

Telecontrol de un manipulador 5R mediante captura de movimientos

José Carlos Cudris Cantillo*

Ing. Mecatrónico, Investigador Grupo GRAM – Facultad de Ingeniería Mecatrónica y UNITEL – Facultad de Ingeniería de Telecomunicaciones, Universidad Santo Tomás USTA
Bucaramanga, Colombia

*Becario Colciencias Programa Joven Investigador e Innovador “Virginia Gutiérrez de Pineda” 2008.
ing.investigacion2@mail.ustabuca.edu.co

Paola Fernanda Guzmán Castillo

M.Sc Ingeniería Electrónica
Universidad Industrial de Santander
Docente Tiempo Completo, Línea de Investigación en Telemática – Unidad de Investigaciones en Ingeniería de Telecomunicaciones UNITEL Universidad Santo Tomás USTA
Bucaramanga, Colombia
paolaguzman@gmail.com

Luis Rodrigo Mancilla López

Ing. Mecatrónico, Investigador Grupo GRAM – Facultad de Ingeniería Mecatrónica y UNITEL – Facultad de Ingeniería de Telecomunicaciones, Universidad Santo Tomás USTA
Bucaramanga, Colombia
ing.investigacion1@mail.ustabuca.edu.co

César Hernando Valencia Niño

M.Sc. da Engenharia Mecânica,
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Docente Tiempo Completo, Director Línea de Investigación en Automatización, Control y Robótica Grupo de Aplicaciones Mecatrónicas– GRAM Universidad Santo Tomás USTA
Bucaramanga, Colombia
cesar.valencia@ufrj.br

Resumen- La intervención de operadores humanos aún es necesaria en las tareas de control, dado el alto nivel de precisión y capacidad de reacción ante eventos inesperados requeridos en algunos casos. Los sistemas electrónicos de control facilitan la interacción entre el hombre y la máquina y simplifican el proceso de entrenamiento de los operarios. La intervención del operador se puede producir de diversas formas, mediante teleoperación directa de los actuadores, especificación de movimientos o incluso mediante tareas que se realizan de forma automática en entornos remotos.

Tecnologías inherentes a la teleoperación, como los sistemas de telecomunicaciones, la robótica, dispositivos hápticos y la realidad virtual reflejan un notable avance en términos de las aplicaciones de la teleoperación. Se han reportado avances en campos como la telecirugía, donde la precisión es un factor fundamental, misiones de rescate, y el control de robots en el espacio entre otros. Este artículo se centra en los sistemas robóticos teleoperados por una interfaz de control que captura los movimientos realizados por un operador y los transfiere a los actuadores de un manipulador.

Palabras Clave Telecontrol, Telepresencia, Teleoperación, Visión Estereoscópica 3D, Superposición de Video, Captura de Movimientos Humanos.

Abstract- The intervention of human operators is still needed in control tasks, given the high level of accuracy and ability to react to unexpected events sometimes required. The electronic control systems facilitate man and machine interaction and simplify operators training process. Operator intervention may occur in various ways, through direct teleoperation of the actuators, specification of mo-

vement or through tasks that are performed automatically in remote environments.

Technologies inherent to teleoperation such as telecommunications systems, robotics, haptic devices and virtual reality make a notable advance in terms of teleoperation applications, we begin to enter on telesurgery field where precision is very important, on the other hand we have the teleoperation on rescue missions, control of robots in space and others. In this paper we will focus on teleoperated robotic systems by a control interface that captures movements made by an operator and transferred to manipulator actuators.

Keywords- Telecontrol, Telepresence, Teleoperation, 3D Stereoscopic Vision, On-Screen Display, Human Movements Tracking.

I. INTRODUCCIÓN

La extensión de los sentidos para la realización de un trabajo a distancia con la ayuda de pinzas, palas o cualquier otro tipo de herramienta, es y será un tema de gran interés, dadas las ventajas en términos de seguridad y reducción del esfuerzo físico que implica para los seres humanos. Pero no sólo se utilizan herramientas para aumentar la capacidad de manipulación en cuanto a distancia se refiere. El uso de herramientas como las pinzas ha sido frecuente desde hace mucho, para transportar o manipular objetos peligrosos para el ser humano.

Estos desarrollos desembocaron finalmente en lo que se conoce como sistemas de tele operación maestro-esclavo, en los que un manipulador denominado esclavo reproduce fielmente los movimientos de un dispositivo o manipulador maestro, controlado a su vez manualmente por un operador humano. Se puede decir que es entonces cuando la teleoperación cobra importancia como tecnología.

La idea inicial para el desarrollo del sistema surge a partir de una inquietud planteada por una entidad relacionada con Seguridad Nacional, donde se manifestaba la necesidad de contar con un sistema de bajo costo, portabilidad y alto grado de resistencia, que ofreciera la posibilidad de manipular de manera remota objetos de un peso máximo de 3Kg, a una distancia mínima de seguridad de 50m.

A partir de estos requisitos y mediante una metodología de diseño concurrente, centrada en el desarrollo de los tres componentes principales del sistema (Sistema de Visión, Interfaz Telecontrol y Captura de movimientos y Sistema Mecánico) se enfocó el desarrollo del prototipo en mención.

En el presente artículo se describen cada una de las etapas seguidas para el diseño y desarrollo del sistema. Inicialmente se presentan la interfaz de telecontrol y captura de movimientos. Posteriormente se presentan las particularidades del sistema de visión que provee la función de telepresencia, la descripción del proceso diseño del manipulador y se finaliza con el proceso de integración y pruebas del sistema.

II. INTERFAZ DE TELECONTROL

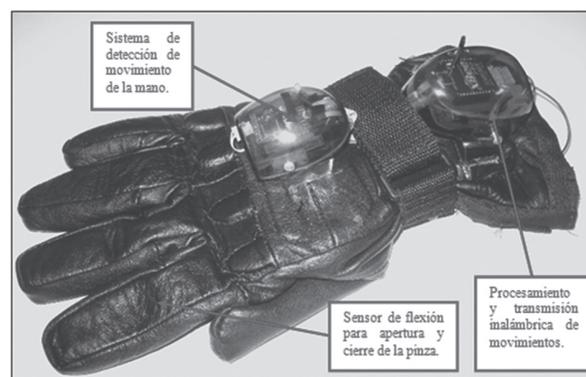
La interfaz de telecontrol permite maniobrar las articulaciones del manipulador y, a su vez, está conformada por un guante adaptado con los dispositivos de medición necesarios para la captura de los movimientos de la mano del operario. Dentro de los elementos empleados se encuentra un acelerómetro tri-axial análogo ADXL330 y sensores de flexión resistivos FlexSensor para lectura de flexión del dedo índice encargado de la apertura y cierre de la pinza. Todos los dispositivos del sistema de telecontrol (Fig. 1) están conectados a un microcontrolador central que trabaja a una frecuencia de reloj de 20MHz y una resolución de 10bits para el módulo ADC. Debido a que con

un acelerómetro no es posible por sí sólo medir rotaciones alrededor del eje en dirección de la gravedad, se utiliza un compás digital tri-axial HMC6343 con compensación de inclinación situado en las gafas del sistema de visión.

El compás permite la captura de los movimientos de la cabeza en los tres ejes del plano cartesiano, se comunica con el microcontrolador central a través de un bus I2C el cual procesa y transmite los datos de forma serial por medio de un transceptor XBEE-Pro. El transceptor puede transmitir datos a un 1Km de distancia en línea de vista, con una frecuencia de 250Kbps en la banda libre ISM 2.4GHz, los transceptores están configurados para trabajar en modo punto a punto donde los datos son transmitidos a una dirección de destino y luego se recibe respuesta desde una dirección fuente previamente establecidas. La integración de todos estos dispositivos (Fig. 1) le permite al operario conectarse y controlar a distancia los actuadores del manipulador sin la necesidad de utilizar botones o palancas.

En pruebas realizadas en zona urbana, se obtuvo una transmisión estable a una distancia promedio de 200m en zonas libres de obstáculos, y 50m con obstáculos (paredes de ladrillo y concreto). Los datos y comandos son enviados en forma serial desde el microcontrolador al XBEE-Pro, en la trama de datos se envía primero un comando que identifica al actuador y la acción que se quiere realizar seguido del valor de la acción. Por ejemplo, girar el actuador 3 a la derecha 20°, en este caso la acción girar el actuador 3 a la derecha sería el comando mientras que 20° sería el valor de dicha acción. Para terminar la comunicación se envía un byte de terminación (CR).

FIG. 1. INTERFAZ DE TELECONTROL



III. CAPTURA DE MOVIMIENTOS CON ACELERÓMETRO Y COMPÁS

Un acelerómetro es un dispositivo que permite medir la fuerza del campo gravitacional terrestre en diferentes ejes, esto quiere decir que con un poco de aritmética se puede calcular la orientación de cualquier objeto unido a él.

El acelerómetro está ubicado en la parte superior del guante (dorso de la mano) y es utilizado para medir la inclinación de la mano del operario para calcular la aceleración estática.

A. Cálculo de la aceleración estática

El primer paso es adquirir la señal (Fig. 3) del acelerómetro en el microcontrolador y convertirla a su valor aproximado en unidades reales (Voltios) mediante (1).

$$V_r = \left(\frac{V_{ref}}{Res} \right) V_d \quad (1)$$

V_r: Valor del voltaje resultante

V_{ref}: Voltaje de referencia del controlador

Res: Resolución del ADC (con un ADC de 10 bits, la resolución será 1024)

V_d: Valor no tratado del ADC (valor digital).

Posteriormente, mediante (2) se convierte el valor obtenido a unidades de G (fuerza de aceleración).

$$A_g = \left(\frac{V_r - V_{offset}}{S} \right) \quad (2)$$

A_g: Valor resultante de la aceleración en unidades de G

V_r: Voltaje obtenido en la ecuación 1

V_{offset}: Voltaje de compensación (cuando se obtiene una aceleración de 0G), es diferente para cada uno de los ejes

S: Sensibilidad (escala) del acelerómetro en voltios, depende de la tensión de alimentación del dispositivo.

Se denomina a cada una de las aceleraciones en unidades de g, como G_x, G_y, G_z, las ecuaciones para calcular el ángulo de inclinación (*Pitch*) y rotación (*Roll*) quedarían.

$$Pitch = \alpha = \arctan \left(\frac{G_x}{\sqrt{G_y^2 + G_z^2}} \right) \quad (3)$$

$$Roll = \beta = \arctan \left(\frac{G_y}{\sqrt{G_x^2 + G_z^2}} \right) \quad (4)$$

Donde el pitch es el ángulo de rotación alrededor del eje Y, y roll el ángulo de rotación alrededor del eje X. Los valores de los ángulos obtenidos se representan en grados en un rango de -180° a 180° y luego son enviados al controlador del manipulador. De este modo se pueden rotar el hombro, el codo y la muñeca correspondientes a las articulaciones 2, 3 y 5 respectivamente (Fig. 7).

En la Fig. 2, se muestran las amplitudes en voltios de las señales en los ejes X, Y, Z, respecto al voltaje de 0G (voltaje offset aproximadamente 1.62V), al cambiar la orientación del acelerómetro de una posición de 0° a una de -90°.

Esto significa que inicialmente el plano XY del acelerómetro era perpendicular a la dirección de la gravedad, luego se realizó un giro de -90° alrededor del eje Y para quedar ahora perpendicular a la dirección de la gravedad el plano YZ. La amplitud del eje Y no cambia debido a que no sufre cambios en su orientación. Las fluctuaciones en las señales se deben al ruido del ambiente y las vibraciones causadas por el movimiento del acelerómetro. Al tomar los valores promedios aproximados de cada señal y aplicar (2), (3) y (4) se puede realizar un cálculo rápido para verificar la exactitud del sistema.

Parámetros constantes:

V_{offset_X} = 1.62V

V_{offset_Y} = 1.62V

V_{offset_Z} = 1.56V

S = 330mV/G

Valor promedio aproximado de las amplitudes:

V_{r_X} = 1.339V

V_{r_Y} = 1.621V

V_{r_Z} = 1.559V

Aplicando (2):

A_{g_X} = -0.8515G

A_{g_Y} = 0.0030G

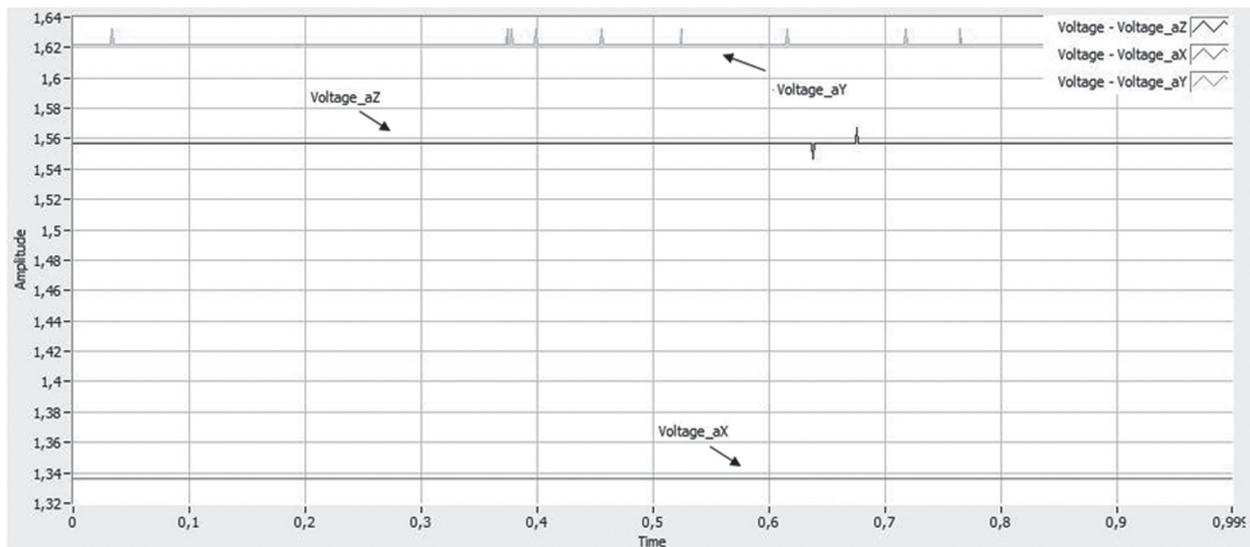
A_{g_Z} = -0.0030G

Por último, aplicamos (3) y (4):

Pitch = -89.7°

Roll = 0.20°

FIG. 2. RESPUESTA DEL ACELERÓMETRO PARA UN ORIENTACIÓN DE 90° RESPECTO AL EJE Y.



Al tener en cuenta que estos valores dependen de la exactitud de la rotación, los resultados obtenidos son satisfactorios y cercanos a los reales, puesto que según el fabricante el error debería ser de 0.1° .

En cuanto al compás, es un dispositivo que combina acelerómetros y sensores magneto-resistivos de 3 ejes y un microprocesador que realiza todos los cálculos y procesamiento. Estas características hacen posible medir tanto orientación como inclinación con respecto al campo magnético terrestre y la gravedad, lo que disminuye el error acumulativo que se presenta normalmente con los sensores con medidas relativas.

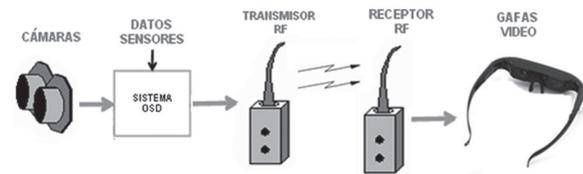
El compás está montado sobre las gafas de TV y permite medir la inclinación de la cabeza del operario con respecto a la dirección de la gravedad, en un rango de -180° a 180° y la orientación de 0° a 360° con respecto al norte magnético terrestre, esto es importante porque es un punto constante que no cambia su posición, estas dos medidas son entregadas por el sensor en grados y por tanto no son necesarias operaciones adicionales, luego son enviadas al controlador del manipulador para mover la base y la muñeca (articulación 1 y 4 respectivamente).

IV. SISTEMA DE VISIÓN

El sistema de visión le brinda al operario la sensación de inmersión y la percepción de profundidad. Consta de una cámara estereoscópica, gafas para

visualización de video, sistema OSD (On Screen Display) para superposición de información en el video, transmisor y receptor de video analógico, como se muestra en Fig. 3.

FIG. 3. DIAGRAMA DE BLOQUES SISTEMA DE VISIÓN

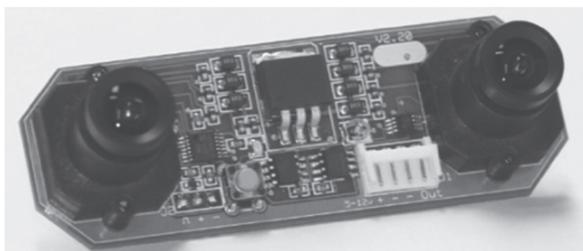


A. Cámara Estereoscópica

La visión estereoscópica es la integración de dos imágenes vistas desde puntos diferentes en una sola. Para el proyecto se adquirió una cámara estereoscópica FPV3D que consta de dos cámaras separadas (Fig. 4), y un sistema de procesamiento encargado de unir en una sola señal análoga el video de ambas cámaras en formato NTSC, de esta forma se puede percibir la profundidad de los objetos que se observan, emulando la forma en que trabaja la visión humana.

Para crear el video estereoscópico se capturan dos imágenes de una misma escena desde puntos de vista diferentes. Mediante un método llamado Field Sequential 3D Video, que utiliza el campo de líneas pares de la imagen de una cámara y las entrelaza con el campo de líneas impares de la imagen de la otra cámara.

FIG. 4. CÁMARA ESTEREOSCÓPICA



La FPV3D forma una sola imagen que contiene información de una misma escena desde perspectivas diferentes, el video se visualiza a una frecuencia de 60Hz para evitar parpadeos. Con la cámara instalada sobre la pinza del manipulador se pueden agarrar y manipular objetos de una forma más segura y precisa que si no se contara con algún sistema de supervisión.

B. Sistema OSD (On Screen Display)

Un circuito integrado MAX7456 es el encargado de superponer la información de los sensores de distancia y fuerza ubicados en la pinza del manipulador. Los datos son leídos por un microcontrolador 18F2550 y enviados posteriormente al OSD mediante comunicación serial SPI (Serial Peripheral Interface), para que sean añadidos al video estereoscópico y posteriormente enviados a las gafas de TV inalámbricamente, por medio del transmisor y receptor de video a una distancia máxima de 100m.

El video es transmitido punto a punto mediante radio frecuencia en la banda libre de 1.2GHz, a una distancia máxima de 30m a través de obstáculos (Paredes de ladrillo y concreto) y 80m en línea de vista en condiciones ambientales ideales según pruebas realizadas. El video es recibido por el receptor y enviado directamente a las gafas para su visualización.

C. Gafas de Televisión

Las gafas de TV AW310ws (Fig. 5) soportan el formato de video estereoscópico y para que sea visualizado de forma correcta por el operador, toma cada una de las imágenes entrelazadas, separa los campos par e impar, mostrándolas por separado en cada una de las lentes derecho e izquierdo con una resolución de 640x480 pixeles, el cerebro humano es el encargado de volver a fusionar estas dos imágenes y crear la sensación de profundidad.

FIG.5. GAFAS, COMPÁS Y RECEPTOR DE VIDEO



V. DISEÑO DEL MANIPULADOR

Se realizó la revisión y el análisis de diferentes estructuras y configuraciones de manipuladores existentes, se tuvo como referencia el desempeño esperado, se llegó a la conclusión que el diseño tendría una configuración esférica con cinco grados de libertad, tres de las cuales se utilizan para posicionar el efector final y las dos restantes para dar la orientación a la muñeca (Fig. 6), Q1 simboliza la primera articulación (Base) y Q5 la última articulación a la cual esta acoplada la pinza, en la Tabla I se describen cada una de las articulaciones, su función y rangos de giro máximo y mínimo en grados.

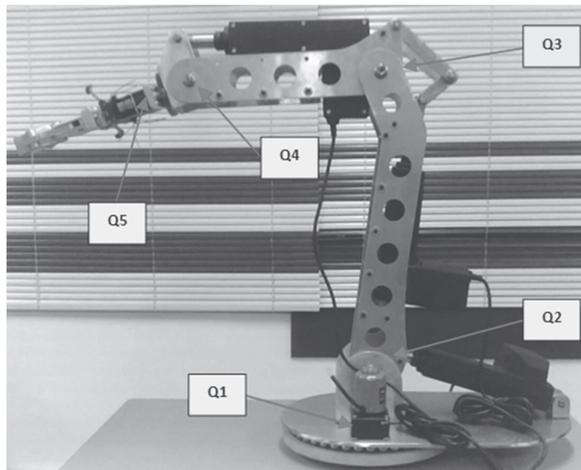
TABLA I

ARTICULACIONES Y SU FUNCIÓN

ARTICULACIONES		
Nº	NOMBRE	ACCION
1	Base	Gira el cuerpo (0°, +180°).
2	Hombro	Sube o baja brazo (0°, +90°).
3	Codo	Sube o baja el antebrazo (0°, +70°).
4	Muñeca	Sube baja la pinza (-90°, +90°).
5		Gira la pinza (-90°, +90°).
6	Pinza	Abre o cierra (0, 10cm).

La ventaja de utilizar este tipo de configuración y no una cilíndrica o cartesiana por ejemplo, es que emula en un gran porcentaje las articulaciones y movimientos de un brazo humano, para satisfacer los requerimientos planteados. Tiene un buen acceso a espacios cerrados con obstáculos lo que permite una muy buena manipulación de los objetos, además de brindar un amplio espacio de trabajo y facilidades para su construcción, ya que básicamente consiste en unir eslabones mediante ejes para crear una articulación y luego adaptar los actuadores para crear el movimiento rotatorio, sin la necesidad de acoplar mecanismos adicionales como en el caso de una articulación prismática.

FIG. 6. MANIPULADOR DE CINCO GRADOS DE LIBERTAD



Dentro de las características de diseño del manipulador se planteó una longitud máxima de alcance de 1m totalmente extendido y una capacidad de carga de 5Kg, sensores de fuerza en los dedos de la pinza y un sensor de distancia para calcular la posición de los objetos.

En el modelado del manipulador se utiliza la cinemática directa para calcular la posición X, Y, Z, de un punto del efector final con base a las variables articulares Q_i , que dependen exclusivamente de los ángulos leídos por el compás y el acelerómetro producto de los movimientos que realiza el operador, con lo que la tarea de controlar los movimientos del manipulador se reduce básicamente a copiar los ángulos del brazo del operario y transmitirlos al controlador del manipulador para que sean reproducidos.

En cuanto a la cinemática inversa y dinámica del manipulador, no se tuvo en cuenta puesto que los movimientos son muy lentos y dependen de las medidas que arrojen el compás y el acelerómetro.

A. Modelo cinemático del manipulador

El problema cinemático directo consiste en encontrar las relaciones que permiten conocer la posición de la pinza del manipulador, con referencia a un sistema de coordenadas fijo a partir de sus valores articulares. Para un manipulador de cinco grados de libertad puede plantearse un método sistemático basado en la representación de Denavit-Hartenberg (D-H) que mediante unos parámetros definidos en la Tabla II permite establecer las relaciones de rotación y traslación entre articulaciones [1].

TABLA II. PARÁMETROS DE D-H.

i	α_{i-1}	a_{i-1}	θ_i	d_i
1	0	0	q_1	0
2	90°	0	q_2	0
3	0	a_2	q_3	0
4	0	a_3	q_4	0
5	90°	0	q_5	0

Para la elección de los sistemas de referencia y parámetros de D-H, se eligió la convención de Craig (1986) [1], la cual permite pasar de un sistema de referencia de una articulación al siguiente mediante 4 transformaciones básicas que dependen exclusivamente de las características geométricas del eslabón [2], estas operaciones se deben realizar en el mismo orden que se presentan en (5), puesto que el producto entre matrices no es conmutativo.

- Rotación alrededor del eje X_i un ángulo α_i
- Traslación a lo largo de X_i una distancia a_i
- Rotación alrededor del eje Z_{i-1} un ángulo θ_i
- Traslación a lo largo de Z_{i-1} una distancia d_i

De este modo se tiene,

$$T_i^{i-1} = R(X_{i-1}, \alpha_{i-1})T(X_{i-1}, a_{i-1})R(Z_i, \theta_i)T(Z_i, d_i) \quad (5)$$

Esta ecuación permite relacionar el sistema de referencia del elemento i con el sistema del elemento $i-1$. De esta forma se puede obtener una representación que relaciona la posición y orientación de la pinza con respecto a la base (Sistema de coordenadas global) del manipulador [1], [2], [3].

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Donde s significa seno y c coseno.

Al aplicar esta matriz a cada uno de los cinco sistemas de coordenadas representados en la Tabla de D-H se obtienen las matrices que relacionan a cada articulación con la anterior.

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} \cos(q1) & -\sin(q1) & 0 & 0 \\ \sin(q1) & \cos(q1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} \cos(q2) & -\sin(q2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(q2) & \cos(q2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} \cos(q3) & -\sin(q3) & 0 & a2 \\ \sin(q3) & \cos(q3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} \cos(q4) & -\sin(q4) & 0 & a3 \\ \sin(q4) & \cos(q4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$T_5^4 = \begin{bmatrix} \cos(q5) & -\sin(q5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(q5) & \cos(q5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Para encontrar la relación de posición y orientación que existe entre la última articulación Q5 con respecto a la primera Q1, se realiza el producto de las matrices resultantes obteniéndose la matriz general (12).

$$T_5^0 = \begin{bmatrix} n_x & O_x & a_x & P_x \\ n_y & O_y & a_y & P_y \\ n_z & O_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Donde los valores de n, o, a, p son,

$$n_x = \frac{1}{4} \cos(q1-q2-q3-q4-q5) + \frac{1}{4} \cos(q1-q2-q3-q4+q5) + 14\cos q1+q2+q3+q4-q5 + 14\cos q1+q2+q3+q4+q5 + 12\cos q1-q5-12\cos q1+q5$$

$$n_y = \frac{1}{4} \sin(q1+q2+q3+q4+q5) + \frac{1}{4} \sin(q1+q2+q3+q4-q5) + 14\sin q1-q2-q3-q4+q5 + 14\sin q1-q2-q3-q4-q5 - 12\sin q1+q5+12\sin q1-q5$$

$$n_z = \frac{1}{2} \sin(q2+q3+q4+q5) + \frac{1}{2} \sin(q2+q3+q4-q5)$$

$$O_x = \frac{1}{4} \sin(q1-q2-q3-q4+q5) + \frac{1}{4} \sin(q1-q2-q3-q4-q5) - 14\sin q1+q2+q3+q4+q5 + 14\sin q1+q2+q3+q4-q5 + 12\sin q1+q5+12\sin q1-q5$$

$$O_y = \frac{1}{4} \cos(q1+q2+q3+q4-q5) + \frac{1}{4} \cos(q1+q2+q3+q4+q5) - \frac{1}{4} \cos(q1-q2+q3-q4-q5) + \frac{1}{4} \cos(q1-q2-q3-q4+q5) - \frac{1}{2} \cos q1-q5 - 12\cos q1+q5$$

$$O_z = -\frac{1}{2} \cos(q2+q3+q4-q5) + \frac{1}{2} \cos(q2+q3+q4+q5)$$

$$a_x = -\frac{1}{2} \sin(q1-q2-q3-q4) + \frac{1}{2} \sin(q1+q2+q3+q4)$$

$$a_y = -\frac{1}{2} \cos(q1+q2+q3+q4) + \frac{1}{2} \cos(q1-q2-q3-q4)$$

$$a_z = -\cos(q2+q3+q4)$$

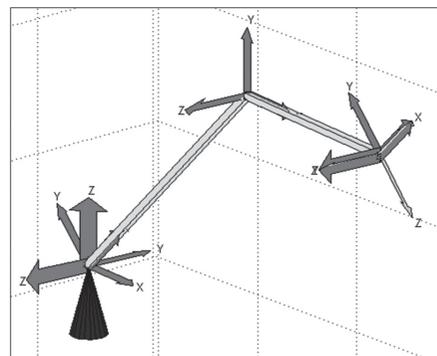
$$P_x = \frac{1}{2} a_3 \cos(q1-q2-q3) + \frac{1}{2} a_3 \cos(q1+q2+q3) + \frac{1}{2} a_2 \cos(q1+q2)$$

$$P_y = \frac{1}{2} a_3 \sin(q1+q2+q3) + \frac{1}{2} a_3 \sin(q1-q2-q3) + \frac{1}{2} a_2 \sin(q1+q2) + 12a_2 \sin q1-q2$$

$$P_z = a_3 \sin(q2+q3) + a_2 \sin(q2)$$

En Fig. 7 se muestra un modelo virtual que describe la estructura del manipulador, realizado en MATLAB de forma experimental para verificar los resultados obtenidos. El modelo utiliza las ecuaciones anteriores para simular los movimientos del manipulador real y sirve para realizar prácticas y ensayos antes de manipular el diseño real.

FIG. 7. MODELO EN MATLAB



VI. INTEGRACIÓN DE SUBSISTEMAS, PRUEBAS Y AJUSTES

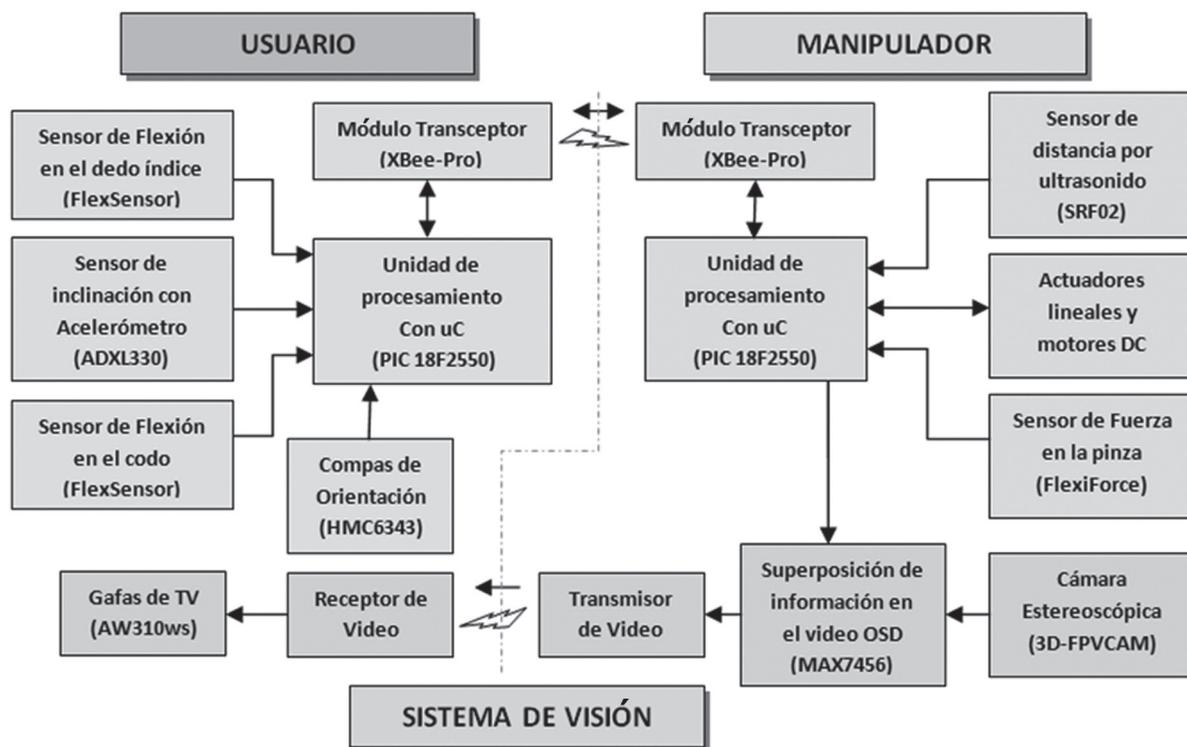
Una vez desarrollados y probados de forma individual los subsistemas de visión, telecontrol y la estructura mecánica del manipulador, se dio inicio a la integración de los mismos, de acuerdo a la estructura presentada en la Fig. 8. Con el fin de verificar el funcionamiento del sistema completo se realizaron entre otras las siguientes pruebas: Dentro de las pruebas realizadas se encuentran:

Pruebas de carga: Se colocaron pesos de 2.5Kg progresivamente en la punta de la pinza hasta alcanzar una carga total de 7.5Kg, aunque este no fue el límite de peso capaz de levantar el brazo se

decidió por seguridad no aumentarlo más ya que esto podía romper algunas de las piezas que estaban diseñadas para una carga de 5Kg.

Pruebas de precisión: Esta prueba depende más que todo de la precisión y resolución de los sensores utilizados para capturar los movimientos en el cual se obtuvo una resolución de 1° en los movimientos realizados con el compás, aunque el sensor tiene una resolución de 0.5° el ruido causado por objetos ferro magnéticos afecta las medidas. En el caso del acelerómetro el problema radica en los movimientos de la mano de la persona que lleva puesto el guante debido a los temblores y movimientos súbitos llegándose a obtener medidas con resolución máxima de 2° .

FIG. 8. DIAGRAMA DE BLOQUES GENERAL DEL SISTEMA



CONCLUSIONES

La medición de la inclinación mediante acelerómetros presenta una alta tasa de errores cuando los movimientos son muy rápidos ya que se agregan fuerzas debido a la aceleración del movimiento. Una solución conveniente es utilizar giroscopios conjuntamente con el acelerómetro y un filtro de KALMAN para eliminar los errores. En este caso fue suficiente con utilizar un acelerómetro ya que

los movimientos son muy lentos y los errores no son significativos, aproximadamente entre 1 y 2 grados.

Cuanto mayor sea el n° de grados de libertad, que posea el manipulador mayor es la complejidad mecánica y de control necesaria. En el caso de manipulación de objetos muchas veces sólo son necesarias garras de 2 dedos de 1 grado de libertad

Cuando se realizan mediciones con sensores analógicos es conveniente ubicar el sistema de adquisición lo más cerca posible a este, para disminuir el ruido que se añade a la señal.

AGRADECIMIENTOS

Se expresa el agradecimiento especial a Colciencias y el Programa Jóvenes Investigadores e Innovadores “Virginia Gutiérrez de Pineda”, a través del cual se dio la participación del Ing. J. Cudris como coautor del trabajo.

Los autores reconocen las contribuciones de H. González en planteamiento y formulación del proyecto, R. Claros por su orientación en el desarrollo de algoritmos de control y de J. H. Carvajal por sus aportes en el diseño y modelamiento matemático.

REFERENCIAS

- [1] A. Ollero. “ROBÓTICA Manipuladores y robots móviles”, Editorial MARCOMBO, 2001, ISBN 84-267-1313-0.
- [2] A. Barrientos. “Fundamentos de Robótica”, Editorial McGRAW HILL, Universidad Politécnica de Madrid, ISBN 84-481-0815-9.
- [3] J. H. Carvajal, “Modelamiento y Diseño de Robots Industriales”. Universidad de La Salle, Bogotá - Colombia. Primera edición Abril de 2007. ISBN 978-958-9290-74-3.
- [4] R. Gutiérrez, Control de Manipuladores Teleoperados. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá-Colombia. Vol. 16.-No 1, Agosto 2006. Disponible en: www.umng.edu.co/www/resources/rev16.1%20art03.pdf
- [5] J. F. Postigo. Controlador manual para teleoperación de robots con reflexión de fuerza. Instituto de Automática - Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de San Juan - Argentina. Disponible en: www.inaut.unsj.edu.ar/Files/Pj1064_99.pdf
- [6] F. A. Gaona. Captura de Movimientos, métodos y aplicaciones diversas. Universidad Nacional de Asunción – Paraguay, Facultad Politécnica. Disponible en: www.pol.una.py/gjem/Capturador-Movimiento.pd
- [7] J. M. Azkoitia., Interfaz inalámbrico, universal y no invasivo para control de aparatos periféricos mediante movimientos de la cabeza. Unidad de Salud, Fundación Fatronik, InstitutGuttman, Hospital de Neurorrehabilitación.
- [8] E. Foxlin, Head-tracking relative to a moving vehicle or simulator platform using differential inertial sensors. InterSense Inc. Jan, 27, 2004 US Patent No.6681629. Available at: <http://www.freepatentsonline.com/6681629.pdf>
- [9] R. A. Castillo. Control de un Manipulador Antropomórfico por medio de un Dispositivo de Inmersión. Universidad Militar Nueva Granada. Congreso Nacional de la AMCA 2004. ISBN: 970-32-2137-8. Disponible en: <http://201.117.193.79/amca/conpas/04/Articulos/amcafinal38.pdf>
- [10] E. Nuño. Teleoperación de Robots: Técnicas, Aplicaciones, Entorno Sensorial y Teleoperación Inteligente. Instituto de Automatización y Control de Sistemas Industriales, Universidad de Cataluña, 2004. <http://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/570/1/IOC-DT-P-2004-05.pdf>
- [11] A. J. Woods. Compatibility of Display Products with Stereoscopic Display Methods. Centre for Marine Science & Technology, Curtin University of Technology Australia. Available at: www.cmst.curtin.edu.au
- [12] D. Manocha and J. F. Canny. Efficient Inverse Kinematics for General 6R Manipulator. IEEE Transactions on Robotics and Automation, VOL 10, No. 5, October 1994. Available at: <http://www.cs.berkeley.edu/~jfc/papers/94/MCtra94.pdf>