

Herramienta didáctica para el Manejo Inalámbrico del Brazo Robótico Mitsubishi RV-M1

Lely A. LUENGAS

Facultad Tecnológica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá, Cundinamarca 11156, Colombia

y

Spaider ENCISO

Facultad Tecnológica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá, Cundinamarca 11156, Colombia

y

Diego A. TORRES

Facultad Tecnológica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá, Cundinamarca 11156, Colombia

RESUMEN

Se presenta la construcción y desarrollo de un dispositivo sensorico que permite el manejo inalámbrico del brazo robótico Mitsubishi RV-M1 mediante el sensado de movimientos del brazo humano, lo que permite la manipulación de las articulaciones propias del robot como lo son, la cintura, el hombro, el codo, la muñeca, el roll, la apertura y cierre de la pinza; para el desarrollo del proyecto se inicio con la captura de los datos (sensado), luego se realizó la implementación del software para la representación virtual del robot, la comunicación inalámbrica para manipular a distancia la estación remota (robot), y la interfaz de interacción con el robot; durante el desarrollo siempre se debieron tener presente las características principales del robot, las articulaciones, los movimientos y los algoritmos usados en su manipulación para alcanzar el objetivo propuesto, manejo del brazo robótico. El desarrollo se realizó ante la carencia de una herramienta pedagógica que permitiera una fácil aprehensión del conocimiento para el manejo de este brazo robótico, lo cual conducía a una alta mortalidad académica en las asignaturas que trabajan el tema.

Palabras Claves: Realidad virtual, sensores, transmisión, recepción, fotoresistencia, comunicación inalámbrica, articulación, movimientos, módulos XBEE, protocolo, USB (CDC).

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de realidad virtual en los últimos años se han convertido en una herramienta importante para aplicaciones en campos como los son la medicina, la educación, entrenamiento militar, entre otras, por esto en la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José De Caldas, el grupo de investigación Metis, con su objetivo de crear mecanismos que permitan la enseñanza con realidad virtual, plantea la idea de crear un dispositivo inalámbrico que manipule el robot Mitsubishi RV-M1, ayudado por una visualización en 3D de los movimientos de este movemaster, generando un efecto de telerobotica y telepresencia al manejar a distancia este equipo.

La influencia de los cambios tecnológicos se puede palpar en todos los aspectos que conciernen a la sociedad, entre ellos la educación, ya que a medida que surgen nuevos desarrollos científicos y tecnológicos, éstos tienen gran acogida en el diseño y desarrollo de nuevas herramientas didácticas que apoyen los procesos de enseñanza aprendizaje de los estudiantes. Tal es el caso de la realidad virtual, donde a través de mundos virtuales se pueden realizar prácticas de laboratorio, que no requieren equipos, ni materiales físicos, buscando de esa forma minimizar el costo de laboratorios, incrementar el acceso de estudiantes en la realización de prácticas de laboratorio y ofrecer seguridad en el desarrollo de las prácticas. Además, en un mundo virtual, los estudiantes tienen la oportunidad de aprender de una forma más motivadora, efectiva y con acceso a recursos bibliográficos que fortalezcan el desarrollo de las clases.

La elaboración de este tipo de herramientas didácticas basadas en realidad virtual requieren el diseño y desarrollo de tres componentes básicos [1]: un dispositivo de interacción (traje, guante, casco u otro componente que permita realizar los movimientos del usuario), un dispositivo de captura de movimiento (dispositivo electrónico que recibe las señales (movimientos) del usuario y las transmite al computador) y una aplicación de software (mundo virtual) que contiene un escenario en tercera dimensión con los elementos del mundo real simulado, que son manipulados con las señales recibidas desde el dispositivo de captura de movimiento. Adicionalmente, el componente de software debe contemplar el modelo pedagógico y didáctico que facilite el proceso de enseñanza aprendizaje del estudiante.

Sin embargo, el diseño y desarrollo de los componentes anteriores, es susceptible de mejoramiento continuo, a medida que surgen nuevas tecnologías e ideas de integración tecnológica, que facilitan la obtención de mejores resultados y las cuales deben ser exploradas, para crear nuevas alternativas e innovaciones que permitan fortalecer los procesos de enseñanza aprendizaje.

El dispositivo se desarrolla en varias etapas: se inicia la investigación de sistemas de realidad virtual; la segunda etapa la construcción de los sensores, cinco en total, uno para el manejo de cada articulación del movemaster, teniendo en

cuenta el costo y la recursividad; en la siguiente se crea la interfaz 3D para la visualización del robot y sus movimientos; en seguida la transmisión de los datos inalámbricos, implementando una tecnología de comunicación con poco desarrollo dentro de la facultad, como los son módulos Xbee; la quinta etapa es la recepción de los datos y la generación de los algoritmos para el envío de éstos al robot; y por último, la etapa de resultados.

2. DESARROLLO DEL PROTOTIPO

Para el desarrollo y la construcción del dispositivo sensorico, se llevaron a cabo diferentes etapas que se exponen en el diagrama de la figura 1, donde se observa que cada etapa realizada involucra un tiempo de indagación para la adquisición de los conocimientos necesarios para desarrollar cada fase que involucra la obtención del dispositivo y el sistema en general.

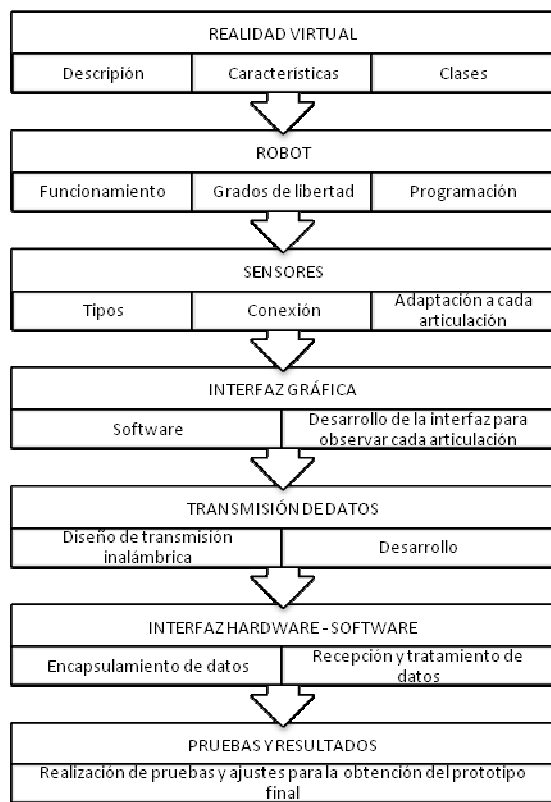


Figura 1. Bloques de ejecución del proyecto

Contextualización de las bases del proyecto

Se realizó una búsqueda de información de los diferentes elementos que se involucran en el desarrollo del proyecto, a continuación se exponen los contenidos más importantes de los mismos.

Descripción del Robot: [2] El robot Mitsubishi RV-M1 cuenta con cinco grados de libertad (DOF). Su capacidad de carga es de 1.2 Kg sin incluir el peso de la garra (o efector final). El sistema que permite operar el robot, se encuentra constituido por: Un brazo articulado, un efector final (gripper, intercambiador de herramientas o sensor), un Teaching box, un controlador, cables de conexión y computador con software para establecer comunicación con el robot.

El brazo cuenta con cinco articulaciones que se pueden observar en la figura 2, que son: J1: cintura, J2: hombro, J3: codo, J4: pitch y J5: roll.

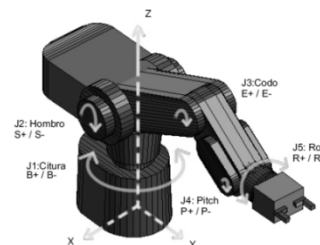


Figura 2. Articulaciones de robot Mitsubishi RV- M1

El robot se puede usar de 3 maneras. Se puede usar la PC como entorno de programación únicamente, se carga un programa en la memoria del drive Unit, y se lo ejecuta posteriormente y se usa los botones del panel frontal para iniciar el programar, pararlo o resetearlo. El otro modo es mediante ejecución directa de la PC, es decir, que el drive Unit procesa y ejecuta los comandos a medida que le son enviados por la PC. La última configuración posee la ventaja de que la PC puede comunicarse con otros dispositivos y en este caso es donde se adapta al dispositivo elaborado de control.

Realidad virtual: [3] La realidad virtual (RV) es una simulación en tres dimensiones la cual es generada por un ordenador de cualquier aspecto del mundo real o artificial, en el cual el usuario tiene la sensación de pertenecer a ese ambiente sintético o interactuar con él. Esto supone la existencia de un complejo sistema electrónico para proyectar espacios visuales en 3D y para enviar y recibir señales con información sobre la actuación del usuario, quien, con un sistema de este tipo, puede sentir que se encuentra inmerso en un "mundo virtual".

Un sistema de realidad virtual básicamente se compone de una simulación, una interfaz que representa el mundo virtual, unos dispositivos de entrada y salida, y el usuario. La simulación es la representación matemática del mundo que se va a generar, los dispositivos son todos aquellos que permiten la interacción entre el mundo y el usuario, y por último el usuario es la retroalimentación de este sistema de realidad virtual.

Sensores: [4] Un sensor o también llamado captador, es un dispositivo diseñado para recibir información de una magnitud exterior y transformarla en otra magnitud por lo general eléctrica, la cual sea manipulable y cuantificable. Las variables dependen del tipo de sensor y pueden ser por ejemplo temperatura, intensidad luminosa, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, pH <http://es.wikipedia.org/wiki/PH> etc.

Las características más relevantes de un sensor son:

- Rango de medida: dominio en la magnitud medida en el que puede aplicarse el sensor.
- Precisión: es el error de medida máximo esperado.
- Offset o desviación de cero: valor de la variable de salida cuando la variable de entrada es nula. Si el

rango de medida no llega a valores nulos de la variable de entrada, habitualmente se establece otro punto de referencia para definir el Offset.

- Sensibilidad de un sensor: relación entre la variación de la magnitud de salida y la variación de la magnitud de entrada.
- Resolución: mínima variación de la magnitud de entrada que puede apreciarse a la salida.
- Rapidez de respuesta: puede ser un tiempo fijo o depender de cuánto varíe la magnitud a medir. Depende de la capacidad del sistema para seguir las variaciones de la magnitud de entrada.
- Repetitividad: error esperado al repetir varias veces la misma medida.

3. CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO DEL DISPOSITIVO SENSÓRICO

Para la construcción del dispositivo, en principio se quiso hacer en forma totalmente igual a la de un brazo humano, pero aparecieron ciertas limitaciones como las contracciones de los músculos que impedían que el dispositivo sensorico se mantuviera de manera firme en su posición, lo que llevaba al cambio de valores en los sensores y de allí un mal funcionamiento del mecanismo en general.

Por tanto, lo que se decidió hacer fue un sensor para cada una de las articulaciones, ubicado en el brazo que manipulara las articulaciones del robot.

Sensor de la cintura

El sensor de la cintura se ha diseñado de tal manera que la persona que tuviera puesto el dispositivo sensorico, no perdiera la vista de la pantalla del computador donde se mostrara la interfaz grafica, ya que al girar la cintura en cualquiera de los dos sentidos, llega el punto en que no se tiene percepción de la pantalla.

Con esta condición se decide hacer un dispositivo que permitiera manejar de manera efectiva la cintura del robot, para esto se utilizo una base en madera, en la cual vendría un potenciómetro, adaptado a un eje, sobre el cual se posicionaría el pie de la persona, de manera que al girar el pie en cualquiera de los dos sentidos se tendría el ángulo para mover la cintura del robot. Además, se hizo necesario manipular los datos de manera que se manejara todo el rango de grados de la cintura del robot, ya que a partir de aproximadamente los 110 grados se pierde vista hacia el PC, en la figura 3a se muestra el sensor y en la 3b el comportamiento de éste referenciando grados versus resistencia.

Sensor del hombro

El sensor del hombro se diseño de tal manera que al realizar el movimiento de flexión se alcanzara el máximo valor de grados positivos +100. Este sensor está ubicado bajo la axila, adaptado a una camisa, la cual estará ceñida al cuerpo de la persona, este sensor consta de una manguera de aproximadamente 12 cm, en la cual va una fotocelda, un led de chorro de 3 mm ubicados cada uno en un extremo, por tanto al hacer movimientos como la extensión y la flexión se tendrá una variación de voltaje, que se presentara en la ausencia y presencia de luz sobre la fotocelda, lo que permitirá sensar y manipular el hombro del

robot que posee -30 a +100 grados, en la figura 4 se puede observar la variación del voltaje con respecto al movimiento.

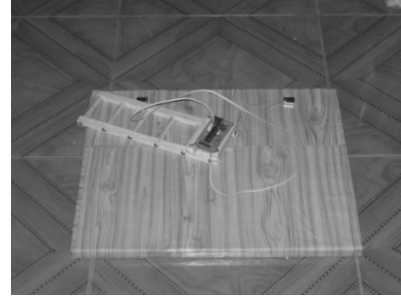


Figura 3 a. Sensor diseñado para el manejo de la cintura del robot.

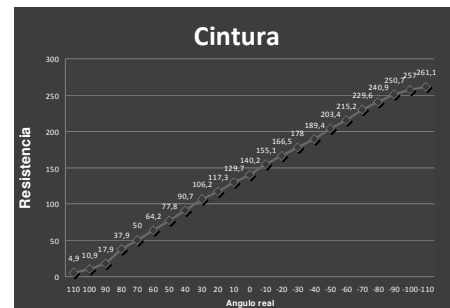


Figura 3 b. Variación de la resistencia al realizar variación del ángulo de la cintura.

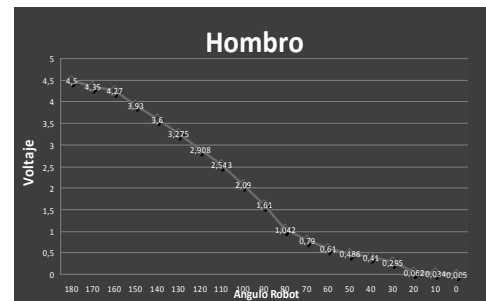


Figura 4. Voltaje/Angulo-Sensor Hombro

Sensor del codo

Para la articulación del codo se tuvo en cuenta que el robot nunca va tener grados positivos, teniendo así únicamente un rango de 0 a - 110 grados, asemejándose un poco al brazo humano que únicamente puede hacer flexión llevando su antebrazo al cuerpo pero nunca en el otro sentido, y luego haciendo una extensión para dejar el antebrazo en línea con el hombro. Por tanto como solamente se necesitaba sensar un sentido, se colocaron dos trozos de varillas enroscadas, una varilla se fijaría con un trozo de lámina de aluminio al brazo, el cual será el punto de referencia, en tanto la otra varilla se fijo en el antebrazo. y allí se instalo un potenciómetro, el cual giraría según el impulso dado a la lamina adaptada a él, además de unas manillas en aluminio que permiten colocar el sensor en el brazo y en el antebrazo, teniendo así un variación de resistencia con respecto al ángulo, el sensor se muestra en la figura 5a y la figura 5b, se puede apreciar que el comportamiento del potenciómetro con respecto a los ángulos

tiende a ser lineal, sin embargo hay que tener en cuenta que existen espacios en los cuales la variación es muy alta, debido a características propias de funcionamiento del dispositivo.

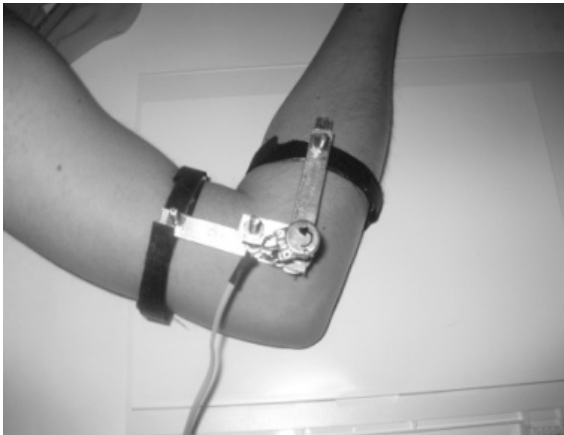


Figura 5. a. Sensor del Codo

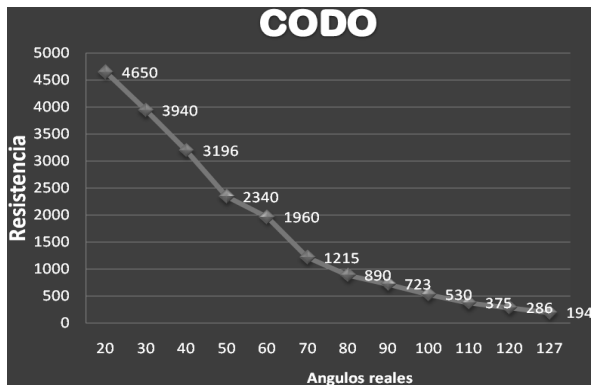


Figura 5.b. Variación de la Resistencia con respecto al ángulo de movimiento del codo.

Sensor de la muñeca

La articulación de la muñeca en el robot posee en rango de grados de **+90 a -90**, 180 grados en total, por tanto es necesario sensar en dos sentidos positivos y negativos. Un factor a tener en cuenta es, la muñeca humana no llega a tener -90 grados y mucho menos +90 grados, por ende para utilizar todos los grados efectivos del robot, se necesito manipular los datos de manera tal que el máximo valor positivo o negativo sentido tendría que corresponder al máximo valor positivo o negativo de la articulación del robot.

Para la construcción de este sensor se utilizo el mismo principio del sensor del codo, la diferencia radica en el posicionamiento del sensor, pues fue necesario formar canales en cada una de las láminas de manera que los soportes tuvieran libre movimiento de extensión y de flexión, el sensor se muestra en la figura 6a, la variación del movimiento versus la resistencia en la figura 6b y versus el voltaje en la 6c.

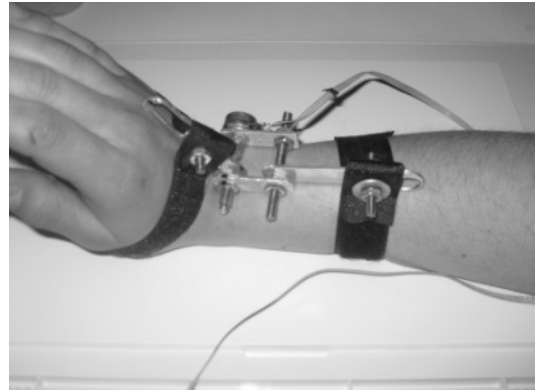


Figura 6. a. Sensor de la muñeca.



Figura 6. b. Desempeño del sensor, se observa la variación de la resistencia versus el ángulo de giro de la muñeca

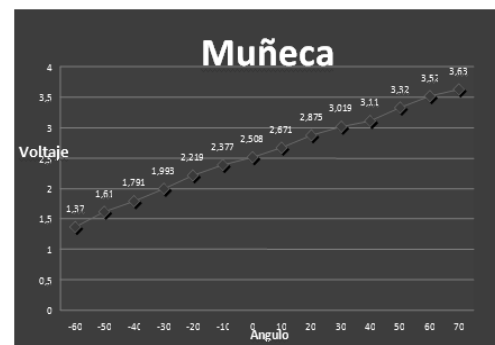


Figura 6. c. la variación del voltaje versus el ángulo

Sensor del roll

Este sensor se realizo de tal manera que se lograra tener todo el rango de grados de la articulación del robot, por eso se usaron dos arcos, de las cuales un va fijo o adaptado a los dedos del corazón y el anular, y la otra gira libremente según el impulso dado, en la figura 7 se observar los dos arcos del sensor.



Figura 7. Sensor del Roll

Sobre el arco fijo se acoplo una fotoresistencia apuntando en dirección contraria a las manecillas del reloj, en tanto sobre el arco libre se coloco un led de chorro de tres milímetros en dirección de la manecillas del reloj, de tal manera que al girar en este sentido el arco libre, estos dos elementos se fueran acercando o alejando y por tanto, se presentará una variación de tensión. El impulso para la rotación de esta pieza la realiza el dedo pulgar, que con suaves movimientos permite una gran sensibilidad en el sensor. Se tiene aproximadamente entre 260° y 280° grados de los 360° totales, para sensar, por lo tanto es necesario escalar estos valores para alcanzar los 150° grados positivos y negativos. En la figura 8, se puede observar el comportamiento del sensor.

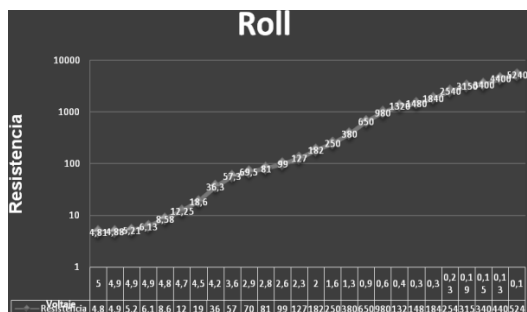


Figura 8. Voltaje/Resistencia Sensor Roll

Sensor de la pinza

Debido que el robot únicamente realiza apertura y cierre total de la pinza, y así coger o soltar elementos, mediante la presión de ella mas no por espacio de movimiento, se realizó un sensor que permite conocer el momento de apertura y cierre de la mano y asemeja la pinza del robot, para ello se adaptó la manguera a un guante y se fijaría entre los dedos índice y el pulgar de la mano, de manera que pareciera la pinza del robot que se abre y se cierra. A continuación, en la figura 9a se muestra el sensor y en al 9b el comportamiento del mismo.

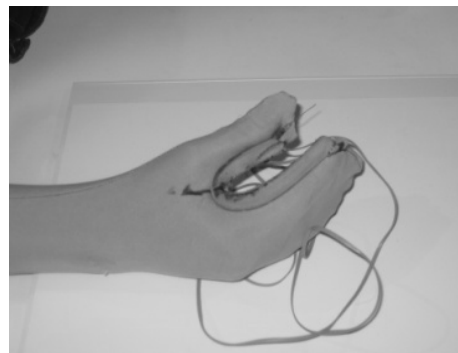


Figura 9. a. Sensor de la Pinza.

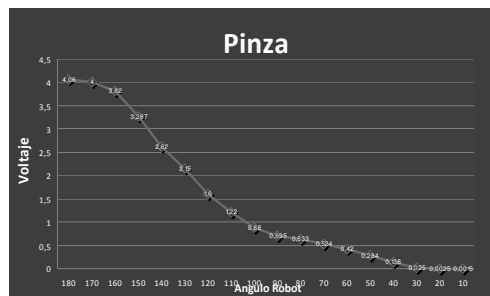


Figura 9. b. Comportamiento del sensor

4. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE LA INTERFAZ GRAFICA

Interfaz gráfica

Para el desarrollo de la interfaz grafica que permite visualizar los movimientos del robot en 3D, se utilizaron librerías de opengl (Open Graphics Library), usadas en un compilador de alto nivel como lo es el Microsoft Visual C++ 6.0. Se realizaron cada una de las partes del robot teniendo en cuenta sus magnitudes físicas reales como largo, ancho y profundidad, en algunas ocasiones estas partes fueron moldeadas o renderizadas manualmente y en otras se utilizaron figuras predeterminadas del 3D Max Studio. En la figura 10 se expone un prototipo del robot.

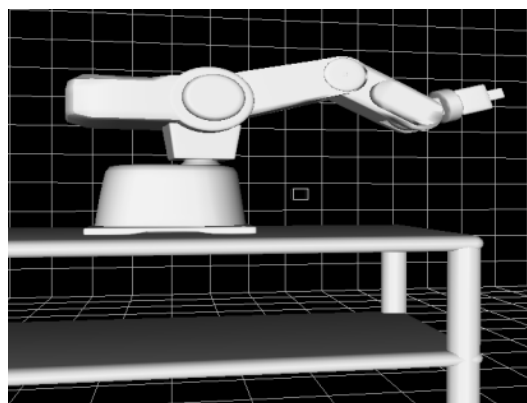


Figura 10. Robot con piezas importadas desde 3D Max Studio

Transmisión de datos para la interfaz 3D

La información de los sensores es obtenida a partir de los conversores analógicos-digitales ubicados en el microcontrolador. Debido a la cantidad de información que se va a transmitir al PC, se decidió armar una trama de datos que permitieran saber a cual sensor corresponden los datos, por ello se tiene como cabecera un byte de identificación como lo muestra la figura 11.

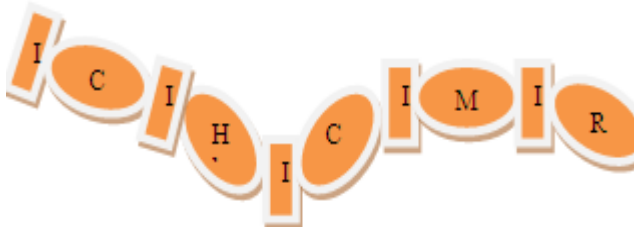


Figura 11. Esquema de la trama de datos, I=identificadores de sensores, C,H,C,M,R = dato de sensores

4. DESARROLLO DE LA TRANSMISIÓN INALÁMBRICA

Se hace uso de los módulos Xbee los cuales satisficieron la necesidad de transmitir la información necesaria con baja interferencia, gran alcance y fácil adaptación al dispositivo. Los módulos son de bajo costo, ultra-bajo consumo de potencia, uso de bandas de radio libres y sin necesidad de licencias, instalación barata y simple, redes flexibles y extensibles. [4]Para la implementación se utiliza el modo transparente ya que está destinado principalmente a la comunicación punto a punto, donde no es necesario ningún tipo de control. En este caso se utiliza para reemplazar la conexión serial por cable, ya que es la configuración más sencilla posible y no requiere una mayor configuración.

5. DESARROLLO ELECTRÓNICO DE LA RECEPCIÓN DE DATOS, EL TRATAMIENTO Y LA TRANSMISIÓN AL ROBOT

Se desarrollo un algoritmo que permite obtener la diferencia del dato presente y el dato anterior en lo sensores, la cual será el valor real enviado al robot por puerto serial; el robot en su primer movimiento toma como referencia los 0 grados, pero a partir del segundo movimiento su referencia será la posición anterior, por este motivo únicamente se envía la diferencia entre posiciones. Debido al tiempo de respuesta del robot, la trama de datos se debe enviar por espacios de dos segundos.

6. PRUEBAS Y RESULTADOS

El diseño final del dispositivo de captura consta de 6 sensores, de los cuales cinco las articulaciones y uno para abrir y cerrar la pinza, además de un software de visualización y una interfaz de comunicación hacia el robot. Las pruebas realizadas arrojaron los siguientes resultados:

- Los datos enviados al robot deben tener un retardo entre 2 y 2.5 segundos, ya que este es el tiempo de respuesta del robot, si se disminuye el tiempo de envío el robot se bloquea.

- La emulación de un puerto serial, finalmente permitió obtener varias ventajas como lo son, la no utilización de fuentes externas, puesto que en el conector USB existe un pin que directamente le da alimentación al circuito, la reducción de circuito, al no necesitar de convertidores de niveles de voltaje como el max232, y por último la practicidad de conexión, a pesar de la instalación del controlador para el dispositivo, únicamente es conectar y habilitar el puerto para que este comience a recibir datos.
- Al conectar al mismo tiempo los Xbee, las tramas de datos no llegaban completas y el dispositivo se bloqueaba, ya que es necesario sincronizar los módulos, además de conectar el receptor antes que el transmisor.

CONCLUSIONES

Con respecto a los módulos de transmisión inalámbrica Xbee, se encontró que tienen una mejor relación de costo-beneficio, dado que por sus características, permite una mayor distancia de transmisión sin perder la fiabilidad de los datos, frente a otros módulos como el TLP, el RLP y la línea TRF.

La comunicación inalámbrica que se implemento presenta una alta fiabilidad en la transmisión de datos, a distancias menores o iguales a 120 metros para interiores.

El sistema desarrollado le facilita al usuario la interacción con el robot sin la necesidad de una capacitación técnica.

Debido al tiempo de procesamiento de datos del robot, no se puede esperar que este ejecute los movimientos de forma inmediata.

Los sistemas de comunicación que se encuentran en la actualidad, llevan a que la implementación se haga de manera rápida, sencilla y eficaz.

El sistema puede servir como un simulador del brazo, para una posible aplicaciones industriales.

REFERENCIAS

- [1] L. Luengas, Cómo desarrollar un Laboratorio Virtual? Metodología de Diseño. TISE, Santiago de Chile, Chile, 2009
- [2] B. Delgado Fernández. 2001. Manual básico, manipulador robot Mitsubishi rv-m1, Centro de Automatización de Procesos, Pontificia Universidad Javeriana Cali. 15 de julio de 2008 <http://atlas.puj.edu.co/ftp/cap/manual_rvm1.pdf>
- [3] J. Angulo Usategui. Principios teóricos, construcción y programación de un robot educativo. España: Thompson. Pág. 120
- [4] <http://www.profesormolina.com.ar/tecnologia/sens_transduct/index.html/definición> de Sensores <http://atlas.puj.edu.co/ftp/cap/manual_rvm1.pdf>
- [5] Librerías puerto serial. S.F. Mauricio Emilio Gómez Zanaabria. Librerías puerto serial.

- <http://mgomez1974.googlepages.com/cursoopengl>
Acceso: febrero de 2009.
- [6] A. Oyarce. 2008. Guía de usuario del usuario. Mci Electronics. Chile 2008 <[http://www.olimex.cl/guia del usuario.pdf](http://www.olimex.cl/guia%20del%20usuario.pdf)>
- [7] Pic 18f2550 data sheet. S. F, Microchip. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39612D.pdf>
- [8] 3D Max Studio. S. F. Autodesk . <http://www.autodesk.es>
- [9] J. Hilera, S. Otón, y J. Martínez. “Aplicación de la realidad virtual en la enseñanza a través de Internet”. Universidad de Alcalá. Madrid. [Artículo en línea] [Consultado 8 mayo de 2008]. Disponible en <<http://www.ucm.es/info/multidoc/multidoc/revista/num8/hilera-oton.html> >
- [10] L. Rosado y J. Herreros. “Nuevas aportaciones didácticas de los laboratorios virtuales y remotos en la enseñanza de la Física”. Recent Research Developments in Learning Technologies. 2005. [Artículo en línea][Consultado 7 mayo de 2008]. Disponible en <<http://www.formatex.org/micte2005>>
- [11] A. Oyarce. 2008. “Guía de usuario del usuario”. Mci Electronics. Chile 2008 <[http://www.olimex.cl/guia del usuario.pdf](http://www.olimex.cl/guia%20del%20usuario.pdf)>
- [12] A. Castiblanco y J. Pinilla. Construcción de un Sistema de Captura de Movimiento para Entornos de Realidad Virtual. Dispositivos de interacción. Tesis para optar por el título de Ingeniero en Telemática. Universidad Distrital. Mayo de 2007. 16 – 18 p.
- [13] A. Tozeren, Human body mechanics: Classical mechanics and human movement, N.Y.: Springer-Verlag, 2000.
- [14] B. Nigg, W. Herzog, Biomechanics of the Musculoskeletal System, Second Edition. Wiley, 1998.
- [15] B. Roehl. El Creador de Mundos Virtuales. Madrid: Ediciones ANAYA Multimedia S.A., 1994. P. 35
- [16] C. Rodríguez, J. Bohorquez, H. Quintero, Aplicación de la teoría de robots manipuladores a la biomecánica del brazo humano, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, Vol. 4 Número 4, pp. 51-57, octubre 2007.
- [17] C. F. Rodríguez, H. Quintero, H. Aschner. “Movimiento del brazo humano: de los tres planos a las tres dimensiones” Revista de ingeniería, Universidad de los Andes, número 22, pp. 36 – 44, noviembre 2005.
- [18] CIBERHÁBITAT. CIUDAD DE LA INFORMÁTICA. Medios de Comunicación. [Consultado 19 noviembre de 2007]. Disponible en <<http://ciberhabitat.gob.mx/medios> >
- [19] CINTERFOR (Centro Interamericano para el Desarrollo del Conocimiento en la Formación Profesional). Aplicación de Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) en la Formación. Decisiones y Pedagogía. [Consultado 20 noviembre de 2007]. Lima, 2005. Disponible en <<http://www.cinterfor.org.uy/public/spanish/region/ampro/cinterfor/newsroom/turin/a250710.htm>>
- [20] E. Ruiz-Velasco. Educatrónica: Innovación en el aprendizaje de las Ciencias y la tecnología. Ediciones Díaz de Santos, 2007.
- [21] J. Campanario. Como identificar los problemas de aprendizaje de las ciencias. Metacognición. [Consultado 24 de abril de 2008]. Disponible en <<http://www2.uah.es/jmc/problemasaprendizaje.pdf> >
- [22] J. Gradecki. Realidad Virtual. Construcción de Proyectos. Grupo Editorial Alfa-Omega, ra-ma. México. 1997. p. 3.