos del estudio experimental. Igualmente agradecer a todos los voluntarios que se prestaron para la realización de las pruebas.

REFERENCIAS

- Ben-Porat, O., M. Shosham & J. Meyer. (2000). Control Design and Task Performance in Endoscopic Teleoperation. *Presence*. **Vol 9 No3**.
- Box G.E.P., Hunter, W.G., & Hunter, J.S. (1999). *Statistics for Experimenters, An introduction to Design, Data Analysis, and Model Building*. John Willey & Sons, Inc.
- Daniel, R.W. & P.R. McAree, (1998). Fundamental Limits of Performance for Force Reflecting Teleoperation. *The International Journal of Robotics Research*. **Vol 17, No 8**.
- Das, H., M. Zak, W.S. Kim, A.K. Bejczy & P.S. Schenker (1992). Operator Performance with Alternative Manual Control Modes in Teleoperation. *Presence*, **Vol 1, No 2**.
- Hannaford, B. & W.S. Kim, (1989). Force Reflection, Shared Control, and Time Delay in Telemanipulation. En: *IEEE International conference on Systems, Man and Cybernetics*. **Vol 1**.
- Kazi A. (2001). Operator Performance in Surgical Telemanipulation. *Presence*, **Vol 10, No 5**.
- Kim, W. S., F. Tendick & L.W. Stark. (1987). Visual Enhancements in Pick-and-Place Tasks: Human Operators Controlling a Simulated Cylindrical Manipulator. *IEEE Journal of Robotics and Automation*. **Vol RA-3 No 5**.
- Kim, W.S., B. Hannaford & A.K. Bejczy. (1992). Force-Reflection and Shared Compliant Control in Operating Telemanipulators with Time Delay. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. Vol 8, No 2.
- Lawn, C.A. & B. Hannaford. (1993). Performance Testing of Passive Communication and Control in Teleoperation with Time Delay. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- Lane J.C., C. R. Carignan, B.R. Sullivan, D. L. Akin, T. Hunt & R. Cohen. (2002). Effects of Time Delay on Telerobotic Control of Neutral Bouyancy Vehicles. En: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation*. Washington, DC. May 2002.
- Massimino M.J. & T.B. Sheridan. (1993). Sensory Substitution for Force Feedback in Teleoperation. *Presence*, **Vol 2, No 4**.
- Mora A. & Barrientos A. (2002). Platform for experimentation with Tele-Robotics systems. *Proceedings of 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2002*. EPFL Switzerland. September.
- Mora, A. (2004). *Estudio y analisis de la influencia de los factores funcionales en la eficiencia de sistemas tele-robóticos*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Peña D, (2002). *Diseño de Experimentos y Regresión* Alianza Editorial.
- Peñin, L.F. (1998). *Control Bilateral de Robots Teleoperados. Contribuciones en reflexión de Fuerzas*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Rosen, J., B. Hannaford, M.P. MacFarlane & M.N. Sinanan. (1999). Force Controlled and Teleoperated Endoscopic Grasper for Minimally Invasive Surgery-Experimental Performance Evaluation. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. **Vol 46 No 10**.
- Richard, P., G. Birebent, P. Coiffet, G. Burdea, D. Gomez & N. Langrana. (1996). Effect of Frame Rate and Force Feedback on Virtual Object Manipulation. *Presence*. **Vol 5 No 1**.
- Schloerb, D. W. (1995). A Quantitative Measure of Telepresence. *Presence*. **Vol 4 No 1**.
- Sheridan T.B. (1992) *Telerobotics, Automation, Control and Human Supervisory Control*. MIT Press. Cambridge, Massachusetts.
- Tendick, F., R. W. Jennings, G. Tharp & L. Stark. (1993). Sensing and Manipulation Problems in Endoscopic Surgery: Experiment, Analysis and Observation. *Presence*. **Vol 2 No 1**.
- Welch, R. B. (1999). How Can We Determine if the sense of Presence Affects Task Performance. *Presence*, **Vol 8 No 5**.
- Williams, L.E.P., R.B. Loftin, H.A. Aldridge, E.L. Leiss & W.J. Bluethmann. (2002). Kinesthetic and Visual Force Display for Telerobotics. En: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation*. Washington D.C. May 2002.