

Tourou: Robot Móvil Autónomo Interactivo – Etapa 1

Nicolás J. Botín⁽¹⁾, Fernando J. Caride⁽²⁾, Alejandro Loidl⁽³⁾, Roberto D. Miguens⁽⁴⁾, Sebastián Trotta⁽⁵⁾ y Norberto M. Lerendegui⁽⁶⁾

Instituto Tecnológico de Buenos Aires
Av. Eduardo Madero 399, (C1106ACD) Buenos Aires, Argentina
e-mail: ⁽¹⁾ nibottini@gmail.com, ⁽²⁾ kfc951@gmail.com, ⁽³⁾ aloidl@gmail.com,
⁽⁴⁾ robmig83@gmail.com, ⁽⁵⁾ setrotta@gmail.com, ⁽⁶⁾ nlerende@itba.edu.ar

RESUMEN

El TOUROU es un robot móvil autónomo del tipo *Powered-Wheel Steering* (PWS) concebido para interactuar con la gente. Su estructura, propuesta por la Universidad de Tsukuba, Japón, está compuesta por perfiles U de aluminio, dos ruedas accionadas por motores de CC con caja de reducción y dos ruedas locas de apoyo.

En este trabajo se presenta la Primera Etapa del Proyecto TOUROU, la cual corresponde al Diseño e Implementación del *hardware* de Motricidad, Detección Ultrasónica de Objetos y Control General, y al desarrollo del *software* para el sorteo de obstáculos estáticos de ubicación desconocida.

En el frente y los dos laterales del robot se instalaron tres sensores de ultrasonido para detectar los objetos que aparezcan en su trayectoria. Además, se instalaron los cuatro módulos que dan vida a TOUROU: el Módulo de Detección de Objetos, el Módulo de Movimiento, el Módulo de Potencia y una PC Industrial (PCI) que constituye el cerebro.

En la PCI corre, bajo el sistema operativo Linux Puppy, el programa diseñado para planear las trayectorias. Este programa, escrito en lenguaje "C" está basado en una adaptación del algoritmo D*, el cual crea una secuencia de transiciones, que son comunicadas a la placa de movimiento para componer la ruta. La PCI recibe del Módulo de Detección de Objetos, las distancias a los obstáculos, y del Módulo de Movimiento, la orientación y la posición. Con esta información planea la trayectoria dinámicamente, buscando un camino óptimo para llegar a la meta deseada.

En una primera etapa se realizaron ensayos individuales de los módulos diseñados. Así, se ensayó la capacidad visual del robot para medir distancias a obstáculos, observándose un error máximo del 3,9%. Además, se realizaron pruebas con todos los módulos en funcionamiento, observando que el robot es capaz de sortear obstáculos rectangulares de posición desconocida, en diferentes configuraciones.

Palabras Claves: Robot Móvil, PWS, Sensor Ultrasónico.

1. INTRODUCCIÓN

El TOUROU es un robot móvil autónomo del tipo PWS (Powered-Wheel Steering) concebido para interactuar con la gente. Su estructura, propuesta por la Universidad de Tsukuba, Japón, está compuesta por perfiles U de aluminio, dos ruedas accionadas por motores de CC con caja de reducción y dos ruedas locas de apoyo. TOUROU es una palabra japonesa que se utiliza para identificar a las lámparas típicas de ese país. El robot fue bautizado con este nombre debido a que su forma se asemeja a la de esas lámparas (ver Figura 1).

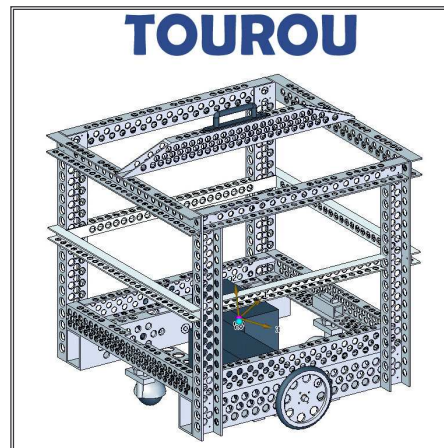


Figura 1: Imagen del robot armado en Solid Edge.

En este trabajo se presenta la Primera Etapa del Proyecto TOUROU, la cual corresponde al Diseño e Implementación del hardware de Motricidad, Detección Ultrasónica de Objetos y Control General, y al desarrollo del software para el Sorteo de Obstáculos Estáticos de dimensiones y ubicación desconocidas. TOUROU debe ser capaz de realizar una trayectoria, desde un origen conocido a un destino conocido, esquivando objetos desconocidos que permanecen estáticos. Los objetos no deben ser de menor tamaño que las dimensiones del robot, pudiendo éste conocer de antemano el contorno del ambiente a recorrer. La distancia entre pared y obstáculo, o entre obstáculos no debe ser inferior al doble del ancho del robot, que es de 42,5cm.

El hardware que se instaló en TOUROU está dividido en cuatro módulos: Detección de Objetos, Movimiento, Cerebro y Potencia. El cerebro está constituido por una PC industrial Versalogic Puma capaz de procesar información y tomar decisiones. Recibe información del ambiente proveniente del Módulo de Detección de Objetos y del Módulo de Movimiento. El primer módulo está formado por tres sensores ultrasónicos Parallax, los cuales se conectan a una placa que procesa el intervalo de tiempo entre emisión ultrasónica y recepción de eco, a los efectos de calcular la distancia que hay entre algún objeto y el robot.

Para poder desplazarse y esquivar objetos, las ruedas de TOUROU son accionadas por dos motores eléctricos de corriente continua independientes, cada uno acoplado a un encodificador (encoder) angular. Los motores se conectan a una placa electrónica que les da órdenes y

realiza un control de la velocidad que el cerebro le indica. Esta placa de movimiento también calcula la posición en la que el robot se encuentra y el ángulo (orientación) que tiene según un eje de coordenadas fijado a la habitación donde el robot realiza sus trayectorias.

La estructura del robot está formada por perfiles de aluminio y posee cuatro niveles para instalar el hardware, los motores y las baterías. Los tres primeros niveles tienen un piso de acrílico donde es sencillo fijar las placas electrónicas.

2. DESARROLLO

2.1. Módulo de Movimiento

El movimiento del robot se implementó a través de la acción controlada de dos motores MAXON CLL de 10 watt cada uno. La velocidad de cada motor se controló mediante el método de Modulación de Ancho de Pulso (PWM) a una frecuencia de 18 KHz. Cada uno de estos motores posee un encodificador (HDES-5540 A02) que se utilizó para controlar y medir la velocidad y la posición del móvil.

El control inteligente de los motores se realizó mediante un microcontrolador Motorola 68HC12 [1]. Este microprocesador mide la velocidad angular de cada rueda a través de encodificadores angulares, y mediante un control realimentado/anticipado (feed-forward) es capaz de controlar dicha velocidad modificando el ciclo de trabajo del Modulador de Ancho de Pulso PWM (Pulse Width Modulation) que controla la electrónica de potencia, con el objeto de que TOUROU alcance la velocidad lineal y la velocidad angular deseadas.

El microcontrolador 68HC12 cuenta también con dos puertos de comunicación RS-232 usados para la comunicación con la PC industrial. También es capaz de medir la temperatura de los Puentes H que controlan los motores y sus respectivas corrientes. La integración del microcontrolador, los sensores de temperatura y la electrónica de potencia que controla los motores se realizó mediante una placa llamada Módulo de Movimiento.

El primer paso para el diseño del Módulo de Movimiento fue el obtener las ecuaciones dinámicas del robot. A partir de la descripción del movimiento se introdujeron las ecuaciones en MatLab y Simulink para realizar una simulación del sistema de control y obtener las primeras constantes de ajuste. Una vez simuladas las ecuaciones se realizó un programa que fue grabado en el microcontrolador de la placa de movimiento del robot. El objetivo es que el Módulo de Control (PC Industrial) le envíe al Módulo de Movimiento la velocidad traslacional (v_{ref} [k]) y la velocidad angular (w_{ref} [k]) que debería alcanzar el robot, representando el índice "k" las sucesivas transiciones realizadas durante la trayectoria. Por su parte, el Módulo de Movimiento calculará el ciclo de trabajo PWM (0-100%) a aplicar a cada uno de los dos motores (DC_r = Ciclo de Trabajo Motor Derecho, DC_l = Ciclo de Trabajo Motor Izquierdo) a partir del conocimiento de los parámetros del robot y de la orden de movimiento recibida. Las ecuaciones dinámicas del robot se muestran a continuación. Se utilizarán los siguientes

subíndices: i = r ó l, r = right (derecha), l = left (izquierda). La Figura 2 muestra el sistema de coordenadas utilizado.

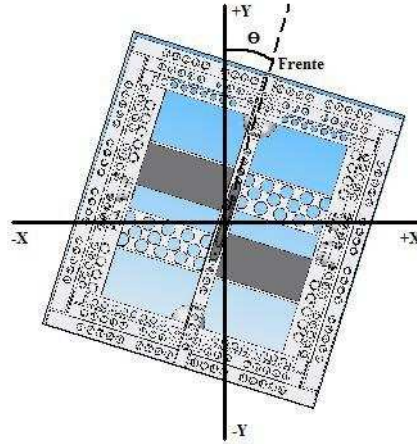


Figura 2: Coordenadas de Odometría del Robot.

Aplicando cinemática inversa [2] se puede establecer la relación entre las velocidades angulares de las ruedas w_i [k]:

$$\begin{bmatrix} w_r \\ w_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{D_r} & \frac{L}{D_r} \\ \frac{2}{D_l} & -\frac{L}{D_l} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_{ref} \\ w_{ref} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$w_r = \frac{2v_{ref} + L \times w_{ref}}{D_r} \quad \text{Velocidad angular de la rueda derecha} \quad (2)$$

$$w_l = \frac{2v_{ref} - L \times w_{ref}}{D_l} \quad \text{Velocidad angular de la rueda izquierda} \quad (3)$$

donde D_r es el diámetro de la rueda derecha, D_l es el diámetro de la rueda izquierda y L es la distancia entre ruedas.

Para aplicar una estrategia de control realimentado-anticipado se midieron todos los parámetros mecánicos y eléctricos del robot (planta a controlar). Los momentos de inercia fueron calculados mediante el programa Solid Edge. El peso del robot se obtuvo por medio de una balanza digital del taller de mecánica. La fricción en las ruedas se calculó a través de ensayos. Los parámetros del motor (J_m , R_a , U_o , K_m) se obtuvieron de la hoja de datos del fabricante. La Tabla 1 muestra el listado de parámetros mecánico-eléctricos del robot TOUROU y los correspondientes valores asociados.

Tabla 1: Parámetros del Robot TOUROU

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	VALOR
L	Distancia entre ruedas	0,398 m
D _r	Diámetro de rueda derecha	0,105 m
D _l	Diámetro de rueda izquierda	0,105 m
γ _r	Relación de reducción de rueda derecha	7,973x2 = 15,946
γ _l	Relación de reducción de rueda izquierda	7,973x2 = 15,946
J _{Mr}	Momento de inercia de motor derecho	10,6x10 ⁻⁷ kg.m ²
J _{Ml}	Momento de inercia de motor izquierdo	10,6x10 ⁻⁷ kg.m ²
J _r	Momento de inercia de la rueda derecha	0,000136 kg.m ²
J _l	Momento de inercia de la rueda izquierda	0,000136 kg.m ²
M	Masa total del robot	11,8 kg
J	Momento de inercia del robot	0,34 kg.m ²
δ _r	Coefficiente de fricción de la rueda motriz derecha	0,001 N.m.s
δ _l	Coefficiente de fricción de la rueda motriz izquierda	0,001 N.m.s
Ra _r	Resistencia de armadura del motor derecho	2,13 Ω
Ra _l	Resistencia de armadura del motor izquierdo	2,13 Ω
Uo _r	Tensión nominal del motor derecho	12 V
Uo _l	Tensión nominal del motor izquierdo	12 V
K _{Mr}	Constante de torque del motor derecho	0,00235 N.m.A ⁻¹
K _{Ml}	Constante de torque del motor izquierdo	0,00235 N.m.A ⁻¹
Ts	Tiempo de cálculo	0,0031 s

Aplicando la ley de Newton resulta:

$$M \frac{dV_{robot}}{dt} = f_r(t) + f_l(t) \quad (4)$$

$$J \frac{dW_{robot}}{dt} = L(f_r(t) - f_l(t))$$

donde f_r y f_l son las fuerzas de interacción de las ruedas con el piso. Teniendo en cuenta las relaciones cinemáticas, se pueden obtener las expresiones de los torques de los motores izquierdo y derecho en función de las velocidades angulares de las ruedas, resultando:

$$T_{Mr} = \frac{1}{\gamma_r} \left(\gamma_r^2 J_{Mr} + J_r + \left(\frac{M}{16} + \frac{J}{8L^2} \right) D_r^2 \right) \frac{dw_r}{dt} + \frac{1}{\gamma_r} \left(\left(\frac{M}{16} - \frac{J}{8L^2} \right) D_r D_l \right) \frac{dw_l}{dt} + \frac{\delta_r}{\gamma_r} w_r \quad (5)$$

$$T_{Ml} = \frac{1}{\gamma_l} \left(\gamma_l^2 J_{Ml} + J_l + \left(\frac{M}{16} + \frac{J}{8L^2} \right) D_l^2 \right) \frac{dw_l}{dt} + \frac{1}{\gamma_l} \left(\left(\frac{M}{16} - \frac{J}{8L^2} \right) D_r D_l \right) \frac{dw_r}{dt} + \frac{\delta_l}{\gamma_l} w_l \quad (6)$$

Si se agrupan las constantes mecánicas de la planta estructura-motores se tiene:

$$T_{Mr} = A \frac{dw_r}{dt} + C \frac{dw_l}{dt} + E w_r \quad \text{Torque en el motor derecho} \quad (7)$$

$$T_{Ml} = B \frac{dw_l}{dt} + D \frac{dw_r}{dt} + F w_l \quad \text{Torque en el motor izquierdo} \quad (8)$$

Las ecuaciones (7) y (8) expresan el torque requerido en cada motor para sostener el movimiento pretendido para w_r y w_l . Para calcular los Ciclos de Trabajo (Duty Cycle) se tiene:

$$T_{Mi} = K_{Mi} \cdot I_i = K_{Mi} \left(\frac{U_i - e_{ai}}{R_{ai}} \right)$$

$$e_{ai} = K_{Mi} \cdot w_{Mi} = K_{Mi} \cdot \gamma_i \cdot w_i$$

$$U_i = U_{oi} \cdot DC_i$$

$$DC_i = \frac{R_{ai}}{U_{oi} \cdot K_{Mi}} T_{Mi} + \frac{K_{Mi} \cdot \gamma_i}{U_{oi}} w_i$$

$$DC_i = G_i \cdot T_{Mi} + H_i \cdot w_i \tag{9}$$

La estrategia de control seguida fue del tipo control realimentado/anticipado, utilizándose un enfoque PI (proporcional-integrador) en la rama realimentada, operando sobre la diferencia entre la velocidad angular de referencia y la velocidad angular medida. Las ecuaciones se introdujeron en el Matlab siguiendo como esquema modelo el bloque básico de la Figura 3. Obsérvese que de (9) el DC_i es función de T_{Mi} y w_i , y por (7) y (8), T_{Mi} es función de w_r y w_l .

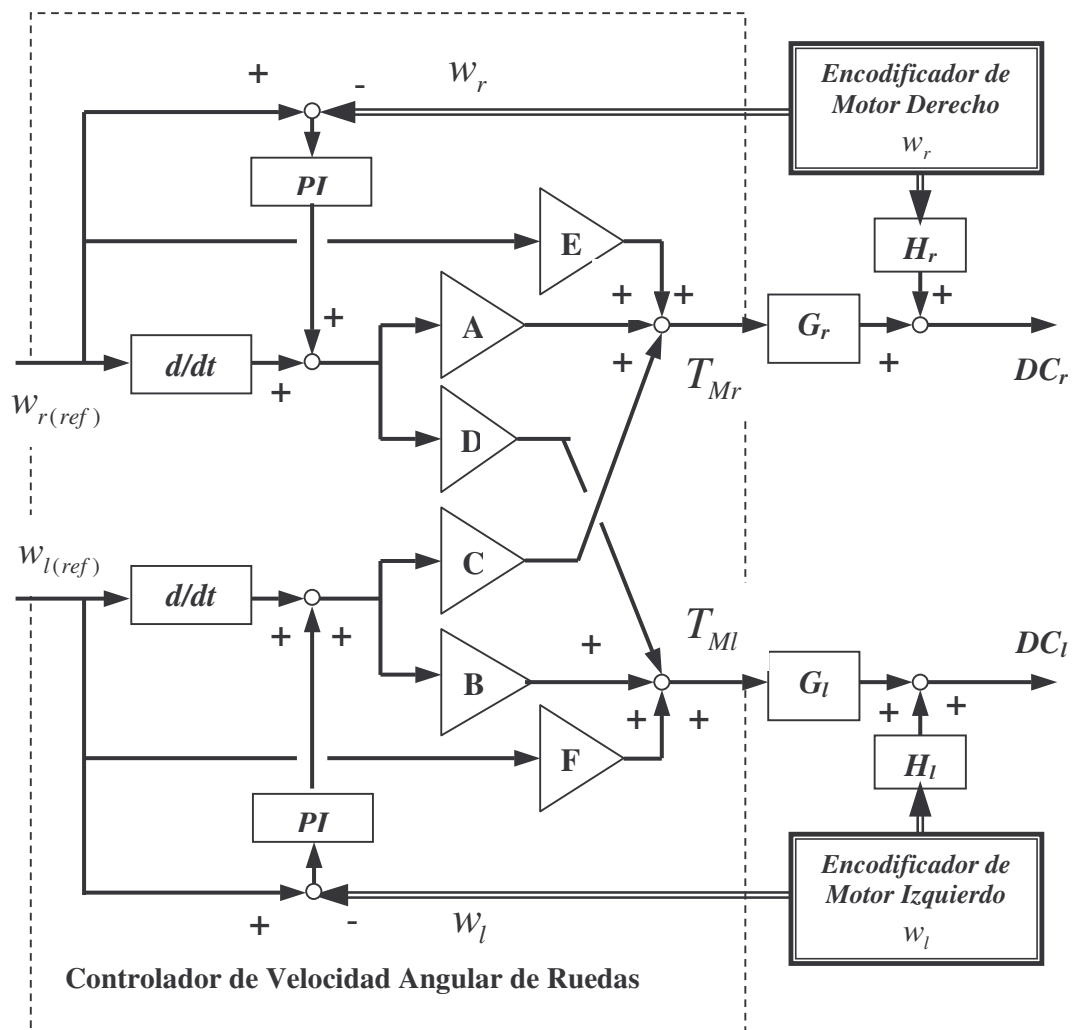


Figura 3: Estrategia de control anticipado / realimentado (PI)

Con las simulaciones en MatLab se estimaron los Coeficientes Proporcional (Kp) e Integrativo (Ki) más adecuados, obteniéndose: Kp=20 y Ki=10.

El Módulo de Movimiento también realiza odometría sin observar el ambiente externo, utilizando expresiones discretas para la estimación de la posición a partir de la información que los encodificadores brindan,. Las ecuaciones de la posición y orientación del TOUROU son:

$$\begin{aligned}\theta_{k+1} &= \theta_k + w_k * \Delta t \\ x_{k+1} &= x_k + v_k * \text{sen} \theta_k * \Delta t \\ y_{k+1} &= y_k + v_k * \text{cos} \theta_k * \Delta t\end{aligned}\tag{10}$$

donde v_k y w_k son las velocidades traslacional y angular respectivamente.

El programa del Módulo de Movimiento se escribió en lenguaje “C” [3] con el compilador CodeWarrior de Freescale especial para este tipo de microcontroladores. Para probar este módulo se creó un programa en HyperTerminal que permitió observar la posición, el ciclo de trabajo de los motores, la velocidad del robot y la velocidad de las ruedas en forma remota.

2.2. Módulo Detector de Objetos

Para proveer capacidad de detección de objetos se instalaron tres sensores PING))) de Parallax, uno en la parte frontal de TOUROU y otros dos en sus laterales. Se los ubicó en el interior del los perfiles U que componen el robot para que no sufrieran ningún golpe indeseado. Cada sensor posee tres pines de conexión (ver Figura 4), uno para la alimentación (5V DC), otro para la tierra, y un tercero para la señal.

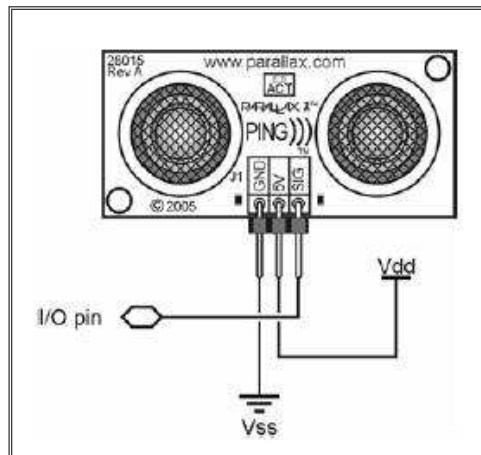


Figura 4: Detalle de los pines del sensor ultrasónico

Se diseñó y armó una placa electrónica dedicada a la detección de objetos. En ella se instaló un microcontrolador MC68HC908QB8 que posee 4 temporizadores, tres de ellos destinados para trabajar con los sensores. El sensor PING))) puede detectar un objeto que se encuentra en un rango de 30 mm a 3000 mm. La señal acústica emitida por el sensor viaja a 344 m/s.

Para detectar un objeto se le envía al sensor un pulso por el pin “señal”. Al recibir el pulso el sensor emite una onda sonora de 40kHz y al hacerlo pone en uno lógico el pin “señal”. Dicho pin se mantiene así hasta que la onda sonora retorna y el pin pasa a cero nuevamente. En el microcontrolador se mide ese tiempo y se calcula la distancia a la cual se encuentra el objeto. El tiempo de muestreo para cada sensor es de 67,5ms. De este modo, la frecuencia de refresco del vector de 3 distancias a cada cara del robot es de aproximadamente 15Hz. La medición de distancia consiste en medir el número de “ticks” de temporización durante el tiempo del eco y aplicar la fórmula siguiente, que fue verificada experimentalmente:

$$d = \frac{\text{medición}[\text{Ticks}] \cdot 300[\text{cm}]}{21915[\text{Ticks}]} \quad (11)$$

2.3. Módulo de Control

El cerebro de TOUROU es una PC Industrial (PCI) VersaLogic EPM-5 Puma que tiene un microprocesador AMD GX 500 Based SBC, e incluye un puerto ethernet, una salida de video VGA, cuatro puertos USB, un puerto RS232, dos puertos RS422 y la interfaz PC/104-Plus. En esta PCI se instaló el sistema operativo Linux Puppy. Se escogió dicho sistema porque se disponía de los controladores de software necesarios, y porque no requería mucho espacio en memoria para su instalación. Sobre este sistema operativo se instalaron los programas básicos para realizar la programación en lenguaje C y la compilación del programa.

Las actividades del cerebro pueden resumirse en las siguientes tareas:

- Ingreso de datos de ubicación actual del robot y destino final respetando las dimensiones del espacio predefinido.
- Proceso de los datos ingresados y alistamiento del robot para cumplir la meta deseada
- Adquisición de datos del ambiente por medio de una comunicación con el módulo de detección de objetos. Adecuación de la información para su correcta interpretación.
- Adquisición del estado de movimiento del robot mediante la comunicación con el módulo de movimiento. Interpretación de los datos.
- Cálculo de trayectoria a partir del destino prefijado, los datos del ambiente y la ubicación del robot.
- Toma de decisiones en forma dinámica como consecuencia de la introducción de objetos presentes en su ambiente.
- Generación y ejecución de una serie de órdenes con el fin de manipular la trayectoria del robot para lograr llegar a destino.

La estructura de pensamiento del cerebro puede separarse en dos partes. Una primera en la que se gestionan todas las interacciones con las “piernas” y “ojos”, y una segunda parte donde se realiza el proceso de cálculo del impacto de las condiciones actuales sobre el comportamiento deseado del robot y la generación de las órdenes que se le deben dar a sus “extremidades”. La tasa a la que el cerebro se comunica con las otras partes de su cuerpo

varía dependiendo del tiempo que le lleve procesar los datos y tomar las decisiones; el tiempo mínimo es de 75ms. El compilador que se encuentra instalado en la PCI y que fue utilizado en el desarrollo del software es el GCC. El archivo ejecutable, que se ha generado compilando los distintos módulos de control, se llama TOUROU, y recibe cinco argumentos por línea de comando. El prototipo de llamada para la correcta ejecución es:

tourou robot_x_position robot_y_position robot_orientation robot_goal_x robot_goal_y

donde todas las coordenadas se encuentran expresadas en cm. La orientación es un ángulo de 0° a 360° que crece en el sentido de las agujas del reloj y tiene su origen en el eje vertical del extremo inferior de la habitación. Un ejemplo de ejecución del programa es el siguiente:

./tourou -100 -100 45 200 150

Este comando indica que, vista la habitación en planta, el robot se encuentra un metro a la izquierda y un metro debajo del centro de la habitación, formando un ángulo de cuarenta y cinco grados con el eje vertical, y debe llegar hasta un punto ubicado a dos metros a la derecha del centro de la habitación y a ciento cincuenta centímetros sobre él.

2.4. Planificación de Trayectorias

Si se le solicita a TOUROU que llegue a un destino B desde un origen A, ambos puntos pertenecientes a la habitación que él ya conoce, el cerebro planea una trayectoria. Para realizarla le informa al módulo de movimiento las velocidades lineales y angulares que debe tomar el robot en cada momento de la ruta creada. Gracias a los datos que recibe de los Módulos de Detección de Objetos y Movimiento, el cerebro puede verificar si está realizando correctamente el recorrido o ver si hay algo que impide que la ruta se complete (un obstáculo estático).

Si el robot se desvía de la trayectoria planeada entonces el camino restante se replantea y se crea una trayectoria nueva. Durante el proceso de replanteo del camino el robot puede detenerse y esperar hasta tener la nueva ruta, o continuar con su último estado, siempre y cuando el replanteo sea rápido o que el cambio no sea muy grande.

Para realizar el algoritmo que planea las trayectorias se aplicó el algoritmo D* [4], el cual es capaz de planear una trayectoria óptima en tiempo real y realizar reparaciones del camino mediante los nuevos datos que va recibiendo de los sensores. La planificación de una trayectoria se puede determinar con una secuencia de transiciones de estado que se realizan en un gráfico conocido desde algún estado inicial hacia algún estado final, o se determina que ninguna secuencia de transiciones existe. El camino es óptimo si la suma de transiciones es mínima a través de todas las secuencias posibles por el gráfico. Si durante el cumplimiento de la trayectoria, una o varias transiciones en el gráfico son incorrectas, la parte restante del camino puede tener que ser replanteada para conservar lo óptimo. Una trayectoria es óptima si cada transición en ella es la parte de un camino óptimo al objetivo, suponiendo en el momento de cada transición que toda la información conocida sobre éstos es correcta.

El algoritmo D* aprovecha el hecho de que la mayor parte del gasto de las correcciones ocurren en los alrededores del robot, y sólo la parte del camino de estas correcciones hacia fuera de la posición actual del robot tiene que ser planificada de nuevo. D* mantiene una parte del mapa con gasto óptimo limitado con aquellas posiciones que probablemente vaya a emplear el robot.

3. CONCLUSIONES

En una primera etapa se realizaron ensayos individuales de los módulos diseñados. Las velocidades de traslación máxima y mínima medidas fueron 55,25cm/s y 1 cm/s, respectivamente. Las velocidades de rotación pura (spinning) máxima y mínima medidas fueron 180°/s y 5°/s. Durante los ensayos se detectó que al realizarse 10 vueltas de rotación pura el error de ángulo girado fue de aproximadamente 2%. Este error no tuvo impacto sobre el cálculo de las trayectorias debido a las dimensiones reducidas del ambiente (4m x 4m). En caso de trabajar con dimensiones mayores, podría existir un efecto acumulativo que deberá ser evaluado oportunamente. El error máximo de la medición de distancia mediante los sensores de ultrasonido fue de 3,9%.

El programador de trayectorias probó ser adecuadamente robusto, ya que en varios ensayos (ver Figura 5) pudo armar correctamente las rutas a seguir, e incluso corregirlas durante la marcha, para llegar a la meta, sorteando obstáculos rectangulares de posición desconocida, en diferentes configuraciones.



Figura 5: Ensayo final

4. REFERENCIAS

- [1] P. Spasov, *Microcontroller Technology: the 68HC11*, Prentice Hall, USA, 2001
- [2] J. Craig, *Introduction to Robotics*, Pearson Prentice Hall, USA, 2005
- [3] B. Kernighan, D. Ritchie, *The C Programming Language*, Prentice-Hall, (1991)
- [4] A. Stentz, "The Focussed D* Algorithm for Real-Time Replanning", International Joint Conference on Artificial Intelligence, (1995)