

LOCALIZACIÓN DE MATERIALES RADIATIVOS EMPLEANDO UN ROBOT MÓVIL CON GPS

Segovia, J.A.^{1,2}, Benítez, J.S.^{1,2}, Garduño M.P.², Bucio F.J.¹ y Rivero T.¹

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares,
² Instituto Tecnológico de Toluca

RESUMEN

El desarrollo aquí propuesto busca que un operador de PR pueda situar de manera adecuada sus aparatos de medición necesarios a fin de localizar de manera precisa una posible fuente de radiación. Este sistema permitiría también realizar tareas con fines de su recuperación. Para su consecución, se podrían utilizar sensores de los que actualmente han aparecido en el mercado, y que cada vez se emplean más y más en los robots móviles con la finalidad de extender sus capacidades de percepción. Tales elementos permiten facilitar su posicionamiento de manera cada vez más autónoma, lo cual apoya de manera positiva el trabajo de los operadores. Para tal trabajo se propone el desarrollo de un sistema basado en un robot móvil provisto de un receptor GPS para habilitarlo a llegar al punto destino ordenado por el operador donde se sospecha la posible presencia de alguna fuente radiactiva. El punto en cuestión es indicado de manera interactiva por el operador sobre un mapa del lugar, punto al cual el robot puede llegar de manera autónoma con una precisión dependiente del sistema GPS; la localización fina de la fuente radiactiva sería mediante el empleo del detector de radiación.

1. INTRODUCCIÓN

El trabajo en ambientes radiactivos sugiere el empleo de ciertas herramientas que permitan a los técnicos en protección radiológica mantenerse a distancias prudentes de las fuentes¹. La energía proveniente de este tipo de materiales es difícil de percibir, por lo cual aparatos especiales deben ser empleados, lo cual, es deseable que muchas veces se haga de manera remota. Con ayuda del desarrollo aquí propuesto, el operador podría situar de manera suficientemente precisa el aparato de medición.

Actualmente han aparecido en el mercado una gran cantidad de dispositivos sensoriales^{2,3} que pueden utilizarse para facilitar el posicionamiento de algún móvil, el empleo de estos puede permitir obtener un equipo que podría apoyar el trabajo de los expertos en protección radiológica mediante el posicionamiento a distancia de sus aparatos de medición de la radiación. Dicho de esta manera, tales elementos pueden ser utilizados para equipar los sistemas sensoriales de vehículos tales como robots móviles para hacer llegar al lugar deseado los medidores. Ejemplos de estos sensores pueden ser como los acelerómetros, giroscopios, unidades de medición inercial (IMU), medidores de altitud, medidores de distancia láser, medidores de distancia ultrasónicos, GPS, etc. De todos estos sensores enumerados y algunos otros no incluidos, el más importante para el proyecto aquí presentado es el GPS^{3,4,5} (Global Positioning System) y una brújula electrónica (compass). Un robot móvil equipado de un sistema de posicionamiento global puede ser de gran ayuda al técnico de PR para posicionar de manera suficientemente precisa sus aparatos de medición de radiactividad. El sistema de comunicación del robot mantendría informado en tiempo real al

¹ E-mail del Autor. armando.segovia@inin.gob.mx

operador sobre los niveles de radiación existentes en el espacio en estudio. Un sistema de este tipo podría ser extremadamente útil para eventos como el suscitado en México cuando una fuente radiactiva destinada al almacenamiento final fue sustraída del camión en el cual era transportada⁶. En este evento el departamento de Protección Radiológica del ININ (Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, México) participó en la solución del problema generado^{7,8}. Este proyecto propone el desarrollo de un equipo de apoyo para futuras eventualidades. Se plantea el uso de un GPS para la *navegación global* del robot, y finalmente la *navegación local* en el sitio de inspección empleando el mismo detector de radiación.

2. LOS ROBOTS MÓVILES EN ACTIVIDADES DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

2.1. Participación Activa de los Robots Móviles en Eventos Nucleares

En Savannah River Site (SRS), una empresa de producción de radioisótopos, robots y teleoperadores fueron usados en la detección de radiación y en inspección visual, descontaminación, manejo de materiales radiactivos, y aplicaciones de respuesta a emergencias por su Departamento de Energía (DOE). El complejo SRS es de una extensión de 777 km², compuesto de muchos sitios de operación separados, incluyendo fabricación de combustibles y objetivos, reactores nucleares, separaciones químicas, manejo de desechos y un laboratorio de investigación y desarrollo que incluye un grupo de desarrollo en robótica (RDG). La misión de RDG es aplicar, desarrollar y apoyar la tecnología remota y robótica para mejorar la seguridad, reducir las exposiciones del personal a la radiación y potencial contaminación, y reducir los costos asociados con la mano de obra, materiales y disposiciones en operaciones nucleares. En 1984, a petición del Departamento de Protección de la Salud de SRS, RDG puso en operación un robot RMI-3 (construido por PEDSCO, Canadá) para mapear la radiactividad existente en la parte alta de un tanque de almacenamiento de desechos luego de un derrame de material radiactivo⁹. Para esta finalidad, el robot fue equipado de un detector de radiactividad normalmente manual, el cual fue colocado en el efector final del brazo del vehículo. En esa ocasión el robot fue teleoperado, realizándose el enlace mediante un cable de 61 m, el cual, obviamente, limitaba su movilidad. Posteriormente un robot autónomo fue desarrollado para realizar supervisiones radiológicas de rutina de corredores y estancias en laboratorios y edificios donde una contaminación pudiera existir.

Ejemplos más recientes de la participación de robots móviles en actividades de protección radiológica son en la recuperación de accidentes como el de Chernóbyl (sucedido el 26 de Abril de 1986) y el de Fukushima (11 de Marzo de 2011). En el primer caso, ante las condiciones altamente riesgosas para personal humano, las autoridades involucradas trataron de poner inmediatamente en funcionamiento varios tipos de robots; dentro de ellos, dos vehículos lunares Lunahod modificados por una empresa Alemana para ser controlados mediante un radiocontrol. Estos robots fueron colocados empleando un helicóptero en el techo, sin embargo, a los pocos minutos de estar en operación, la intensa radiación dañó su electrónica y se volvió imposible el continuar su control, con lo cual, incluso algunos de ellos se precipitaron al vacío¹⁰. Esto pone en evidencia de cierta manera que en ese momento se desconocían a fondo los daños que podía causar la radiación sobre la electrónica de este tipo de máquinas. Varios tipos de robots de diferentes orígenes corrieron la misma suerte, de tal

manera que las operaciones de recuperación tuvieron que involucrar el sacrificio de muchas personas (llamados “liquidadores”).

2.2. Afectación de los Sistemas Electrónicos a considerar en el empleo de Robots

Actualmente casi todos los desarrollos de robots y máquinas automáticas cuentan con un sistema de cómputo basado en uno o más μ Procesadores (o μ Controladores). En un sistema robótico complejo, pueden ser necesarias varias computadoras. La definición de un estado de manera permanente (programación del dispositivo) se hace generalmente mediante la aplicación de un cierto voltaje, y el borrado de esta programación en muchos de ellos se hace mediante la inserción al sistema de alguna energía, como se hace en las memorias o microcontroladores borrados mediante luz ultravioleta. Para protegerlos de un borrado no deseado, las ventanas de estos dispositivos son cubiertas con algún material. Los dispositivos que no están destinados a un borrado de esta manera no cuentan con una ventana de exposición. Sin embargo, si cualquiera de estos dispositivos es expuesto a una radiación muy intensa, aún sin una ventana de exposición, la radiación puede producir efectos que pueden borrar su memoria de manera impredecible, lo que puede ocasionar un mal funcionamiento o definitivamente, su destrucción. Algunas investigaciones se han realizado para definir cómo afecta la radiación ionizante en diversos componentes. Xiao-Ming y sus colaboradores¹² han realizado estudios específicos para determinar los efectos de radiación ionizante en microcontroladores CMOS empleando pulsos de radiación Gamma de 20 ns provenientes del acelerador "Qiangguang-I" con niveles de radiación de entre 6.7×10^6 a 2.0×10^8 Gy/s. Los transitorios de la radiación ionizante inducen fotocorrientes a nivel de las uniones PN, que son los elementos mediante los cuales se conforman los diversos componentes en el sustrato de silicio y que dan forma al circuito integrado en cuestión, por lo cual se considera que esta fotocorriente es responsable de la degradación eléctrica y funcional del microcontrolador. Derivadas de éste y otros estudios, muchas medidas se han tomado para proteger de manera eficiente el funcionamiento de los dispositivos programables ante los efectos de la radiación.

2.3. Nueva Generación de Robots Móviles en Eventos con Altos Niveles de Radiación

En el más importante de los recientes acontecimientos, ocurrido en la Central Nuclear de Fukushima, en Japón, robots de la compañía *iRobot* (Massachusetts) han sido puestos en operación algunas semanas después del desastre para llevar a cabo tareas de limpieza de los reactores nucleares de la compañía Tokyo Electric Power Company (TEPCO). Estos vehículos controlados remotamente han removido escombros y medido los niveles de radiación en zonas de riesgo¹¹. De su línea de robots, *iRobot* ha puesto en operación en Fukushima el *PackBot 510* que es un aparato ligero, y además el *Warrior 710* que posee capacidades mucho más grandes de carga. De hecho el *Packbot* fue el que entró por primera vez al edificio del reactor 3 después del accidente y tomó medidas de radiación en el primer piso de la unidad 1. Estos robots fueron originalmente construidos para participar en el campo de batalla, pero han sido modificados para navegar y soportar las peligrosas condiciones en la planta nuclear. La filial Norte Americana de QuinetiQ, otra compañía de tecnología para la defensa, envió también varios robots a la planta nuclear devastada; su robot *TALON*, el cual navegó entre escombros fuera de la planta para medir los niveles de radiación, el *Bobcat*, utilizado para levantar pesados escombros, y el *Dragon Runner*, de tan solo 15 pulgadas para misiones en espacios reducidos. El *TALON* fue controlado por

operadores desde vehículos blindados, lo que permitió reducir las dosis de radiación adquirida a los trabajadores en 60 %, aumentando de esta manera el tiempo que pudieron permanecer en el sitio.

A diferencia de los robots empleados en el accidente de Chernóbil, estos robots son ejemplos de los que en la actualidad han podido resistir las severas condiciones impuestas por los altos niveles de radiación existentes en Fukushima.

3. EL SISTEMA DE EXPLORACIÓN PROPUESTO

Durante los casos de eventualidades radiológicas sucedidos en México y mencionados anteriormente, una parte importante de la tarea de la recuperación de la fuente radiactiva ha sido la de su localización. Esto es debido a que como resultado de los actos ilícitos las personas involucradas una vez que se han percatado de la peligrosidad de las sustancias, se han deshecho de ellas en sitios de muy difícil acceso y que después tienen que ser determinados por los expertos de protección radiológica. Es para esta tarea que se propone el sistema robótico.

3.1. Selección del Tipo de Robot Móvil

De los robots terrestres, como el requerido para esta aplicación, existe una gran variedad. Dependiendo del desempeño que se quiere tener, es necesario considerar el tipo que mejor se adapte a los requerimientos. Atendiendo a los criterios de velocidad y de estabilidad, se ha decidido para nuestro robot un tipo de locomoción en base a orugas, que podría ser como el del PackBot de iRobot o el MMP-40X de The Machine Lab Inc. Una ventaja de un robot como el PackBot es que puede estar equipado con aletas motorizadas (flippers), las cuales le brindan una mayor habilidad en el ascenso de escaleras y en el caso de recuperación de una volcadura. Esta llega a ser una característica importante dada la irregularidad de los terrenos en los cuales a veces se deben desplazar estos vehículos ante las emergencias, como el cual fue el caso en una de las emergencias en el país cuando uno de los grandes robots que se estaba empleando volcó.

3.2 Composición del Sistema

El sistema propuesto se centra en un robot a orugas equipado principalmente de un receptor GPS, una cámara de vídeo y un detector de radiación. El robot mantiene una comunicación constante con la consola de operación, desde la cual el experto en PR le puede indicar el sitio al cual trasladarse para iniciar la búsqueda de la fuente radiactiva. Para las comunicaciones se propone un enlace inalámbrico brindado por un par de módulos XBee-PRO 900HP con un alcance de hasta 45 Kms (28 millas) con línea de vista¹³. Este enlace es capaz de brindar la posibilidad del envío tanto de comandos desde la consola hacia el robot como de información desde el robot hacia la consola gracias a su amplio ancho de banda (de hasta 230,400 bauds). Otro enlace de comunicación es el que se tiene entre la cámara de vídeo y la consola de operación. Este enlace está dedicado exclusivamente al control de la cámara por parte de la consola y el envío de flujo de video desde la cámara hacia la consola.

El robot cuenta con una computadora monocarta Raspberry, la cual es la encargada de recibir los comandos enviados desde la consola de operación y de interpretar estos y generar las señales para el control de los motores de las orugas para producir el desplazamiento deseado.

La información de posicionamiento global es obtenida mediante el empleo de un receptor GPS (PMB-648), el cual se conecta a la Raspberry mediante su conexión SCI funcionando a niveles TTL. La figura 1 ilustra la arquitectura del sistema.

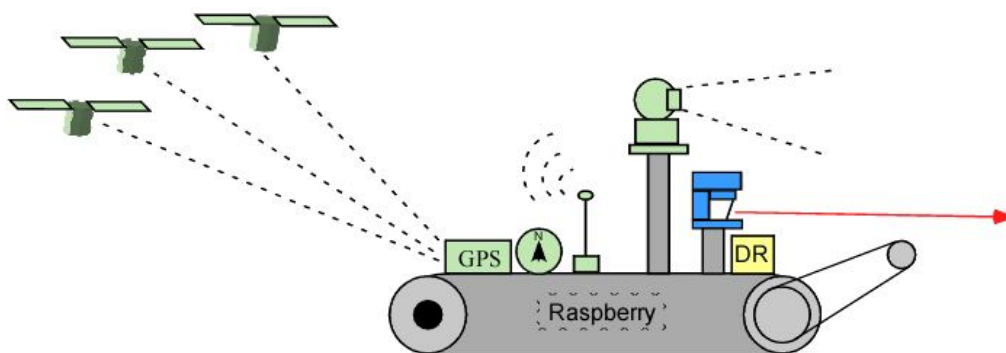


Figura 1. Composición del sistema propuesto.

3.3. Navegación Autónoma Mediante Datos de Localización Global

Para desarrollar un método de navegación en exteriores es necesario contar con un sensor que nos permita a todo momento monitorear la configuración del robot⁹, para lo cual se emplea un receptor GPS³. Específicamente, en el Departamento de Automatización e Instrumentación del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) se cuenta con receptores GPS RXM-GPS-SR de la marca Linx y el PMB-648 de Cirocomm Technology, que han sido utilizados para realizar pruebas y con los cuales se ha adquirido una buena experiencia. Los datos de localización que se pueden obtener de un dispositivo como estos pueden permitir obtener una exactitud en la ubicación del móvil dentro de un radio de 5 metros⁴. Con la finalidad de mejorar esta exactitud es posible estructurar una red de dispositivos GPS colocados en ubicaciones bien conocidas de tal manera de poder compensar los errores que se pudieran tener con un solo receptor GPS montado sobre el robot. Con un sistema GPS actualmente la exactitud que se puede obtener está dentro del rango de lo deseable, y con una estructura DGPS, la resolución se puede mejorar hasta obtener incertidumbres de menos de 1 metro³.

El conjunto de datos provenientes de un receptor GPS contiene diferentes informaciones, todas ellas definidas en la norma NMEA-0183 (de la National Marine Electronics Association, USA). La más importante de ellas para nuestro proyecto es referente a la ubicación que calcula el receptor en base a la información obtenida del sistema de satélites. Esta información está dada como datos de Latitud y Longitud, y el rango de valores es de -90° a $+90^{\circ}$ (S/N) para la latitud, y de -180° a $+180^{\circ}$ (W/E) para la longitud^{4,5,10}. Otras informaciones son referentes a diversos aspectos como el tiempo UTC (tiempo universal coordinado), el número de satélites a la vista del receptor, metros sobre el nivel del mar, etc.

Los datos de latitud y longitud son representados en grados y minutos, con una exactitud de hasta diezmilésimas. Estos valores para que puedan ser de utilidad para el proyecto deben ser transformados a metros, en un sistema coordenado XY, para lo cual se emplea una transformación como la planteada en el método UTM (Universal Transverse Mercator System). Para obtener una exactitud utilizable, se deben estudiar algunos conceptos que son necesarios en navegación¹⁰. Esta información geográfica sirve para calcular la curva de desplazamiento del robot que le permite llegar al sitio solicitado por el operador.

Adicionalmente, el robot debe contar con información sobre los posibles obstáculos que pudiera encontrar durante su desplazamiento. Para ello se planea estructurar un sistema sensorial compuesto por varios tipos de sensores^{2,11}. El principal de ellos es un telémetro láser capaz de brindar información de distancia en un campo de hasta 270° alrededor del robot, y con un alcance de hasta 20 metros. Esta información permitirá definir la presencia de obstáculos en la cercanía inmediata frente al robot, con la finalidad de habilitar el desplazamiento calculado para hacer llegar el robot al punto deseado, o sugiriendo la posibilidad de la generación de otra curva de desplazamiento que permita evitar el (o los) obstáculo(s) detectado. El sistema de telemetría será complementado con un sistema de visión que permita detectar otros aspectos del ambiente como pueden ser cordones de banqueta, delimitaciones de carril, etc. Un receptor GPS es capaz de brindar información sobre la dirección del móvil cuando éste se encuentra en movimiento, sin embargo, si el móvil está inicialmente en reposo, esta información no es confiable. Por tal motivo, una brújula electrónica será utilizada como elemento redundante para la determinación de la dirección actual del vehículo.

3.4. Un Robot a Oruga es un Vehículo No-Holonómico

Actualmente, la información provista por un GPS montado en un vehículo holonómico (omnidireccional) es suficiente para lograr que éste se desplace de manera inmediata al punto deseado. Ejemplos de estos vehículos son una gran cantidad de UAVs (unmanned aircraft vehicles) que han aparecido en el mercado, tales como cuadricópteros, hexacópteros, etc. Sin embargo, en el caso de vehículos no-holonómicos, como es el caso del vehículo a orugas seleccionado, el lograr esto es bastante más complicado. Esto se debe a su restricción cinemática que le impone que todo desplazamiento debe ser realizado en dirección normal a su eje de tracción, tal como sucede en cualquier coche (ver figura 2). En este tipo de vehículos es bien sabido el problema que impone el estacionar un coche, ya que no existen posibilidades de desplazamientos laterales.

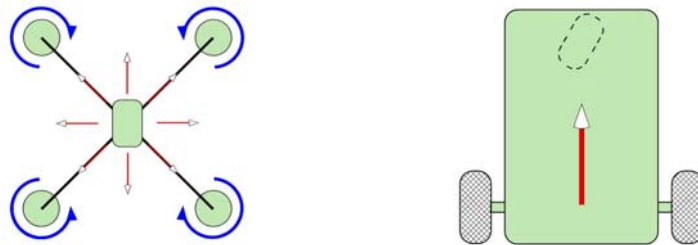


Figura 2. Ejemplos de un vehículo holonómico (cuadricóptero) y uno no-holonómico

La información obtenida del receptor GPS debe ser transformada a metros en un sistema referencial a fin de que sea posible determinar una curva de desplazamiento que cumpla con las restricciones cinemáticas del vehículo. Durante muchos años este problema ha sido un caso de estudio en la Planificación de Caminos (Path Planning) en Robótica Móvil¹⁴. Algunas soluciones se han encontrado y han sido adaptadas de manera más o menos efectiva sobre varios tipos de robots empleando métodos apoyados en la minimización de algún costo de interés (como puede ser la máxima distancia del recorrido, curvatura promedio, gasto de energía, etc.). Otras están basadas en métodos más geométricos empleando líneas rectas unidas de alguna manera con rotaciones “in situ”, arcos de circunferencia, clotoides, etc., o algún tipo de curva más o menos especial tratando de obtener una continuidad del desplazamiento de hasta al menos en curvatura¹⁵. El método aquí propuesto para el desplazamiento del robot está basado en las llamadas “Curvas de Bézier”. Estas curvas son conocidas ampliamente por los autores y han demostrado ser bastante útiles cuando se aplican a la planificación de caminos de robots móviles. Su simplicidad, facilita la replanificación de la curva ante la aparición de algún objeto imprevisto.

Las Curvas de Bézier fueron desarrolladas originalmente para ser empleadas en el diseño de carrocerías de automóviles en las fábricas de Renault, y más recientemente en el diseño y la generación de trayectorias de robots^{15,16,17}. Una curva de Bézier es definida por un conjunto de m puntos p_i llamados “puntos de control” (p_i es un elemento vectorial que contiene las coordenadas x_i, y_i de un punto i en el espacio de trabajo). La evaluación de la Curva de Bézier es simple una vez que se tienen definidos los puntos de control, la complicación radica en los criterios a aplicar para definir estos puntos. Como guía general, deben ser definidos en el espacio libre, lo cual garantiza que la curva de desplazamiento se mantendrá sin colisiones con los obstáculos, ya que esta siempre permanece dentro del polígono característico definido por los puntos de control. Una curva relativamente simple es la de tercer grado, con la cual es posible cumplir los requisitos de continuidad en posición, orientación y curvatura, la cual puede ser realizada por un robot como el previsto para este trabajo.

Para generar la curva, cada punto de control es evaluado en un polinomio en términos de un parámetro independiente u ($0 \leq u \leq 1$). La curva es descrita por la ecuación:

$$\mathbf{P}(u) = \sum_{i=0}^m \mathbf{p}_i B_{i,m}(u) \quad (1)$$

donde $B_{i,m}$ son las funciones de Bernstein¹⁸. Considerando la curva de tercer grado mencionada, las funciones de ponderación de Bernstein, $B_{i,m}(u)$, son:

$$B_{0,3} = (1-u)^3 = 1 - 3u + 3u^2 - u^3 \quad (2)$$

$$B_{1,3} = 3u(1-u)^2 = 3u - 6u^2 + 3u^3 \quad (3)$$

$$B_{2,3} = 3u^2(1-u) = 3u^2 - 3u^3 \quad (4)$$

$$B_{3,3} = u^3 \quad (5)$$

Incluyendo las ecuaciones (2)-(5) en la ecuación (1), y reagrupando términos con respecto a las potencias de u , se llega a:

$$P(u) = p_0 + 3u(p_1 - p_0) + 3u^2(p_0 - 2p_1 + p_2) + u^3(-p_0 + 3p_1 - 3p_2 + p_3) \quad (6)$$

La evaluación de este polinomio en u desde 0 a 1.0 genera la curva de desplazamiento. En $u=0$, la curva coincide con el punto inicial del robot, donde éste tiene la orientación definida por P_0P_1 , en $u=1.0$, el robot llega al punto deseado con la orientación definida por P_2P_3 .

La información de la orientación provista por el GPS es reforzada con la brindada por la brújula electrónica. Una vez fusionados estos datos, considerando el punto definido por el operador de PR, se puede realizar el desplazamiento empleando el polinomio de la curva de Bézier definido en la ecuación (6). La figura 3 ilustra el robot TRASMAR, el TRASMAR 2 y una curva de ejemplo del proceso aquí descrito. El Robot TRASMAR fue construido en el ININ para el transporte de materiales radiactivos desde el reactor hasta las celdas de producción de radioisótopos, y el TRASMAR 2 para pruebas de navegación en exteriores. El generador de curvas de Bézier fue desarrollado en Java para controlar el TRASMAR 2.

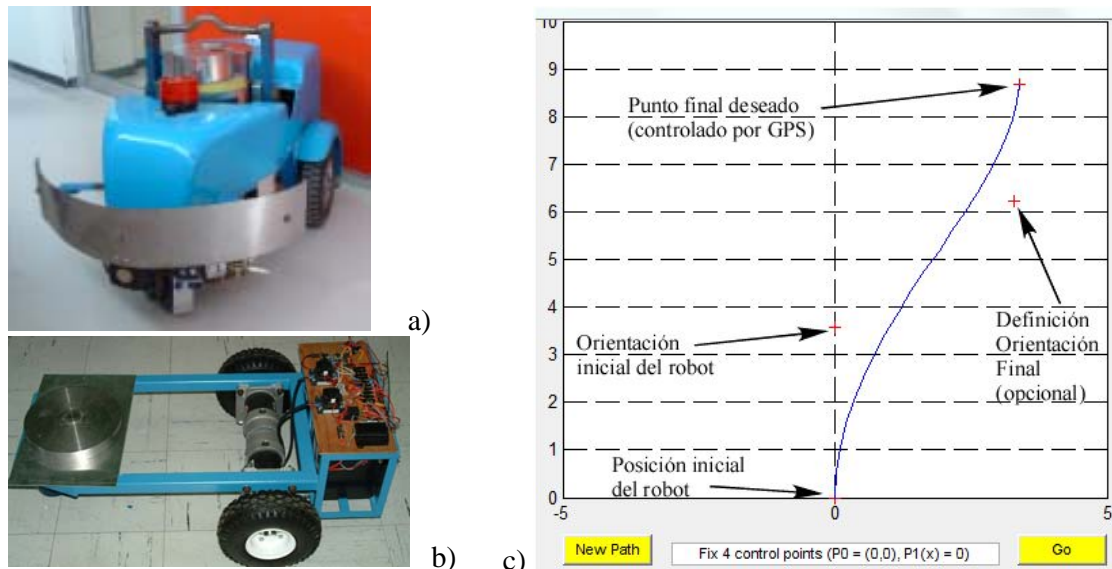


Figura 3. a) Robot TRASMAR. b) Robot TRASMAR 2. c) Curva de Bézier generada en el programa desarrollado en Java.

3.5. Refinamiento de la Localización de la Fuente empleando Datos de Radiación

Una vez que el robot ha llegado al sitio donde se desea inspeccionar, la localización fina de la fuente radiactiva se lleva a cabo empleando un detector de radiación. El principal interés del sistema propuesto es detectar radiación gamma, que con una energía de 1 MeV el rango es del orden de los 100 m. Los detectores gaseosos tienen una baja eficiencia, por lo cual se seleccionó un detector centelleador, que con un tamaño normal, tiene una densidad más alta que brinda una mayor probabilidad de absorción¹⁹.

Una vez ubicado el robot en la zona que se desea explorar, un mapeo de esta de la manera como es efectuado en una demostración de un equipo SAM 940 de BNC²⁰ (Berkeley Nucleonics Corporation) puede ser hecho de manera sencilla empleando el robot provisto del GPS.

El detector de radiación se montará sobre el robot en un mecanismo capaz de brindar movimientos rotacionales en orientación y elevación (pan & tilt). Esto permite con mayor facilidad detectar la dirección en la cual se puede encontrar la fuente sin necesidad de mover todo el robot. Esto es posible gracias a la direccionalidad de detección que puede tener el detector utilizado. Aún si esta no fuera suficiente, es posible realizar una colimación del detector con la finalidad de mejorar esta característica. El algoritmo a emplear ya ha sido desarrollado y su funcionamiento ha sido comprobado positivamente²¹. En el caso de estas pruebas, un robot Khepera provisto de 6 sensores de proximidad infrarrojos fue empleado. Usando el arreglo de los 6 sensores de proximidad que se encuentran en la parte frontal del robot Khepera, fue posible implantar un algoritmo computacional basado en una red neuronal de Kohonen tipo no-supervisada, cuya función es detectar la posición angular de una fuente de luz infrarroja y el eje relativo del robot Khepera. El trabajo de Malmstrom y Munday²² se tomó como base para el desarrollo de esta etapa. El algoritmo de navegación desarrollado basado en la percepción de una fuente de energía, será empleado en el proyecto aquí propuesto, con algunas modificaciones necesarias debido a la diferencia entre los sensores allí usados y los que serán empleados en el proyecto actual. Esto es debido a que aquí será empleado un solo detector de la fuente (en este caso radiactiva), montado en un mecanismo giratorio. De esta manera, la dirección de la fuente en el espacio de trabajo será determinada con respecto a la dirección actual del robot, la cual será determinada mediante la información brindada por el GPS, complementada con la dada por la brújula electrónica y el mecanismo rotativo sobre el que se montará el detector.

3.6. Resultados Experimentales

En la actualidad algunas pruebas han sido efectuadas para probar el funcionamiento del GPS en el sistema de navegación autónoma que se trata de implementar. Mediciones se han realizado encontrando que la ubicación física del sensor se ha podido localizar con incertidumbres que están dentro de un radio de aproximadamente 2 metros, comparando sus lecturas con la ubicación determinada empleando la herramienta de vista satelital de Google Maps²³. Algunas pruebas de desplazamiento aplicando las Curvas de Bézier han sido realizadas sobre TRASMAR 2, al no contar en la actualidad con un robot a orugas como el que se planea emplear en el proyecto final. Próximamente será emplazado a bordo del robot el receptor GPS para iniciar las pruebas de desplazamiento autónomo.

4. CONCLUSIONES

El método de navegación propuesto se muestra práctico para la aplicación que se quiere implantar. El conjunto de sensores previsto parece ser suficiente para lograr la navegación autónoma que lleve el robot al lugar posible definido por un operador y finalmente, mediante el empleo del detector de radiación, a la fuente radiactiva. Gracias a la comunicación inalámbrica a todo momento entre el robot y la consola de operación, el operador de PR

conocerá a todo momento la información sobre la tasa de radiación existente en el ambiente en exploración.

5. REFERENCIAS

1. Jamshidi M., Eicker P. J., *Robotics and Remote Systems for Hazardous Environments*, Prentice-Hall International (1993).
2. Borenstein, J., Everett, H.R., y Feng, L., *Where Am I, Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning*, The University of Michigan (1996).
3. Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., *Introduction to Autonomous Mobile Robots*, The MIT Press (2004).
4. GPS PMB-648 Datasheet, <https://www.sparkfun.com/products>
5. RXM-GPS-SR, Datasheet, <https://www.sparkfun.com/products>
6. Cruz, A., Chávez, M., y Cardoso, V., *La Jornada*, Miércoles 4 de Dic. de 2013.
7. Chávez, S., Salinas, J., Cruz, A., Cardoso, V., Castillo G., y Agencias, *La Jornada*, Jueves 5 de Dic. de 2013.
8. Jiménez, C., “Encuentran cobalto radiactivo robado... fuera de contenedor”, *La Razón*, Jueves 5 de Dic. de 2013.
9. Fogle R. F., “Robots and Teleoperators in Radioactive Applications”, *Robotics and Remote Systems for Hazardous Environments*, Eds. Mo Jamshidi & Patrick J. Eicker, Prentice Hall, 1993.
10. <http://almadeherrero.blogspot.mx/2011/04/los-robots-en-la-central-de-chernobyl.html>
11. “Unmanned Robots Protect Plant Workers, Play Pivotal Role in Fukushima Daiichi’s Recovery Efforts”, Nuclear Energy Institute, <http://safetyfirst.nei.org/japan/unmanned-robots-protect-plant-workers-play-pivotal-role-in-fukushima-daiichis-recovery-efforts/>
12. XIAO-MING, J., RU-YU, F., WEI, C., GUI-ZHEN, W., DONG-SHENG, L., SHAN-CHAO, Y., XIAO-YAN, B., “Experimental Research on Transient Ionizing Radiation Effects of CMOS Microcontroller”, http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-YZJS201012016.htm.
13. XBee-PRO 900HP and XSC RF Modules, User Manual, http://ftp1.digi.com/support/documentation/90002173_P.pdf.
14. Choset H., Lynch K.M., Hutchinson S., Kantor G., Burgard W., Kavraki L. E., Thrun S., *Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations*, MIT Press, 2005.
15. Ollero A., *Robótica: Manipuladores y Robots Móviles*, Alfaomega-Marcombo, 2001.
16. Segovia, A., Rombaut, M., “Path Planning from a Spot Image for a Mobile Robot”, *IEEE Intelligent Vehicles '93*, Tokyo, Japan, 277-282, (1993).
17. Le Fort-Piat, N., Collin, I., Meizel, D., “Planning robust displacement missions by means of robot-tasks and local maps”, *Robotics and Autonomous Systems*, **20**(1), pp. 99-114, (1997).
18. Bézier, P., *Courbes et Surfaces*, Ed. Hermes, Paris, (1986).
19. http://nuclear.fis.ucm.es/webgrupo/labo/Lab_Detector_Centelleador.html
20. BNC SAM 940 Isotope Identifier, <https://www.youtube.com/watch?v=FblypiiEbgY>
21. Jorge S. Benítez Read, Erick Rojas Ramírez, Tonatiuh Rivero Gutiérrez; “Sistema de monitoreo autónomo basado en el robot móvil Khepera”; Memoria AMCA 2007, pp. AMCA20 01-06; Congreso Nacional 2007 de la Asociación de México de Control Automático; Monterrey, Nuevo León, México; 24 al 26 OCT. (2007).
22. Malmstrom, K., and Munday L., *A Simple Robust Robotic Vision System Using Kohonen Feature Mapping*; Proceedings of the 2nd IEEE Australia and New Zealand Conference on Intelligent Information System, pp. 135-139, 1994.
23. Google Maps, <https://www.google.com.mx/maps>