

Diseño e implementación de un robot móvil autónomo con una pinza manipuladora

Breyner Posso Bautista^{*a}, Nini Juliana Vélez Melo^a, Humberto Loaiza Correa^a

(a) Universidad del Valle, Colombia.
*julnive@univalle.edu.co

(Recibido: Marzo 12 de 2007 - Aceptado: Abril 18 de 2008)

RESUMEN

En este artículo se describe la arquitectura hardware y software de un robot móvil autónomo, las pruebas de validación y los resultados obtenidos.

El sistema robótico está constituido por una plataforma móvil con un sistema de locomoción a base de ruedas en una configuración diferencial y un manipulador con un grado de libertad que tiene un efector final tipo pinza. El sistema sensorial está constituido por sensores infrarrojos, de ultrasonido, de contacto, de inclinación, de esfuerzo y encoders ópticos. El sistema de control se apoya en dos microcontroladores. El robot tiene dos modos de funcionamiento: comandado desde el computador y autónomo. El sistema desarrollado es modular, funcional y confiable, dejando abierta la posibilidad de implementar otros trabajos en un futuro.

PALABRAS CLAVE: Robots móviles, Sensores, Actuadores, Efector final, Microcontroladores, Sistema multiprocesador.

Design and implementation of a autonomous mobile robot with a manipulative gripper

ABSTRACT

This paper describe the hardware and software architecture of an autonomous mobile robot, testing and experimental results. The mobile robot has a differential drive and a manipulator with one degree of freedom and a gripper end effector. It also has several sensors: infrared, ultrasound, touch, tilt, effort and optical encoders. The control system is based on two microcontrollers. The robot has two operating modes: supervised and autonomous. The developed system is modular, functional and reliable, leaving open the possibility of implementing other developments in the future.

KEYWORDS: Mobile robots, sensors, actuators, final effector, microcontrollers, multiprocessing systems.

1. INTRODUCCIÓN

Los robots móviles generalmente son autónomos y desempeñan tareas que implican desplazamientos (transporte de materiales, exploración, etc.). La locomoción a base de ruedas es la solución más simple y eficiente para conseguir movilidad en superficies homogéneas poco inclinadas, permitiendo conseguir velocidades relativamente altas [1].

La robótica móvil es una ciencia multidisciplinaria que requiere conocimientos sobre actuadores, sensores, procesamiento de señales, control, programación, entre otros. En el ámbito global son grandes los avances que se han hecho en esta área gracias al interés de las universidades, de la industria y de entidades gubernamentales y privadas, que han puesto a disposición de los investigadores las herramientas necesarias para ello.

El trabajo que se describe en este artículo está enfocado en la implementación de una plataforma móvil que pueda realizar un conjunto de tareas típicas como la navegación en entornos con evasión de obstáculos y otro conjunto de tareas específicas como la manipulación de objetos. Este tipo de plataforma puede ser utilizada para el transporte de materiales peligrosos para el hombre, recolección de basuras (latas de gaseosa), transporte de materiales como apoyo a las tareas humanas, entre otros. El sistema desarrollado es modular, funcional, confiable y novedoso dejando abierta la posibilidad de implementar otros trabajos en un futuro.

Este artículo presenta una descripción general del sistema robótico implementado, mostrando su estructura hardware y software en las siguientes tres secciones. Posteriormente se muestran las pruebas realizadas y se discuten sus resultados. Finalmente se presentan las posibles perspectivas de trabajo y las conclusiones generales del proyecto.

Este trabajo obtuvo el Tercer Lugar en el área de Tecnologías Apropriadadas en la 9ª versión del Concurso Nacional Otto De Greiff Mejores Trabajos de Grado 2005.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En la figura 1 se muestra el diagrama de bloques general del sistema robótico implementado, el cual ha sido denominado 'TENAZAS'. El robot está compuesto por dos estructuras: una plataforma móvil y un manipulador. La primera cuenta con un sistema de locomoción a base de ruedas en una configuración diferencial, además de un grupo de sensores que incluyen infrarrojos, ultrasonidos y de contacto. La segunda tiene un grado de libertad y un efector final tipo pinza y sensores infrarrojos, de contacto y de inclinación.

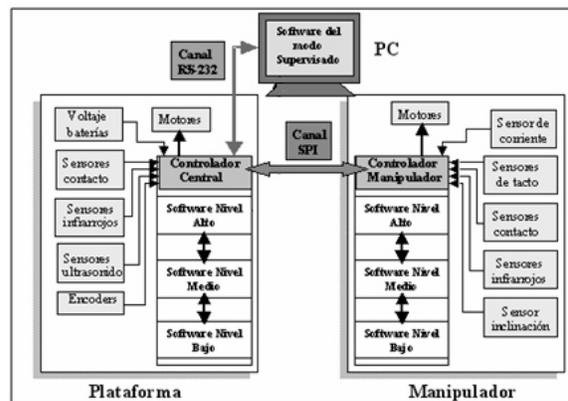


Fig. 1. Diagrama de bloques general del sistema robótico implementado.

Ambas estructuras tienen su propio sistema microcontrolado, en cada uno de los cuales se implementó una arquitectura software jerárquicamente dividida en tres niveles: alto, medio y bajo. En los dos primeros niveles se encuentran tanto las funciones que interactúan directamente con el hardware, como las que procesan la información y generan las acciones que permiten coordinar los movimientos del manipulador y del vehículo; en el tercer nivel se programan las tareas que realiza el robot y su ejecución se apoya en los dos niveles inferiores. También existe un canal de comunicación SPI (Serial Peripheral Interface) que interconecta ambos microcontroladores. La energía para todos los subsistemas es suministrada por dos baterías de 6V cada una.

El robot tiene dos modos de funcionamiento: comandado desde el computador y autónomo. En el primer modo el microcontrolador de la plataforma se conecta al computador, a través de un canal serial RS-232, desde donde es posible monitorear el estado de los diferentes sensores y enviar comandos de movimientos a la plataforma y al manipulador a través de una interfaz gráfica. En el segundo el robot ejecuta autónomamente las tareas que se le programen: de navegación en entornos con obstáculos y de detección y toma de objetos. El sistema desarrollado es modular, funcional y confiable, dejando abierta la posibilidad de implementar otros trabajos en un futuro.

3. ARQUITECTURA HARDWARE

En la figura 2 se observa el robot 'Tenazas' y en la figura 3 un esquema de sus diferentes componentes hardware y su interacción.

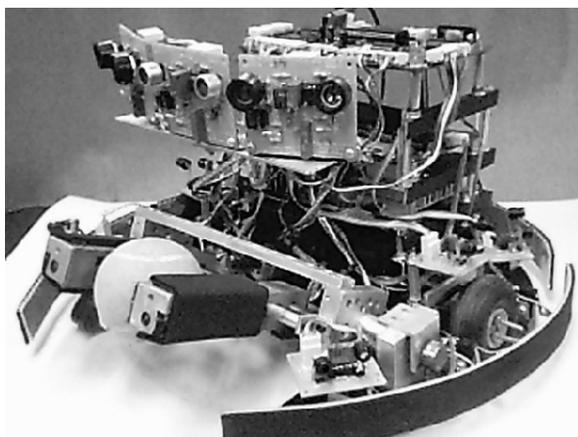


Fig. 2. Robot 'Tenazas'.

3.1 Estructura física

3.1.1 Manipulador

El manipulador está construido de aluminio por ser un material liviano, pero a la vez resistente y de fácil maquinado, tiene un grado de libertad, proporcionado por una articulación giratoria, que le permite un movimiento arriba-abajo (hasta los 35°) y un efector final tipo pinza con dos dedos que proporcionan la sujeción. El manipulador puede tomar y levantar objetos que midan entre 3 y 9 cm y pesen hasta 265 gr.

El mecanismo que proporciona el movimiento de los dedos, es sencillo ya que sólo consta de un tornillo sin fin de doble rosca acoplado a un motor mediante un engranaje de tornillo sin fin-corona, tal como se observa en la figura 4.

La apertura y cierre de la pinza se logra con el movimiento de rotación del tornillo sin fin de doble rosca, que hace que los dedos se desplacen simultáneamente en sentido contrario. Todo el arreglo mecánico provee gran torque, lo que garantiza una buena sujeción de los objetos, aunque esto implique la disminución en la velocidad de apertura/cierre de la pinza.

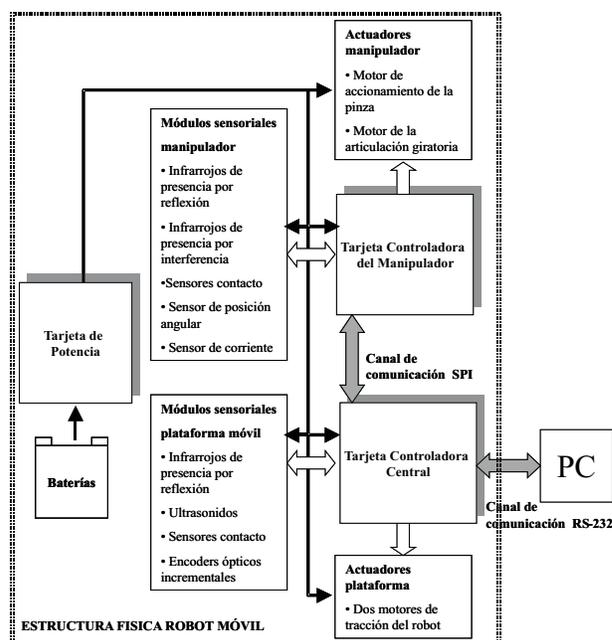


Fig. 3. Diagrama de los componentes hardware y su interacción.

3.1.2 Plataforma móvil

La plataforma está construida en acrílico debido a que es un material liviano y ofrece la suficiente rigidez para albergar todos los componentes del sistema robótico, además posee unos soportes en aluminio que sostienen los otros componentes del sistema. Tiene una forma circular ya que presenta menos posibilidades de quedarse atascada durante la navegación, como podría suceder, por ejemplo, con formas cuadradas [2].

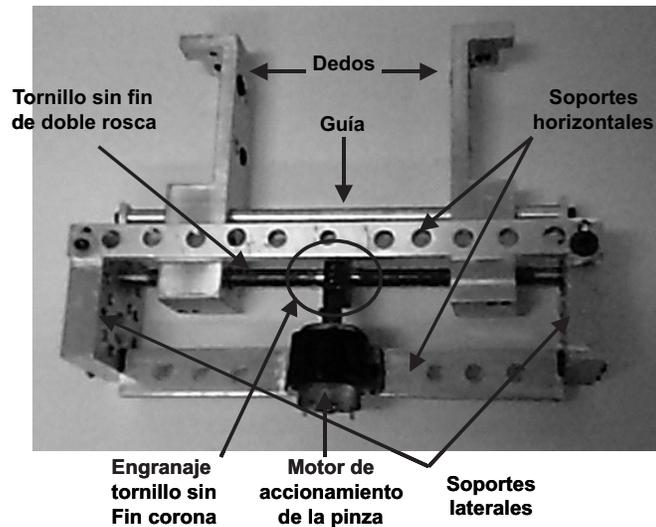


Fig. 4. Manipulador y sus partes.

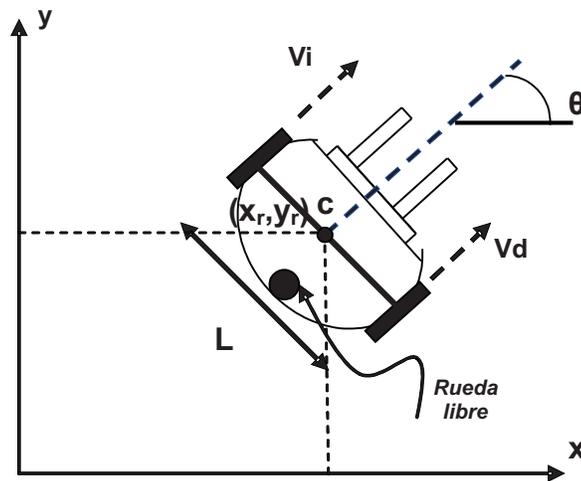


Fig. 5. Configuración diferencial y elementos principales del modelo cinemático.

Esta plataforma utiliza locomoción diferencial, con una sola rueda de apoyo. En la figura 5, se observa un esquema de esta configuración y los elementos principales empleados para construir el modelo cinemático del robot.

En la figura anterior se identifican los siguientes elementos:

- V_i = velocidad tangencial rueda izquierda.
- V_d = velocidad tangencial rueda derecha.
- θ = ángulo que forma el robot con el eje x de un marco de referencia global.

L = distancia entre los ejes de rotación de las dos ruedas. Para Tenazas esta distancia es de 30 cm.
 c = punto medio de la distancia entre los ejes de rotación de las ruedas. Es equivalente a la posición del robot cuyas coordenadas son (x_r, y_r) .

El estado del robot puede ser representado en cada instante por un vector de coordenadas globales [1]:

$$p = (x_r, y_r, \theta) \quad (1)$$

Además de esto, el robot (tomando como referencia el punto c) tiene dos componentes de velocidad, la tangencial (v) y la angular (ω), que pueden expresarse como:

$$v = V_d + V_i / 2 \quad (2)$$

$$\omega = V_d - V_i / L \quad (3)$$

Estos elementos pueden ser combinados en la representación en variables de estado del modelo cinemático de la configuración diferencial, tal como se muestra a continuación:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} \quad (4)$$

Sin embargo, a nivel de control, las consignas de velocidad se dan en términos de las velocidades angulares de las dos ruedas (ya que mediante los encoders ópticos de las ruedas es posible calcular estos valores), ω_d y ω_i , para las ruedas derecha e izquierda, respectivamente. Estas velocidades angulares se relacionan con las tangenciales de la siguiente forma:

$$V_d = \omega_d * r \quad (5)$$

$$V_i = \omega_i * r \quad (6)$$

Donde r es el radio de las ruedas. Para Tenzas el radio es de 3.2 cm.

3.2 Sistema sensorial

3.2.1 Manipulador

Posee sensores infrarrojos de presencia tanto por reflexión (detección de obstáculos), como por interferencia (detección de objetos dentro de la pinza) [2]. Tiene también sensores de contacto en la punta de los dedos (para detectar colisiones) y en la parte interna de los mismos (para reconocer cuando un objeto ha sido tomado), un sensor de inclinación (potenciómetro que indica la posición angular de la pinza), un sensor de esfuerzo

(corriente del motor que acciona la pinza) y fines de carrera (microswitches utilizados para determinar la máxima y mínima apertura de la pinza).

3.2.2 Plataforma móvil

La plataforma posee sensores infrarrojos de presencia por reflexión, sensores de ultrasonido [3], sensores de contacto en el bumper y encoders ópticos incrementales en cada uno de los motores. La disposición de los sensores se observa en la figura 6.

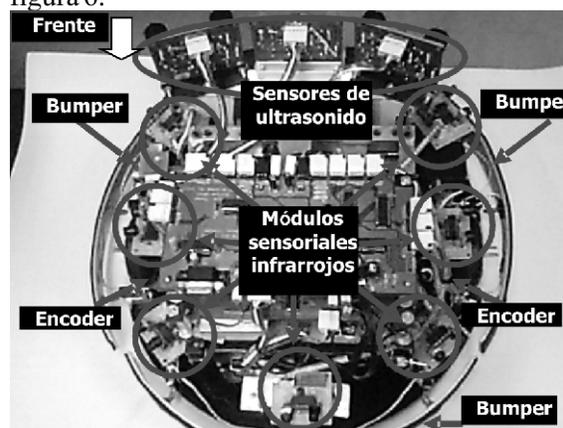


Fig. 6. Ubicación de los sensores en la plataforma.

3.3 Actuadores

El robot posee tres servomotores S3010 de alto torque, de los cuales dos se modifican [4] y se utilizan para la tracción de la plataforma y el otro para generar el movimiento arriba-abajo de la pinza. También se cuenta con un motor de corriente continua con polos de imán permanente usado para accionar los dedos del manipulador.

3.4 Sistema de control

El sistema de control consta de dos microcontroladores PIC 18f452. El primero está ubicado en la tarjeta controladora del manipulador y es el encargado de procesar las señales provenientes de los sensores del manipulador y generar las acciones correspondientes. El segundo microcontrolador está ubicado en la tarjeta controladora central y es el encargado de procesar las señales provenientes de los sensores de la

plataforma, generar los comandos de movimiento, coordinar el trabajo de la plataforma y el manipulador y comunicarse con el PC en el modo comandado.

La arquitectura de control para el movimiento es puramente reactiva, [5] tal como se observa en la figura 7. En cada instante el robot tiene un estado definido por la ecuación (1), ya que permanece deambulando en línea recta ($\omega_d = \omega$) y apenas recibe información de la ubicación de los obstáculos a través de los sensores, rota sobre su propio eje ($\omega_d = -\omega_i$) hasta encontrar un camino por el cual seguir, lo que hace que cambie su estado por uno nuevo y siga deambulando en línea recta.



Fig. 7. Estructura del control reactivo implementado.

3.5 Sistema de comunicación

El intercambio de información entre los dos microcontroladores se lleva a cabo mediante el protocolo de comunicación serial SPI mientras que la comunicación entre el PC y el robot se hace mediante el protocolo de comunicación serial RS-232.

3.6 Sistema de alimentación

Se utilizan dos pilas recargables de 6 voltios con una capacidad de 4 amperios-hora, conectadas en serie. Este voltaje es convertido a los niveles utilizados por los diferentes módulos mediante la tarjeta de potencia que tiene los siguientes componentes: el convertor DC-DC SKE15A-05 que entrega 5V (regulación de $\pm 1\%$) y los reguladores integrados LM7809, LM7806 (regulación de $\pm 4\%$) y LM350 que entrega 6V @ 3A (regulación de $\pm 0.3\%$).

En la figura 8 se identifican algunas partes hardware que conforman el robot.

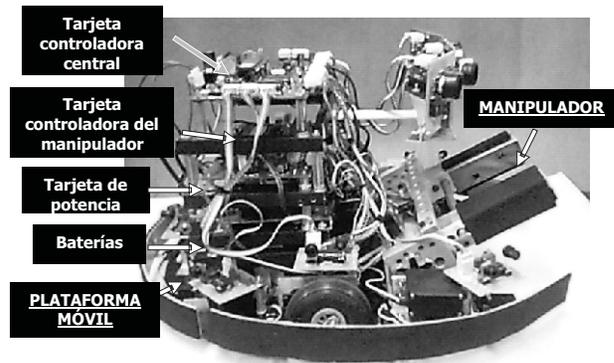


Fig. 8. Algunos elementos hardware que componen el robot

4. ARQUITECTURA SOFTWARE

Para cada uno de los dos microcontroladores utilizados en el robot: el microcontrolador central y el microcontrolador del manipulador, se utilizó una arquitectura software distribuida en tres niveles jerárquicos: nivel bajo, nivel medio y nivel alto, tal como se observa en la figura 9. Esta distribución jerárquica facilita la depuración de los algoritmos y la implementación de tareas de alto nivel para convertir al robot en una herramienta didáctica y de fácil programación.

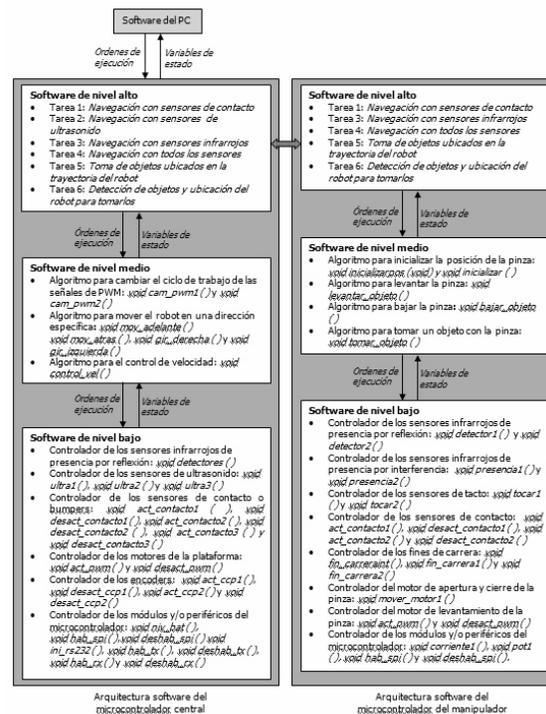


Figura 9. Esquema de la arquitectura software del robot.

El nivel bajo del software constituye la interfaz directa con el hardware del robot. Aquí se implementan los controladores de cada sensor, actuador y de los módulos y/o periféricos del microcontrolador. Sus funciones son utilizadas por el nivel medio. En el microcontrolador central se encuentran los algoritmos que manejan los sensores infrarrojos de presencia por reflexión, los sensores de ultrasonido, los sensores de contacto o bumpers, los motores de la plataforma y los encoders. Además, se tienen las instrucciones que activan y desactivan el conversor A/D, el bus de comunicaciones SPI, el canal de comunicación serial, los módulos de comparación y captura de datos y el manejador de interrupciones internas y externas del microcontrolador [6]. En el microcontrolador del manipulador se encuentran los algoritmos que manejan los sensores infrarrojos de presencia por reflexión y por interferencia, los sensores de tacto, los sensores de contacto, los fines de carrera, el motor de apertura y cierre de la pinza y el servomotor que permite levantar la pinza. Igualmente se tienen las instrucciones para el acceso al conversor A/D, el bus de comunicaciones SPI y el manejador de interrupciones internas y externas del microcontrolador [6].

En el nivel medio del software se implementan los algoritmos que le permiten ejecutar acciones simples al robot. Sus funciones son utilizadas por el nivel alto. En el microcontrolador central se encuentran los algoritmos que permiten cambiar el ciclo de trabajo de la señal de PWM de los motores de la plataforma dependiendo de la acción a tomar por parte del controlador de velocidad y aquellos que permiten moverse al robot en una dirección específica (avanzar adelante o atrás y girar a la derecha o izquierda) y frenar. En el microcontrolador del manipulador se encuentran los algoritmos que permiten inicializar la posición de la pinza (totalmente abierta), levantarla, bajarla y tomar un objeto.

Finalmente, en el nivel alto se ubican las tareas de navegación en entornos con obstáculos y de detección y toma de objetos, cuando el robot está en modo autónomo, y las instrucciones que procesan las órdenes provenientes del PC cuando

el robot está en modo comandado. Como el software desarrollado es altamente modular, es posible la realización de diferentes tipos de tareas a través de instrucciones simples de alto nivel que llamen a cualquiera de las funciones implementadas en el nivel medio del software. Por lo tanto, las posibilidades de generar rutinas cada vez más complejas en los modos descritos, a partir de instrucciones sencillas de alto nivel, son muy amplias.

Tabla 1. Opciones de la interfaz de usuario.

Botón	Acción
INICIO CONEXIÓN	Abre el puerto serie del computador.
FIN CONEXIÓN	Cierra el puerto serie del computador.
SALIR	Cierra la aplicación.
ULTRASONIDOX	Accede a cualquiera de los tres sensores de ultrasonido de la plataforma y si están detectando algún objeto obtiene la distancia en mm a la cual se encuentra.
INFRARROJOX	Accede a cualquiera de los siete sensores infrarrojos de presencia por reflexión de la plataforma y define si están detectando algún objeto o no.
BUMPERX	Accede a cualquiera de los tres bumpers del robot y define si alguno está siendo presionado o no.
<i>Movimiento de la plataforma</i>	Ordenan al robot moverse hacia adelante o hacia atrás cierta distancia dada en cm y girar hacia la derecha o izquierda un ángulo dado en grados.
FIN DE CARRERA X	Accede a cualquiera de los tres fines de carrera de la pinza y define si están siendo activados o no.
BARRERAX	Accede a cualquiera de los dos sensores infrarrojos de presencia por interferencia y define si están detectando algún objeto dentro de ella o no.
TACTOX	Accede a los dos sensores de contacto de la pinza con el objeto a tomar y define si están activados o no.
PROXIMIDADX	Accede a los dos sensores infrarrojos de presencia por reflexión de la pinza y define si están detectando algún objeto o no.
CONTACTOX	Accede a los dos sensores de contacto de la pinza y define si están activados o no.
<i>Movimiento de la pinza</i>	Ordena al manipulador ejecutar cualquiera de sus cuatro movimientos: abrir, cerrar, levantar o bajar.

En el modo comandado desde el computador, el robot está conectado al PC y ejecuta las órdenes que se le den a través de la interfaz gráfica de la figura 10. Esta interfaz permite también que el usuario conozca el estado de los sensores de la plataforma y de la pinza. Dependiendo de la opción que elija el usuario en la interfaz, el PC le envía un comando de 8 bits al microcontrolador y en algunas ocasiones después del comando un dato (también de 8 bits). Si recibe el valor de alguna variable por parte del microcontrolador lo ubica en la casilla respectiva (al frente del botón pulsado).

Las opciones disponibles en la interfaz gráfica se describen en la tabla 1.

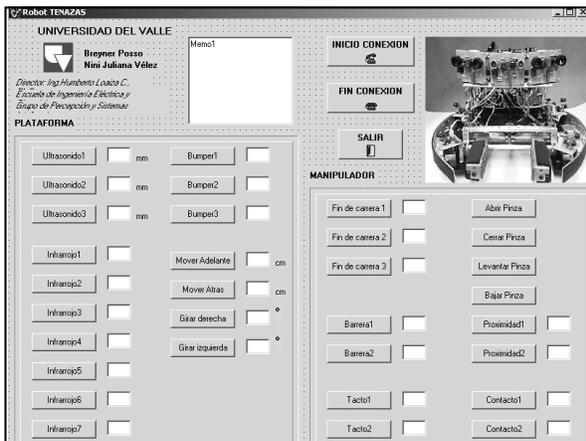


Fig.10. Interfaz gráfica en el modo comandado desde el computador.

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

Antes de realizar pruebas sobre el robot completo se caracterizaron, primero, cada uno de los módulos de sensado implementados tanto en la plataforma móvil como en la pinza.

El sensor de inclinación de la pinza presenta una sensibilidad de 0.23 Deg/bit y muestra un comportamiento altamente lineal.

Se encontró una distancia máxima de detección de 27 cm. para los sensores infrarrojos de proximidad, siendo altamente sensibles frente a

una superficie blanca en general. Para superficies porosas la distancia de detección disminuye un poco, al igual que para aquellas de color negro. El alcance en la detección de estos sensores, además de depender de la superficie del objeto sobre el cual se refleja la luz, también se ve afectado por el área del obstáculo.

Los sensores de ultrasonido presentan una distancia máxima de detección de 53 cm y una zona muerta de 10 cm. Hasta una distancia aproximada de 20 cm de la tarjeta de ultrasonido el objeto se puede desplazar entre 2 cm y 1 cm a la izquierda y a la derecha del eje central y sigue siendo detectado por el sensor. Por fuera de este rango el sensor ya no “ve” el objeto. Por encima de los 20 cm de distancia el objeto debe estar prácticamente ubicado sobre el eje central para poder ser detectado. Además, objetos de gran área pueden ser detectados a mayor distancia. La resolución de estos módulos es de 2 cm y la tasa de actualización de 4 Hz.

Los conos de detección de los sensores infrarrojos y de ultrasonido no son muy amplios, como se puede observar en las figuras 11 y 12, respectivamente. El anillo de los siete sensores infrarrojos compensó esta característica alrededor de la plataforma y los tres sensores de ultrasonido en el frente de la misma.

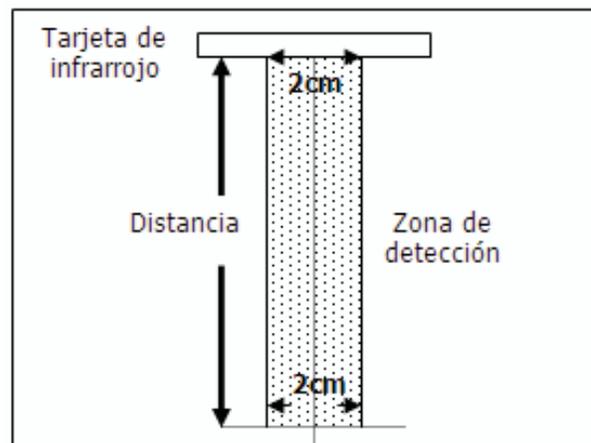


Fig.11. Zona de detección sensor infrarrojo de presencia por reflexión.

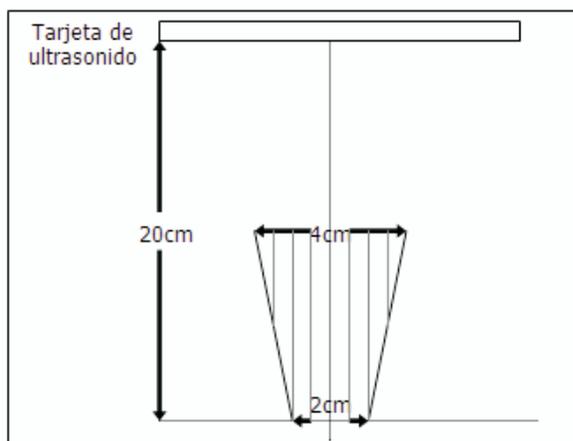


Fig.12. Zona de detección de ultrasonido.

Posteriormente, se realizaron ensayos sobre el manipulador para verificar todos sus posibles movimientos (apertura, cierre, levantamiento), así como el agarre de objetos de diferente peso y tamaño. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios obteniendo un tiempo de apertura de la pinza de aproximadamente 9.13s y un tiempo de cierre de 8.44s. La capacidad de carga de la pinza es de 265g.

Finalmente, se probó el robot en cada uno de sus dos modos de funcionamiento: comandado desde el computador y autónomo.

En el primer modo se realizaron tres pruebas para conocer el estado de los sensores de la plataforma y de la pinza y ordenar al robot ejecutar acciones simples como desplazamientos y giros especificados por el usuario a través de la interfaz gráfica generada en el computador. La primera prueba consistió en observar los valores arrojados por todos los sensores ante cierto tipo de estímulos. Se verificó el buen funcionamiento de los bumpers de la plataforma, de los sensores de tacto y de los sensores de contacto de la pinza, que al ser presionados generaban las señales correctas de activación. De igual forma, los sensores infrarrojos de presencia por reflexión, tanto de la plataforma como del manipulador detectaron en un 99% los objetos ubicados al frente de ellos en una distancia aproximada de 20 cm. Los sensores infrarrojos de presencia por interferencia, ubicados en el manipulador, respondieron en el

100% de los casos bien, ante la presencia de un objeto dentro del mismo. Por último se compararon las medidas arrojadas por los ultrasonidos ante la presencia de un objeto con las medidas reales a las cuales se encontraban ubicados. Para ello se ubicó el objeto a 10 distancias diferentes entre 100 mm y 550 mm de cada uno de los tres módulos de ultrasonido y para cada una de ellas se tomaron 7 medidas. El mayor porcentaje de error (25%) se presenta en el rango entre los 200 mm y los 100 mm de distancia. En el resto de los casos el porcentaje de error no supera el 15% y la gran mayoría de los porcentajes de error oscilan alrededor del 5%. Los tres sensores se comportan de una forma muy similar y la repetibilidad en las distancias encontradas es alta. En la segunda prueba se revisaron los cuatro movimientos básicos de la pinza: abrir, cerrar, levantar y bajar correctamente, verificando nuevamente el buen funcionamiento de los mismos. En la tercera prueba se tomaron las medidas para verificar la precisión del robot en cada uno de sus cuatro movimientos: desplazamiento hacia adelante, hacia atrás, giro a la derecha y a la izquierda, según las distancias en cm y los ángulos en grados solicitados desde la interfaz gráfica. Se realizaron 17 pruebas para desplazamientos entre 2 cm y 54 cm, obteniéndose el mayor porcentaje de error para distancias menores a los 10 cm. De ahí en adelante disminuyó considerablemente (el porcentaje de error, no sobrepasó el 12%). De forma similar para los giros, se realizaron 9 pruebas para ángulos entre 7° y 180°, presentándose el mayor porcentaje de error para giros por debajo de los 20°. Por encima de este valor no excedió el 14%. Los resultados obtenidos son bastante buenos y aceptables, teniendo en cuenta factores como la inercia del robot en el momento de frenar y el error acumulativo a medida que aumentan las distancias en los desplazamientos.

En el segundo modo se realizaron las pruebas que permitieron verificar el comportamiento autónomo del robot y el control de la articulación ante un entorno con obstáculos a evadir y objetos a tomar. Inicialmente se probó el robot con un solo conjunto de sensores para la navegación en entornos con obstáculos: primero con los sensores de contacto, después con el anillo de sensores infrarrojos y por último con los sensores de

ultrasonido, con el objeto de verificar el buen funcionamiento de la tarea “deambular” con cada uno de estos grupos de sensores. La figura 13 muestra la trayectoria aleatoria, seguida por el robot, utilizando solamente el conjunto de sensores de ultrasonido.



Fig.13. Trayectoria seguida por el robot en la prueba de navegación con los sensores de ultrasonido.

El comportamiento del robot durante esta prueba, concordó con lo esperado. Cuando él se acercaba lateralmente a las cajas no las “veía” y chocaba con ellas (los sensores de ultrasonido sólo cubren la parte frontal del robot), pero cuando estaba ubicado de frente o levemente inclinado hacia alguno de los lados las detectaba y tomaba la acción de control correspondiente (cambio en la dirección del movimiento). En lugares críticos como las esquinas, el robot actuó correctamente ejecutando la orden programada (girar 180°). Aunque el resultado general de la prueba es satisfactorio, se debe resaltar que mientras el robot está en movimiento, la distancia a la que detecta los obstáculos es menor a la programada, sin embargo, cuando está quieto estas distancias concuerdan. En la navegación con el grupo de sensores infrarrojos se superó el problema obtenido en la prueba con los sensores de ultrasonido. El robot ya no se estrellaba lateralmente con las cajas (hay un mayor número de sensores infrarrojos que de sensores de ultrasonido cubriendo la periferia del robot). Su comportamiento es aprobado y satisfactorio.

Posteriormente, se realizaron pruebas de navegación en dos entornos diferentes utilizando todo el conjunto de sensores del robot con el fin de evaluar el desempeño de todo el sistema robótico integrado e identificar las limitaciones del mismo. Las figuras 14 y 15 ilustran las trayectorias seguidas por el robot en cada uno de los entornos.



Fig.14. Trayectoria seguida por el robot en la prueba de navegación del primer entorno integrando todos los sensores.

El comportamiento del robot en estas pruebas fue el esperado. La frecuencia de colisiones fue muy baja y sucedieron el mayor número de veces en el primer entorno (caja ubicada en el centro) que en el segundo. Esto sucede porque el algoritmo de navegación empleado evalúa prioritariamente caminos libres a la derecha del robot.

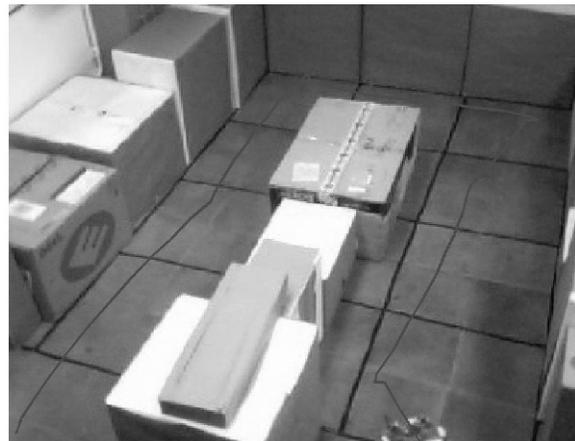


Fig.15. Trayectoria seguida por el robot en la prueba de navegación del segundo entorno integrando todos los sensores.

Por último, se implementó una tarea en la que el robot tomaba los objetos (latas) ubicados en su trayectoria y los colocaba en su lado izquierdo y luego continuaba con su trayectoria original. La figura 16 ilustra la situación.

El comportamiento del robot durante esta prueba fue excelente y permitió comprobar el buen funcionamiento del conjunto pinza-plataforma durante la toma de objetos.

Debido a la modularidad y funcionalidad del robot, éste fue probado con una interfaz de reconocimiento de comandos de voz desarrollada en la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle, como proyecto de grado [7]. Las órdenes empleadas fueron “distancia adelante”, “distancia atrás”, “ángulo derecha”, “ángulo izquierda”, “abrir”, “cerrar”, “levantar” y “bajar”, obteniendo un comportamiento satisfactorio. Esto verifica la versatilidad del sistema.

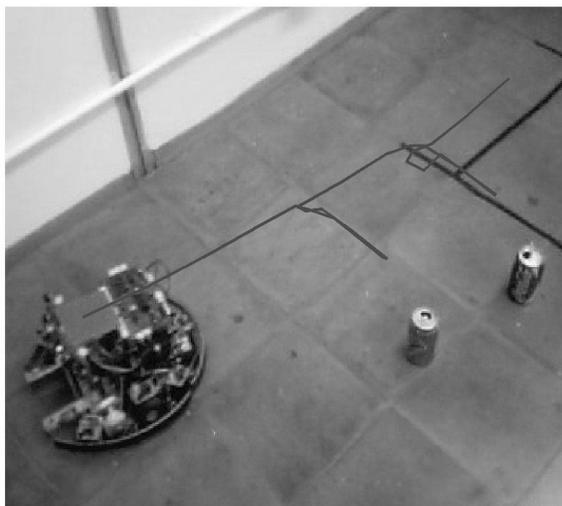


Fig.16. Trayectoria seguida por el robot en la prueba de toma de latas.

6. PERSPECTIVAS DE TRABAJO

A nivel software se pueden identificar las siguientes mejoras:

- Implementación de rutinas de alto nivel (arquitectura de control) que, basadas en los dos niveles inferiores de la arquitectura software,

permitan la ejecución de tareas más complejas que las llevadas a cabo durante las pruebas de validación del sistema robótico.

- Cambio de algunas rutinas que utilizan la función `delay()` (propia del compilador del microcontrolador para generar retardos), ya que ésta impide la ejecución de otras instrucciones mientras se está llevando a cabo (acción bloqueante), mediante el uso de los timers disponibles y sus respectivas interrupciones que permitan generar los tiempos de espera.

- Implementación de un sistema que permita compilar aplicaciones sencillas escritas en un archivo de texto y que sean basadas en las funciones de nivel medio y bajo de la arquitectura software, facilitando la programación del robot.

- Modificación de la interfaz de usuario en el modo comandado desde el computador para que la información del robot se actualice dinámicamente.

A nivel hardware se pueden identificar las siguientes mejoras:

- Aprovechando las capacidades de expansión de los microcontroladores, representadas en la disponibilidad de pines de los mismos y en la posibilidad de conexión de otros dispositivos al canal SPI, se puede dotar al sistema robótico de otro tipo de sensores, tales como infrarrojos para seguimiento de líneas, que permitan enriquecer la gama de tareas que el robot pueda realizar.

- Adicionar un dispositivo de comunicación inalámbrico que permita el mando a distancia del robot y una cámara inalámbrica que haga posible la teleoperación.

- Implementar un sistema de visión sencillo que le permita al robot obtener información más detallada de su entorno, para lo cual sería necesario adicionar memoria externa a los microcontroladores.

7. CONCLUSIONES

- Se diseñó e implementó un robot móvil autónomo confiable, con un manipulador embarcado funcional, un sistema de hardware y

software modular que permite la programación de diferentes tareas y dos modos de funcionamiento: comandado desde el computador y autónomo. Las especificaciones hardware del robot se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones del sistema robótico implementado.

Características físicas del manipulador	
Largo	20 cm
Ancho	25 cm
Peso (sin componentes)	649.8 g
Máxima apertura	9 cm
Mínima apertura	3 cm
Longitud de agarre de los dedos	10 cm
Ancho de la superficie de agarre de los dedos	2 cm
Tiempo de apertura-cierre	9 s
Tiempo de elevación	250 ms
Características eléctricas del manipulador	
Corriente consumida moviendo los dedos	50 mA
Corriente consumida levantando el manipulador	320 ma
Características físicas de la plataforma	
Diámetro	30 cm
Grosor	5 mm
Peso (sin componentes)	356.5 g
Diámetro de las ruedas	6.4 cm
Elevación respecto al piso	1.6 cm
Diámetro de la rueda libre	1.5 cm
Capacidad de carga	4 Kg
Características eléctricas de la plataforma	
Corriente consumida en movimiento	650 mA
Características del sistema robótico	
Velocidad	23.5 cm/s
Peso	3.3 Kg
Consumo de corriente	1.2 A

- El sistema robótico cuenta con dos microcontroladores en configuración maestro-esclavo, conectados por un canal de comunicaciones SPI. El esclavo se encarga de procesar las señales de los sensores del manipulador y de generar las acciones necesarias para tomar los objetos. El maestro, por su parte, procesa la información suministrada por los sensores de la plataforma y genera los comandos para el movimiento de la misma. Además, coordina la operación del robot para la realización de las tareas.

- Las pruebas efectuadas al robot en modo autónomo permitieron validar su comportamiento general. El manipulador es autónomo para realizar tareas de detección de objetos dentro de él, agarre y levantamiento de los mismos. La plataforma es capaz de reaccionar ante algún

cambio en sus sensores de contacto, ultrasonido e infrarrojos y ante los mensajes provenientes de la pinza, generando cierta acción de control. En general, el desempeño del conjunto pinza-plataforma es satisfactorio y lo convierte en una plataforma confiable para futuros desarrollos entre los que se podría incluir la implementación de tareas autónomas más complejas, las cuales dependen esencialmente del software del nivel alto.

- La interfaz utilizada en el modo comandado desde el computador facilita la implementación de otros sistemas de mando.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] A. Ollero, *Robótica: Manipuladores y Robots Móviles*, Marcombo Boixareu Editores, Barcelona, 2001.

[2] J. Jones, B. Seiger y A. Flynn, *Mobile robots: inspiration to implementation, 2 ed*, A.K Peters, Massachusetts, 1999.

[3] F. Federghini, D. Brengi y D. Lupi, *Sistema de detección combinado para sensores ultrasónicos*, en XVI Congreso Argentino de Control Automático (AADECA), Buenos Aires, Argentina, pp. 514-519, 1998.

[4] K. Ross, *Hacking a servo*, disponible en: <http://www.seattlerobotics.org/guide/servohack.html>, 2003.

[5] R. Murphy, *Introduction to AI Robotics*, The MIT Press, Massachusetts, 2000.

[6] Microchip, *Manual del microcontrolador PIC 18F452*, disponible en: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39564c.pdf>, 2003.

[7] J. Idrobo y H. Alvarez, *Interfaz locutor máquina mediante reconocimiento de palabras aisladas*, Trabajo de Grado, Universidad del Valle, Santiago de Cali, 2005.