

CAPÍTULO X

Sistema de interacción persona-manipulador mediante guantes de datos

L. PAREDES-MADRID y P. GONZÁLEZ DE SANTOS

Instituto de Automática Industrial –CSIC
lparedes@iai.csic.es , pgds@iai.csic.es

La manipulación de cargas elevadas en la industria es una tarea muy frecuente, especialmente en PYMES, donde producen un gran número de accidentes y lesiones en los operarios. Según la Agencia Europea para la Salud y Seguridad en el Trabajo (<http://ew2006.osha.europa.eu/>), alrededor del 30% de los trabajadores europeos sufren lesiones de espalda causadas por esfuerzo físico en el levantamiento y manipulación de cargas, movimientos repetitivos o posturas forzadas. Como consecuencia la legislación laboral en la UE está limitando las cargas manipuladas directamente por operarios. Esta tendencia de la legislación y las recomendaciones de seguridad en el trabajo están exigiendo la utilización de herramientas y sistemas de ayuda a la manipulación cuando las cargas sobrepasan los límites legales.

Con el fin de satisfacer las necesidades crecientes en el desplazamiento de cargas, han surgido los Dispositivos de Ayuda a la Manipulación (DAM) que consisten en manipuladores de uno a seis grados de libertad los cuales trabajan en un entorno colaborativo con el operario, mejorando notablemente la productividad de la planta y disminuyendo la incidencia de accidentes.

Este capítulo presenta un nuevo sistema de interacción persona-robot destinado a controlar un DAM. La nueva interfaz está basada en un guante dotado con sensores que es capaz de determinar la fuerza (módulo y dirección) que el operario quiere imprimir a la carga y comunicárselo al controlador para originar movimiento en el objeto que se desee desplazar.

1 Introducción

La industria en general precisa de la utilización de manipuladores y grúas para mover cargas. Típicamente la interfaz de usuario de estos sistemas consiste en palancas de mandos, botones y más recientemente asideros con sensores de fuerza incorporados como los descritos en [1] y [2]. Dichos sistemas son conocidos como “Dispositivos de Ayuda a la Manipulación” (DAM) y tienen como finalidad amplificar la potencia del operario. La principal diferencia de los DAM sobre los manipuladores convencionales radica en su interfaz de control, la cual incide favorablemente sobre la productividad de la planta y la seguridad del operario.

La arquitectura de estas interfaces es similar a las grúas tradicionales, pero pueden incorporar nuevos sensores y elementos de realimentación de esfuerzo destinados a proveer de sensaciones hápticas al operario, así como nuevos algoritmos de control. La arquitectura de los DAM que funcionan en cooperación directa con el operario, se encuentra en documentos como [3] y [4] mientras que en el campo de la teleoperación con realimentación de esfuerzo pueden encontrarse en [5], [6], [7].

La Compañía *Virtual Realities* con sede en Galveston TX, USA, ha desarrollado dispositivos para teleoperación con realimentación de esfuerzo, denominados comercialmente como *CyberGlove II* y *CyberGrasp*. El *CyberGlove II* es un guante de datos, (*data glove*), dotado con goniómetros resistivos. Los guantes de datos son dispositivos que permiten medir los movimientos de los grados de libertad de la mano, dichos movimientos pueden clasificarse en: **flexión** y **abducción** de los dedos y **rotación** de la muñeca. Incorporando al *CyberGlove II* una Unidad de Medidas Inerciales (UMI) puede obtenerse la posición y orientación de la mano en el espacio y utilizar dicha información para múltiples tareas como por ejemplo; controlar robots remotamente. Si además se incorpora el módulo *CyberGrasp* puede proveerse de realimentación de esfuerzo sobre la mano, lo que mejora significativamente la interfaz hombre-máquina del sistema teleoperado.

A lo largo de los últimos quince años se ha trabajado intensamente en guantes de datos. De Dipietro et al. ha realizado recientemente un recuento tanto de las aplicaciones de los guantes de datos, como de las distintas versiones de los mismos, abarcando desde el año 1994 hasta la fecha de publicación de su trabajo en julio de 2008 [9]. Las aplicaciones de los guantes de datos son muy variadas y algunos de los campos de investigación que comprenden son: diseño y manufactura en la industria, visualización de información en entornos computacionales de diseño gráfico, asistencia en el proceso de reconocimiento de lenguaje para sordomudos y rehabilitación de pacientes afectados por lesiones motrices. En el campo de la robó-

tica, los guantes de datos se utilizan para diversos fines tales como: aprendizaje basado en memorización de los movimientos realizados por un humano, control de robots mediante posiciones gestuales de los dedos y control teleoperado de robots en sistemas con o sin realimentación de esfuerzo. Para este último caso Tarchanidis et al. [10] describen un guante de datos dotado con sensores de fuerza en la zona palmar y en la zona dorsal con un sistema de medición de la flexión de los dedos.

Las interfaces de control para los DAM que funcionan en cooperación directa con el operario son variadas dependiendo del número de grados de libertad que se desee controlar. En las referencias [11] y [12] se exponen interfaces de control para los DAM con un grado de libertad, en ellos se utilizan sensores de fuerza en un asidero para detectar la intención de movimiento del operario, por consiguiente, la velocidad de movimiento del manipulador cambiará de forma proporcional dependiendo de la magnitud de la fuerza aplicada. El movimiento del manipulador en [11] y [12] es posible solo verticalmente, debido al tipo de manipulador empleado. Mediante la programación de trayectorias predefinidas y usando un manipulador adecuado, puede utilizarse el sistema descrito en [12] para mover cargas en más de un grado de libertad.

Un aspecto que debe tratarse con sumo cuidado es el estudio de la estabilidad de los DAM que funcionan en cooperación directa con el operario.



Fig 1. Dispositivo de ayuda a la manipulación de 6 grados de libertad (DAM)

Dicho tema se aborda en [13] para una grúa suspendida. En dicho DAM, el sensor de fuerza ha sido reemplazado por otro, que detecta la desviación del cable suspendido de su posición vertical; posteriormente, y de forma proporcional al ángulo de desviación, se origina movimiento en el plano horizontal que intenta anular el error angular. Entiéndase que el movimiento se realiza en dos grados de libertad x, y .

El problema de la estabilidad en los DAM constituye una complicación importante en aquellos sistemas dotados de sensores de fuerza en el elemento final del manipulador. Este tipo de DAM funciona bajo la modalidad manos en la carga (*hands on payload*), lo que elimina la necesidad de contar con asideros o botones, basta con que el operario ejerza fuerza sobre el elemento final del manipulador para originar movimiento. Es por ello que este tipo de DAM provee de las mejoras prestaciones ergonómicas al operario, no obstante, la “no-colocación” de sensores de fuerza y actuadores conlleva a problemas de estabilidad en su operación. La “no-colocación” de sensores y actuadores significa que los actuadores y sensores no residen en la misma ubicación física, encontrándose separados por elementos dinámicos. En el caso de robots, los actuadores están generalmente ubicados en las articulaciones y los sensores de fuerza se encuentran cerca del elemento final, separados de los actuadores por la dinámica de las transmisiones y la dinámica estructural de los eslabones. Este problema de estabilidad originado por la “no-colocación” de sensores y actuadores se aborda en [14].

Por otra parte los sensores de fuerza colocados en los DAM que funcionan en el modo manos-en-la-carga, requieren de alta resolución para poder detectar la fuerza aplicada por el operario y de un amplio rango dinámico para soportar el peso de la carga, lo que implica usar sensores de elevado costo.

Una versión mejorada del asidero descrito en [13] involucra el uso de un guante donde se incorpora un sensor de fuerza que detecta la presión ejercida por el operario sobre el manipulador. El diseño de dicho guante permite al operario mover el manipulador hasta en tres grados de libertad x, y, z [15]. El movimiento se realiza únicamente a través de trayectorias definidas previamente. El único sensor de fuerza que incorpora el guante indica al sistema de control del manipulador la rapidez con que debe moverse; en tal sentido, la fuerza aplicada por el operario y la rapidez del DAM son magnitudes proporcionales, no obstante, la dirección de la fuerza aplicada por el operario no necesariamente corresponde con la trayectoria descrita por el robot, ya que la única información recopilada por el guante es la magnitud de la fuerza aplicada, pero no su dirección y sentido.

Este capítulo presenta el diseño y desarrollo de un guante de datos particularizado para el control de un DAM de 6 grados de libertad capaz de manejar cargas de 75 kg (Véanse las Figs. 1 y 2); sin embargo, el sistema es aplicable a cualquier tipo de manipulador. La siguiente sección presenta el concepto básico y la sección 3 presenta en detalle el diseño de la sensorización del guante.

2 Interacción manipulador - guante de datos

El sistema que nos ocupa está basado en un guante dotado de sensores, diseñado para permitir a un operario controlar el movimiento de un manipulador industrial de seis grados de libertad (Véase la Fig. 1) que coordina su movimiento de acuerdo con la magnitud, dirección y sentido de la fuerza aplicada por dicho operario, pudiendo ejercer dicha fuerza sobre el manipulador o sobre la carga. Al incorporar un segundo guante en la otra mano,

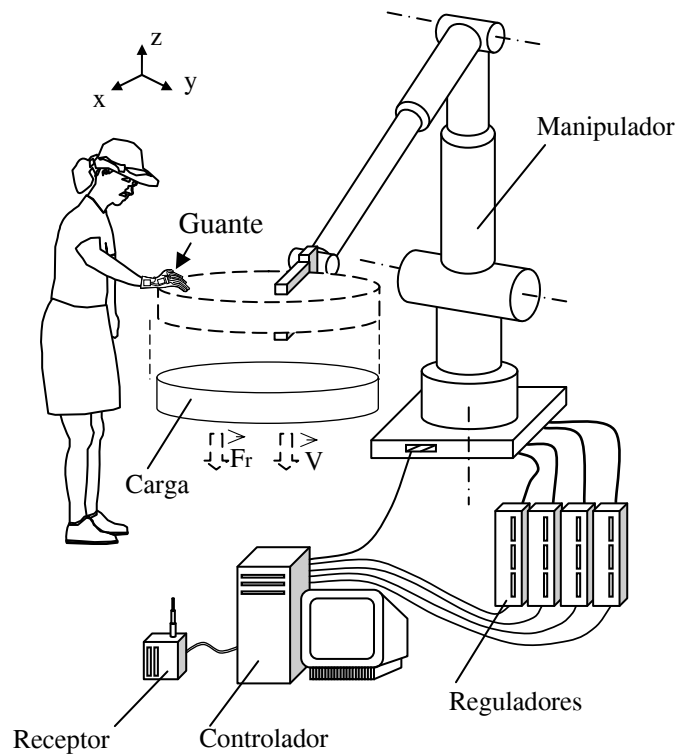


Fig 2. Esquema general del sistema

es posible detectar momentos de giro y consecuentemente orientar la carga en el espacio.

El sistema formado por dos guantes puede recoger información tanto de la posición y orientación de cada guante como del módulo, dirección y sentido de la fuerza aplicada. En ambos casos, un emisor inalámbrico puede enviar esta información del guante a un receptor conectado al computador de control que ejecuta los algoritmos necesarios para generar las consignas de velocidad de cada grado de libertad del manipulador.

Cada guante posee en la zona dorsal un sistema de posicionamiento dactilar que mide la flexión y abducción de los cinco dedos, y en la zona palmar un sistema de medición de fuerza dotado con al menos un sensor (véase la Fig. 3).

El sistema de posicionamiento dactilar está basado en una arquitectura comercial de guante de datos. Concretamente se utiliza el modelo *X-IST Dataglove HRI System* de la Compañía *nodna*. El sistema *HRI* está basado en tecnología de goniómetros resistivos y es capaz de digitalizar los movimientos de flexión de las falanges distal, media y proximal de los cinco dedos de la mano humana, adicionalmente mide la abducción del pulgar lo que totaliza dieciséis sensores de flexión/abducción. El guante de datos *HRI* se conecta a una unidad de digitalización denominada *ADBox24* con interfaz de salida USB la cual se conecta a la unidad de comunicación inalámbrica para el procesamiento de los datos.

Con el fin de medir la posición y orientación del guante en el espacio, se dispone de una Unidad de Medidas Inerciales (UMI) (véase la Fig. 3), dotada con acelerómetros y giróscopos que permite posicionar y orientar la mano en un espacio de tareas de hasta seis dimensiones, x , y , z , guiñada, cabeceo y balanceo. Preferentemente la UMI se ubica en el plano formado por la zona dorsal del guante. Al incluir la información suministrada por el sistema de posicionamiento dactilar se puede reconstruir tanto la posición y orientación de la mano en el espacio, como la flexión y abducción de los dedos. Dicha UMI se comunica con la unidad de comunicación inalámbrica mediante un cable.

Por otra parte el sistema de medición de fuerza está conformado por una serie de sensores de fuerza distribuidos uniformemente en toda la superficie palmar (véase la Fig. 3) y una unidad de medición de resistencia que se encarga de efectuar mediciones sobre todos los sensores de fuerza instalados en el guante. Esta información se envía a la unidad de comunicación inalámbrica ubicada en la zona dorsal del guante a través de un cable.

El sistema de medición de fuerza está basado en un número de sensores de fuerza del tipo piezoresistivo. Cada sensor de fuerza presenta dos terminales cuya conductividad cambia proporcionalmente a la magnitud de la fuerza aplicada. Los cables junto con sus terminales se agrupan por razo-

nes de ergonomía en pequeños grupos y se conectan a la unidad de medición de resistencia (véase la Fig. 3).

Los datos adquiridos por el sistema de posicionamiento dactilar, la UMI y el sistema de medición de resistencia son transmitidos a la unidad de comunicación inalámbrica, la cual los retransmite hasta un computador que se encarga de procesarlos para generar movimiento en el manipulador.

Para controlar el manipulador, el operario se coloca un guante en cualquiera de sus manos y ejerce presión sobre la carga en la dirección de movimiento deseada (Véase la Fig. 2). El módulo de la fuerza aplicada por el operario sobre la carga se obtiene a partir de las mediciones efectuadas en los sensores de fuerza del guante. La dirección y sentido de cada contribución de fuerza se obtiene a partir de la reconstrucción de la posición y orientación de la mano en el espacio. Dicha reconstrucción involucra conocer la posición y orientación de la mano así como la de los dedos, para ello el sistema se vale tanto de la unidad de medidas inerciales como del sistema de posicionamiento que mide la abducción y flexión de los dedos.

Con dicha información se obtiene una serie de vectores de fuerza (tantos como sensores de fuerza haya en el guante) los cuales se suman vectorialmente para conseguir un vector fuerza resultante, dicho vector es consecuentemente co-lineal con la intención de movimiento del operario.

Para controlar la velocidad del manipulador, el sistema se vale del módulo de la fuerza resultante, de tal forma que un incremento en la fuerza resultante produzca proporcionalmente un aumento en la rapidez del manipulador. El vector fuerza resultante provee de información suficiente al computador para controlar hasta tres grados de libertad de movimiento del manipulador x , y , z , con esto se logra posicionar la carga en tres dimensiones.

Para orientar la carga en el espacio es necesario contar con un segundo guante con las mismas prestaciones descritas. Los movimientos de orientación se coordinan a partir de los momentos de fuerza, cuya reconstrucción se realiza a partir del vector fuerza resultante de cada guante y de su posición en el espacio. El eje de giro, que se considera fijo para la medición de los pares de giro y vectores directores, puede encontrarse en cualquier punto de la distancia entre ambos guantes. En nuestro caso se utiliza un punto equidistantemente de ambos guantes con lo que se obtienen dos vectores directores de igual magnitud (ver las Fig. 4 y 5).

La velocidad de giro de la carga depende de la sumatoria vectorial de los momentos de giro medidos para cada guante. A mayor momento de giro, la velocidad rotacional crecerá proporcionalmente. Al igual que sucede con los movimientos traslacionales, los movimientos de rotación también son co-lineales respecto al momento resultante aplicado.

El eje de giro fijado para la medición de los momentos de fuerza, no coincide necesariamente con el eje de giro del manipulador ubicado en su elemento final, ya que el operario no debe aplicar necesariamente fuerza sobre la carga para moverla; el operario también puede ejercer presión sobre la estructura del propio manipulador, bien sea para ocasionar movimientos de traslación o rotación de la carga.

El manipulador controlado por el operario incorpora adicionalmente como elemento de seguridad un detector de contacto, de tipo electromagnético, por ejemplo, con el fin de determinar cuándo el operario efectivamente ejerce fuerza sobre la carga o el manipulador. La lógica de seguridad debe permitir el movimiento del manipulador única y exclusivamente cuando el operario ejerza fuerza sobre la carga o bien sobre el propio manipulador. Con esto se evitan movimientos involuntarios de éste, provocados por descuidos del operario al ejercer fuerza sobre algún elemento distinto a los mencionados. También es posible que dicho detector de contacto sea de tipo electrostático.

Las etapas del procedimiento de control para manipuladores descrito anteriormente, para el caso en que se emplee un solo guante, son las siguientes:

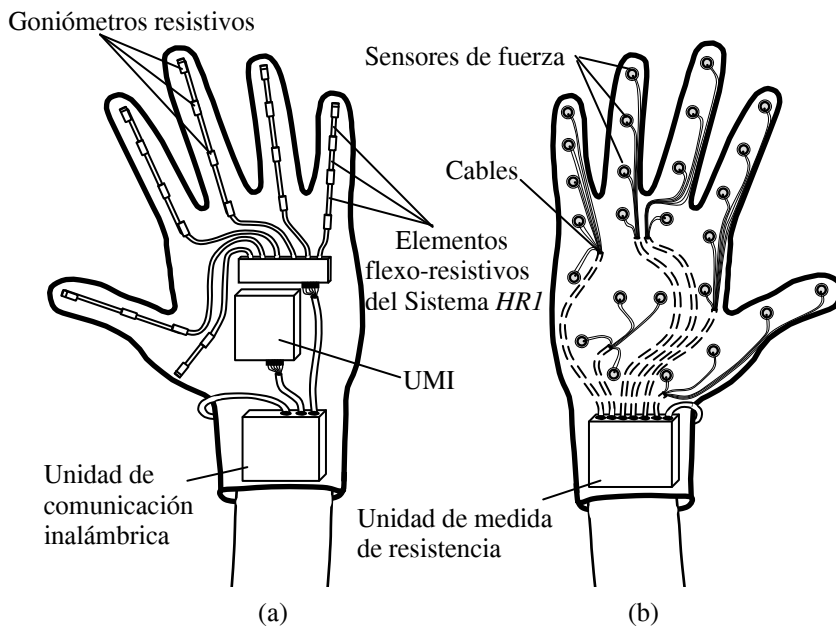


Fig. 3. Vista de: *Dataglove HRI System*, sistema de medición de fuerza y UMI, instalados en ambos lados del guante.
(a) Vista de la zona dorsal del guante
(b) Vista de la zona palmar del guante

ALGORITMO 1

1. Comprobar si el detector de contacto del manipulador está activado
2. Inhabilitar el manipulador en caso de que el detector de contacto no esté activado
3. Reconstruir la posición y orientación de la mano en el espacio en caso de que el detector de contacto esté activado
4. Leer los sensores de fuerza instalados en el guante
5. Generar los vectores de fuerza individuales de cada sensor de fuerza
6. Calcular la suma vectorial de los vectores de fuerza individuales para generar el vector fuerza resultante F_r
7. Aplicar la ley proporcional

$$V_r = k F_r$$

para generar los perfiles de velocidad correspondientes de cada grado de libertad

8. Transmitir los perfiles de velocidad al variador de frecuencia correspondiente para generar movimiento en el manipulador en tres grados de libertad (x, y, z)

Para el control de manipuladores empleando dos guantes el procedimiento de control comprende las siguientes etapas:

ALGORITMO 2

1. Comprobar si el detector de contacto del manipulador está activado
2. Inhabilitar el manipulador en caso de que el detector de contacto no esté activado
3. Reconstruir la posición y orientación de las manos izquierda y derecha en caso de que el detector de contacto esté activado
4. Leer los sensores de fuerza instalados en cada uno de los dos guantes
5. Generar los vectores de fuerza individuales de los sensores de fuerza de cada guante
6. Calcular la suma vectorial de los vectores de fuerza individuales para generar el vector de fuerza resultante de cada guante, F_{ri} , F_{rd}
7. Comprobar si alguno de los dos vectores de fuerza F_{ri} o F_{rd} son nulos
8. En caso de que los dos vectores de fuerza F_{ri} , F_{rd} sean distintos de cero, determinar los vectores directores R_i , R_d de cada vector de fuerza resultante.
9. Aplicar las leyes de la dinámica de cuerpos en el espacio para determinar la velocidad rotacional y traslacional de la carga
10. Transmitir cada perfil de velocidad al variador de frecuencia correspondiente para generar movimiento en el manipulador en hasta seis grados de libertad $(x, y, z, roll, pitch, yaw)$.

3 Diseño específico del guante de datos

El sistema de posicionamiento dactilar instalado en la zona dorsal (Véase la Fig. 3(a)) corresponde con un guante de datos comercial de la compañía *nodna* modelo *X-IST Dataglove HRI System*, su funcionamiento se basa en goniómetros resistivos que detectan variaciones de resistencia en materiales flexo-resistivos. El sistema *HRI* consta de tres segmentos de material flexo-resistivo por dedo, esto es así debido a la fisonomía de la mano que posee tres falanges por dedo (falange distal, media y proximal). Los segmentos de material flexo-resistivo están instalados de tal forma (Véase la Fig. 3(a)) en la zona dorsal de guante, que cuando el operador flexiona uno de sus dedos para coger un objeto, dicho material se dobla y consecuentemente se origina un cambio de resistencia en el mismo. Al medir dichas variaciones de resistencia para cada grado de libertad del dedo, es posible estimar su ubicación. Posteriormente aplicando las transformaciones cinemáticas correspondientes, es posible reconstruir la flexión de todos los dedos de la mano. Las mediciones de resistencia para cada segmento de material flexo-resistivo se realizan mediante los goniómetros resistivos indicados en la Fig. 3(a).

Los segmentos de materiales flexo-resistivo ubicados sobre los músculos abductores y oponentes del pulgar miden la abducción del pulgar con el mismo principio que para el resto de los dedos. En este caso específico se emplea únicamente un goniómetro resistivo para estimar la abducción del pulgar, no obstante pudieran incorporarse más sensores tanto en el pulgar como en el resto de los dedos con el fin de medir todos los grados de libertad con los que cuenta la mano humana, incluyendo los movimientos de la muñeca. En la medida en que se coloquen más sensores para medir el movimiento en las articulaciones de la mano, se mejorarían las prestaciones del sistema bajo los criterios de: ergonomía y correspondencia de la fuerza aplicada por el operador con la velocidad del manipulador, no obstante la esencia del sistema seguiría siendo la misma.

El convertidor analógico digital instalado en el *ADBox24* digitaliza las magnitudes de los dieciséis sensores de intensidad con los que cuenta el sistema de posicionamiento dactilar y transmite mediante un cable los paquetes de datos hasta la unidad de comunicación, que en nuestro caso consiste en una unidad inalámbrica.

Para posicionar y orientar a la mano en un espacio de tareas igual a seis x , y , z , *guiñada*, *cabeceo* y *balanceo* se emplea una Unidad de Medidas Inerciales, UMI de seis grados de libertad dotada con acelerómetros y giroscopios. La UMI se ubica en el plano formado por la zona dorsal del guante respecto al cual se referencian las mediciones de flexión y abduc-

ción de los dedos, pudiéndose reconstruir tanto la posición y orientación de la mano en el espacio, como la flexión y abducción de los dedos. La UMI se comunica con la unidad de comunicación inalámbrica mediante un cable.

La Fig. 3b describe el sistema de medición de fuerza instalado en la zona palmar de un guante diestro debajo del cual subyace convenientemente la zona palmar de la mano del operador. El sistema está conformado por sensores de fuerza piezoresistivos. Para el caso del dedo índice se cuenta con tres sensores de fuerza ubicados respectivamente en la zona palmar de la falange distal, media y proximal. El dedo anular, medio y meñique cuentan cada uno con tres sensores de fuerza. Dado que el dedo pulgar posee únicamente dos falanges, éste sólo cuenta con dos sensores de fuerza. De igual forma se dispone de sensores para medir la fuerza ejercida por los músculos abductor y oponente del dedo pulgar. Adicionalmente el sistema cuenta con diez sensores para medir la distribución de fuerza en la palma de la mano, repartidos uniformemente sobre ella.

Los cables de cada sensor de fuerza son los terminales del sensor piezoresistivo cuya conductividad cambia proporcionalmente conforme la magnitud de la fuerza aplicada. La unidad de medición de resistencia se encarga de efectuar mediciones sobre todos los sensores de fuerza instalados en el guante. Dicha información se envía a la unidad de comunicación inalámbrica ubicada en la zona dorsal del guante a través de un cable.

Para mejorar la ergonomía del guante, los terminales de los sensores de fuerza se agrupan convenientemente en grupos de varios cables y se colocan en envolturas para facilitar el traslado de los mismos hasta la unidad de medición de resistencia.

La Fig. 2 muestra a un operador usando en su mano derecha el guante descrito en la presente invención para controlar un manipulador de estructura angular de cuatro grados de libertad ($x, y, z, balanceo$). No obstante la interfaz de control descrita es capaz de controlar cualquier manipulador. La pinza instalada en el robot angular de la Fig. 2 sujeta a la carga que se desplaza hasta su posición final por acción de la fuerza resultante F_r ejercida por el operador. Para estimar la magnitud, dirección y sentido de la fuerza resultante F_r , el guante sensorizado debe valerse tanto del sistema de posicionamiento espacial de la mano como del sistema de medición de fuerza; mediante ambos puede reconstruirse la magnitud, dirección y sentido de las dieciséis contribuciones individuales de fuerza correspondientes a cada sensor. Para obtener el vector fuerza resultante F_r bastará con sumar vectorialmente dichas contribuciones.

Las Figs. 4 y 5 ilustran el procedimiento de suma vectorial para un caso particular donde sólo intervienen siete contribuciones individuales de fuerza ($F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7$), las contribuciones individuales F_5, F_6, F_7 co-

responden a los sensores de fuerza del dedo índice de las falanges distal, media y proximal respectivamente. La contribución individual F_1 , correspondiente al sensor de fuerza de la falange distal del dedo pulgar también existe, por encontrarse la carga en contacto con dicho punto. Lo mismo sucede con la contribución F_4 . No obstante las contribuciones F_2 y F_3 correspondiente a un sensor del dedo pulgar y otro de la palma son nulas, debido a que no existe contacto entre ellas y la carga.

Después de generar las contribuciones individuales $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7$, se procede a realizar su suma vectorial y generar el vector fuerza resultante F_r , a partir del cual, aplicando la ley proporcional

$$V_r = k F_r$$

se obtiene la velocidad resultante V_r , donde K es un escalar que representa la sensibilidad del guante a la fuerza aplicada por el operador, nótese que tanto F_r como V_r son co-lineales y están relacionados mediante K .

La fuerza resultante F_r y la velocidad resultante V_r se transmiten desde la unidad de comunicación inalámbrica instalada en la zona dorsal del guante hasta el receptor inalámbrico conectado al controlador del manipulador. En la Fig. 2 se observa además el computador de control que recibe las coordenadas del vector velocidad resultante V_r provenientes del receptor inalámbrico y genera las consignas de velocidad para cada grado de libertad, las cuales se transmiten a los variadores de frecuencia que manejan cada uno de los motores del manipulador.

La Fig. 2 muestran al operador ejerciendo presión directamente sobre la carga, no obstante también se permite el movimiento de la carga por acción de una fuerza ejercida por el operario sobre el manipulador, con esto se amplía considerablemente el área sobre la cual el operador puede ejercer presión para controlar al robot.

Con el fin de evitar movimientos involuntarios del DAM se instala un detector de contacto distribuido en el manipulador, el cual de acuerdo a una realización preferente de la invención ha consistido en uno del tipo electromagnético. El campo electromagnético generado por el detector está confinado a la estructura metálica del manipulador y la carga, dicho campo se altera únicamente cuando el operario toca al DAM o a la carga, bajo tal condición está permitido el movimiento del robot. En aquellos casos en los cuales el operador ejerza presión sobre algún elemento diferente a los mencionados, el detector de contacto distribuido no se activará y por consiguiente el movimiento del DAM se inhabilitará.

El operador de la Fig. 2 al emplear un guante sensorizado en su mano derecha puede controlar el movimiento del manipulador y por ende de la carga hasta en tres grados de libertad x, y, z . Para poder orientar a la carga y proveer de seis grados de libertad de movimiento: $x, y, z, \text{guiñada, cabeceo y balanceo}$, es necesario contar con un segundo guante en la mano iz-

quiera tal como se muestra en la Fig. 4. Los guantes derecho e izquierdo son imagen especular uno del otro y poseen las mismas funcionalidades y características descritas previamente.

Los sistemas de posicionamiento espacial y dactilar situados en el guante derecho e izquierdo, conjuntamente con los sistemas de medición de fuerza instalados en el guante derecho e izquierdo, permiten generar dos vectores de fuerza resultante; F_{ri} y F_{rd} con sus respectivos vectores directores R_i y R_d , lo que permite obtener un par T y por consiguiente una velocidad angular ω cuya dirección y sentido va a depender de las fuerzas aplicadas por el operador.

La fuerza resultante para cada guante: F_{ri} para el izquierdo y F_{rd} para el derecho, se obtienen de la misma forma para el caso donde se emplea un solo guante; en tal sentido se obtienen los vectores individuales de fuerza correspondientes a cada sensor y luego se efectúan las dos sumas vectoriales.

Los vectores directores R_i y R_d son considerados de igual magnitud y di-

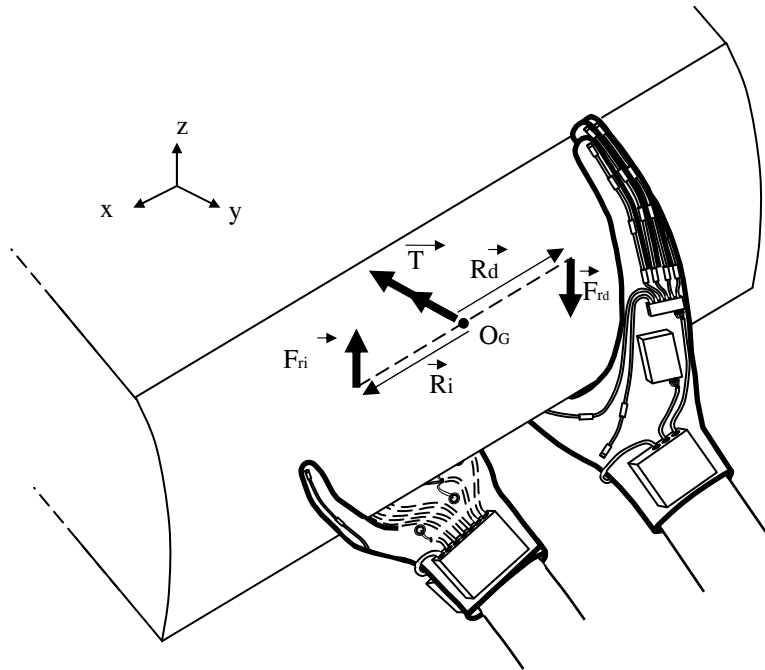


Fig. 4. Distribución de las fuerzas individuales aplicadas por un operador sobre la carga, cuando emplea ambas manos para orientar al objeto en el espacio. Los vectores F_{ri} y F_{rd} son antiparalelos y por tanto generan sólo componente de rotación en la carga

rección pero en sentido contrario, lo que implica que el punto imaginario de giro de la carga, O_G , se sitúa espacialmente en el punto medio de la distancia entre ambos guantes.

El par T y la velocidad angular ω medidos por los sistemas instalados en los guantes de la mano derecha e izquierda del operador requieren la aplicación de las leyes dinámicas de sólido rígido en el espacio con el fin de determinar la velocidad traslacional y angular ω de la carga.

Para el caso particular mostrado en la Fig. 4, tanto las fuerzas resultantes F_{ri} y F_{rd} como los vectores directores R_i y R_d son iguales en magnitud y dirección pero en sentido contrario; al aplicar las leyes dinámicas de sólido rígido en el espacio se deduce que la velocidad traslacional es nula existiendo únicamente componente angular ω .

La Fig. 5 muestra un caso donde el operador emplea dos guantes para controlar a la carga y coexisten tanto velocidades de rotación ω como de traslación V_i . Nótese que para este caso las componentes de fuerza resultante de cada guante F_{ri} y F_{rd} son ortogonales entre sí y generan cada una componentes de velocidad de rotación ω y traslación V_i que deben determinarse a través de las leyes dinámicas de sólido rígido en el espacio.

Al igual que sucede para la modalidad de control donde el operador emplea una sola mano, los vectores fuerza resultante de cada guante F_{ri} , F_{rd} y los vectores directores R_i y R_d se transmiten desde la unidad de comunicación inalámbrica de cada guante hasta el receptor inalámbrico conectado al computador que genera las consignas para cada actuador.

Aún cuando la Fig. 2 muestre a un operador ejerciendo presión directamente sobre la carga con ambas manos para originar movimientos traslacionales y rotacionales; es también posible generar dichos movimientos mediante acción directa del operador sobre la estructura metálica del manipulador, esto se hace para mantener la compatibilidad con la modalidad de operación bajo un solo guante, en cuyo caso el movimiento del conjunto está permitido bien sea que el operador ejerza presión sobre la carga o el manipulador.

El eje de giro O_G , fijado para la medición de los momentos de fuerza T , no necesariamente coincide con el eje de la carga o con su centro de masa, esta peculiaridad es una variante del sistema para permitir los movimientos rotacionales de la carga en aquellos casos en los cuales el operador no ejerza presión sobre ella sino sobre el robot. En cualquier caso, el eje de giro O_G se considera ubicado en el punto medio de la distancia entre ambos guantes, bien sea que el operador actúa sobre la carga o sobre el manipulador.

También es necesario para la modalidad de control donde se emplean dos guantes el uso del detector de contacto distribuido, con el fin de evitar movimientos involuntarios del DAM. La lógica de seguridad es la misma

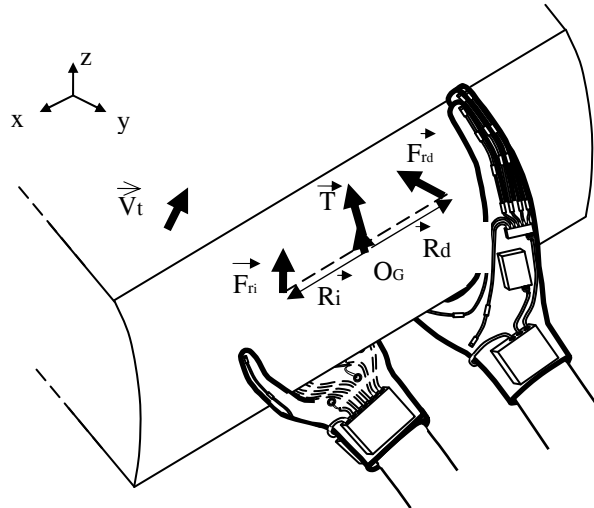


Fig. 5. Distribución de las fuerzas individuales aplicadas por un operador sobre la carga, cuando emplea ambas manos para desplazar al objeto en el espacio. Los vectores F_{ri} y F_{rd} no guardan relación entre sí y por tanto generan componentes de velocidad de rotación y traslación.

independientemente si se usan uno dos guantes para controlar al DAM, en tal sentido el movimiento del manipulador se permite únicamente cuando el sensor de contacto se encuentra activado.

En aquellos casos en los cuales el detector de contacto se encuentre activado y alguno de los dos vectores fuerza resultante sea nulo, los movimientos del robot se permiten sólo en tres grados de libertad x , y , z , y se asume el vector fuerza resultante de la mano derecha F_{rd} o izquierda F_{ri} según sea el caso, como el único existente y a partir de dicho vector se genera la velocidad resultante V_r correspondiente, usándose los mismos criterios para la modalidad de control de un solo guante.

La Fig. 6 muestra una imagen del guante *X-IST Dataglove HRI System* incluyendo el *ADBox24* el cual se comunica con un módulo de procesamiento de datos basado en FPGA, que hace las veces del PC industrial descrito previamente. Para la fase actual de desarrollo del proyecto aún no se ha incorporado la comunicación inalámbrica, efectuándose por ahora mediante cables, la comunicación entre el sistema *HRI* y el módulo de procesamiento de datos.

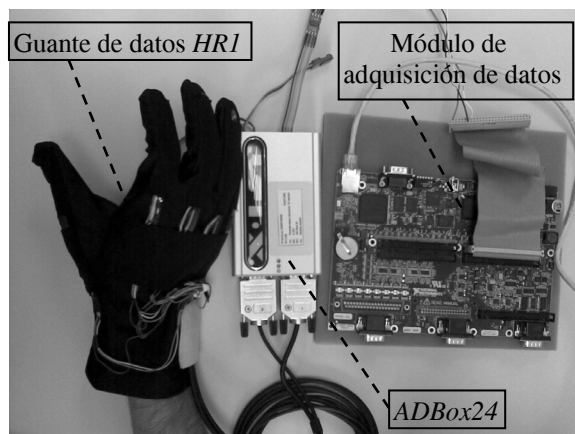


Fig. 6. Guante *HRI* con *ADBox24* y sistema de adquisición de datos basada en tecnología de *FPGA*

Referencias

- [1] Colgate E., Peshkin M., Klostermeyer S., “Intelligent Assist Devices in Industrial Applications: A Review”, *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2003.
- [2] Peshkin M., Colgate E., Wannasuphprasit W., Moore C., Brent R., et al. “Cobot Architecture”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, N. 4, pp. 377-390, Agosto 2001.
- [3] Peshkin M., Colgate E., Santos-Munné J., Meer D., Lipsey J., et al., “Modules for use in an integrated intelligent assist system”, *patente US 6,813,542*. 11 Febrero 2004.
- [4] Peshkin M., Colgate E., Santos-Munné J., Meer D., Lipsey J., “System and Architecture for providing a modular intelligent assist system”, *patente US 6,928,336*. 9 Agosto 2005.
- [5] Shahoian E., Hasser C., Rosenberg L., “Haptic feedback Control Devices”, *patente US 6,184,868*. 6 Febrero 2001.
- [6] Rodomista G., Ziegler A., Goodwin W., Bolton C., Massie T., et al., “Force reflecting haptic interface”, *patente US 6,985,133*. 10 Enero 2006.
- [7] Kramer J., “Force feedback and texture simulating interface device”, *patente US 5,184,319*. 2 Febrero 1993.
- [8] Wright S., Wright R., “Optical attenuator movement detection system”, *patente US 5,184,009*. 2 Febrero 1993.

- [9] de Dipietro, L., Sabatini, A. y Dario, P., "A Survey of Glove-Based Systems and Their Applications", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 38, N. 4, pp. 461-482, 2008.
- [10] Tarchanidis K.N., Lygouras J.N., "Data Glove with a Force Sensor", *Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Budapest, 21-23 May, 200, pp 380-385.
- [11] Kazerooni H., "Human power amplifier for vertical maneuvers", *patente US 5,865,426*. 2 Febrero 1999.
- [12] Kazerooni H., "Pneumatic human power amplifier module", *patente US 5,915,673*. 29 Junio 1999.
- [13] Colgate E., Makhlin A., "Methods and apparatus for eliminating instability in intelligent assist devices" *patente US 7,043,337*. 9 Mayo 2006.
- [14] Colgate, E. y Hogan, N., "The Interaction of Robots with Passive Environments: Application to Force Feedback Control", *Advanced Robotics*, Kenneth J. Waldron, ed., Springer-Verlag , Berlin , 1989.
- [15] Kazerooni H., Fairbanks D., Chen A., Shin G., "Device and method for wireless handling systems", *patente US 6,681,638*. 27 Enero 2004.