

RODESMIN. ROBOT MÓVIL TREPADOR PARA INSPECCIÓN DE PAREDES



SERGIO SEGOVIA GONZÁLEZ

Ingeniero de Ingeniería Mecánica e Industrial
ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS



ÁNGEL RAMOS GALLARDO

Ingeniero de Ingeniería Mecánica e Industrial
ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS



LUIS FERNANDO ELÍAS MARTÍN

Ingeniero de Ingeniería Mecánica e Industrial
ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS

INTRODUCCIÓN

Actualmente la medida de los niveles de radiactividad en instalaciones en proceso de desmantelamiento es realizada por personal técnico. Para esta medida, en particular para las paredes verticales, es necesario en muchos casos la instalación de andamios, o bien que los operarios se descuelguen con arneses, quedando expuesto el personal a la posible radiación presente en todo momento.

Con la intención de reducir los tiempos de ejecución de estas tareas de inspección, reduciendo así la dosis recibida por el personal expuesto, y a la vez incrementar la precisión y fiabilidad de las medidas realizadas, en ENUSA se ha propuesto el uso de tecnología robótica.

Una de las opciones desarrolladas por la robótica que se puede emplear en estos casos es la robótica móvil, conformada por dispositivos que se pueden desplazar y mover de un lugar a otro. Los robots móviles pueden ser autónomos, o controlados de forma manual, y realizar una amplia variedad de tareas, como la exploración de entornos, la realización de tareas de mantenimiento o reparación, o, como el caso que nos ocupa, llevar a cabo tareas de inspección radiológica.

Concretamente, en ENUSA, se ha desarrollado un robot móvil tipo “trepador”, capaz de moverse y ascender por superficies verticales o inclinadas, para realizar las inspecciones radiológicas en paramentos de edificios, estructuras o espacios confinados, en proceso de desmantelamiento. Se ha diseñado con la capacidad de portar un detector de radiación y recopilar datos espectrométricos en cada punto donde se encuentre, pudiendo generar un

mapa de la emisión radiactiva de la superficie inspeccionada, mostrando los niveles de radiación obtenidos con una gama de colores.

ESTADO DEL ARTE Robótica móvil

Los robots móviles son robots que pueden moverse de un lugar a otro de forma autónoma, es decir, sin la ayuda de operadores en remoto. A diferencia de la mayoría de los robots industriales, que solo pueden moverse en un espacio de trabajo específico, tienen la característica especial de moverse libremente dentro de un espacio de trabajo, predefinido o no, para lograr los objetivos deseados.

Esta capacidad de movilidad los hace adecuados para una amplia gama de aplicaciones, tanto en entornos estructurados, como no estructurados, pudiendo sustituir a los humanos en muchos campos. Entre sus aplicaciones se incluyen vigilancia, exploración, operaciones de rescate de emergencia, reconocimiento, automatización industrial, o intervención en entornos extremos.

Por otro lado, un robot es autónomo cuando el propio robot tiene la capacidad de determinar las acciones que debe ejecutar para realizar una tarea, a partir de los datos de un sistema de percepción de su entorno y de los objetos que pueda manejar. Además, se requiere de un sistema de control para coordinar todos los subsistemas que componen el robot.

Los fundamentos de la robótica móvil se agrupan en cuatro apartados interrelacionados: locomoción, percepción, control, y navegación.

- La locomoción hace referencia a la comprensión de la cinemática, la dinámica del sistema mecánico del robot que hace posible su desplazamiento en el entorno.
- La percepción involucra las áreas de análisis de señales y de otros campos especializados como la visión por computadora y las tecnologías de sensores.
- El control se encarga de analizar los datos de entrada de los sensores y tomar las acciones correspondientes para lograr los objetivos del robot.
- La navegación requiere conocimientos de algoritmos de planificación, teoría de la información e inteligencia artificial.

Es fundamental en un robot móvil contemplar todas estas áreas y campos tecnológicos para su correcto funcionamiento. Todos estos sistemas tienen que estar integrados por una unidad de control, para que el trabajo o misión del robot móvil se realice de forma coherente y eficaz.

Robots Trepadores (Climbing Robots)

Los robots móviles terrestres se dividen en robots móviles con ruedas (WMR) y robots móviles con patas (LMR). También se incluyen dentro de la tipología de robots móviles los vehículos aéreos no tripulados (UAV) y los vehículos submarinos autónomos (AUV) [1].

El robot trepador es un tipo de robot móvil terrestre, especialmente diseñado para desplazarse por superficies verticales o de gran inclinación, que se puede utilizar en aplicaciones muy variadas, como, por ejemplo, mantenimiento e inspección. Este sistema es apropiado cuando es necesario obtener datos en lugares donde el acceso directo por parte de un operador humano es muy costoso, debido a la necesidad de andamios, o muy peligroso, debido a la presencia de un ambiente hostil [1].

Un robot trepador de paredes no solo debe ser liviano para reducir las fuerzas de adherencia necesarias para mantenerse adherido a la superficie en la que se encuentre, sino también tener una gran carga útil para poder llevar instrumentos durante la navegación.

Los dos problemas principales en el diseño de robots trepadores de pared son su locomoción y adhesión. Con respecto al tipo de locomoción, lo más habitual es considerar los tres tipos siguientes:

- Mediante un sistema oruga: aunque un robot con este sistema es capaz de moverse relativamente más rápido, no es adecuado para su aplicación en entornos difíciles.
- Mediante ruedas: se pueden alcanzar altas velocidades. El principal inconveniente de algunos de los robots con ruedas que utilizan la fuerza de succión para adherirse a la superficie, es que necesitan mantener un espacio de aire entre la superficie donde se mueven y la base del robot. Esto crea problemas debido a la pérdida de presión, o por la fricción con la superficie.
- Mediante patas: un robot que se desplace mediante patas hace frente fácilmente a los obstáculos que se encuentran en el entorno, mientras que generalmente su velocidad es menor y requiere sistemas de control complejos.

Según el método de adhesión, estos robots se clasifican generalmente en tres grupos:

- Adherencia magnética: implica el uso de actuadores pesados y se usa solo para superficies ferromagnéticas.
- Mediante vacío o ventosas: el sistema es ligero y fácil de controlar, aunque presenta el problema del suministro de aire comprimido. Una alternativa, a costa de aumentar el peso, es la incorporación de una bomba de vacío en el propio robot.
- Por propulsión: se basa en el principio de vacío, al igual que en el tipo de agarre por ventosa, con la diferencia, además de la estructura mecánica, de que la zona de bajas presiones es creada con una turbina eléctrica.

RODESMIN (RObot para DESmantelamiento e INspecciones)

Con el propósito indicado en la Introducción, en ENUSA se ha diseñado un robot móvil, con tipo de locomoción mediante ruedas en configuración diferencial. Pertenece a la familia de robots trepadores (*climbing*), adhiriéndose a la superficie por propulsión, mediante el vacío realizado con una turbina eléctrica (Figura 1).

Locomoción

La forma de llevar a cabo el movimiento es mediante una configuración diferencial (Figura 2), con dos ruedas motrices independientes en la parte trasera/delantera, y una rueda omnidireccional sin motor en la parte delantera/trasera [1], [3].

Es el accionamiento mecánico más simple ya que no necesita la rotación de un eje accionado. Si las ruedas giran



Figura 1. RODESMIN.

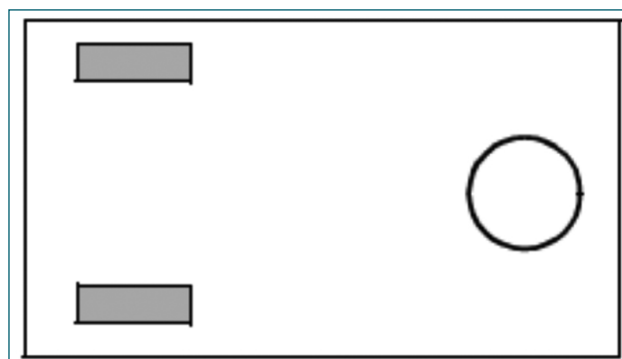


Figura 2. Robot móvil – Locomoción por ruedas – Configuración Diferencial.

a la misma velocidad, el robot se mueve en línea recta hacia adelante o hacia atrás. Si una rueda gira más rápido que la otra, el robot sigue una trayectoria curva a lo largo del arco de un círculo instantáneo [3]. Si ambas ruedas giran a la misma velocidad en direcciones opuestas, el robot gira alrededor del punto medio de las dos ruedas motrices. Los modos de locomoción anteriores se ilustran en la Figura 3.

Adhesión

Para adherirse a paredes o techos, el robot dispone de una turbina, la cual crea el vacío necesario bajo su base para adherir el robot a la superficie. El proceso de diseño y construcción del conjunto se ha optimizado mediante el desarrollo de un modelo de dinámica de fluidos por computadora y desde un punto de vista estructural se ha realizado un análisis de elementos finitos (FEA) para visualizar la deformación esperada.

El procedimiento de modelado y optimización se ha realizado utilizando dos prototipos: un prototipo de banco de pruebas y un prototipo de robot embarcado. El diseño del sistema de succión para ambos prototipos consta de una turbina sujeta a una estructura, en el primer caso de metacrilato (Figura 4 a) y en el segundo caso de fibra de carbono (Figura 4 b).

Se desarrollaron modelos analíticos y numéricos para predecir el comportamiento del sistema para diferentes configuraciones. Posteriormente, se analizó el sistema con diferentes valores de parámetros geométricos para determinar la configuración de mejor rendimiento en función del valor de la relación de vacío.

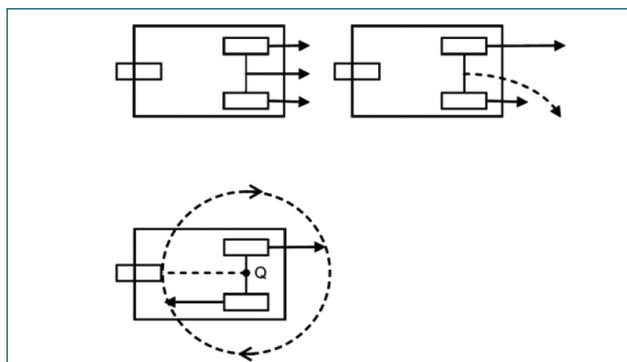


Figura 3. Robot móvil – Locomoción por ruedas – Configuración Diferencial – Movimientos.

Navegación

El estudio de la navegación se centra en el proceso de control y seguimiento del movimiento de un vehículo de una posición a otra. En un sentido más amplio, la navegación también puede referirse al estudio de la obtención de la posición y la dirección del movimiento [4]. En el campo de la navegación se incluyen la navegación marina, terrestre, aeronáutica y espacial.

La odometría es el proceso de cálculo de la posición a lo largo del tiempo, mediante el uso de datos obtenidos de sensores de movimiento. Este proceso se utiliza en robótica para estimar la posición del robot en relación con una ubicación inicial.

Para llevar a cabo estos cálculos de la estimación de la posición del robot en un mapa del lugar en que se encuentra, se necesitan sensores de odometría y navegación. Estos sensores deben ser capaces de detectar las variaciones en el terreno por el que se está moviendo el robot. En el caso del suelo, por ejemplo, la presencia de inclinaciones o salientes, así como de paredes u obstáculos que pueda encontrarse en su camino. Los sensores más relevantes para estas funcionalidades son cámaras de visión, sistemas láser, sensores de inercia IMU, y GPS (*Global Positioning System*). Una IMU (*Inertial Measurement Unit*) es capaz de calcular la posición y el movimiento del dispositivo con 6 grados de libertad a través de la unión de un acelerómetro y un giroscopio.

La odometría, junto con la navegación, son la base del método SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*) [4], método que permite a un vehículo autónomo construir un mapa de su entorno para localizarse en él al mismo tiempo. Existen numerosas técnicas de SLAM actualmente, siendo la principal diferencia entre ellas el sensor utilizado. Dos de los métodos más usados son el VSLAM [5], basado en usar una cámara de profundidad, y el LiDAR SLAM [6].

En el prototipo que está desarrollando ENUSA, se emplea esta última técnica de LiDAR SLAM. Con la técnica LiDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*) se generan nubes de puntos con las señales obtenidas con un haz láser pulsado y un sensor láser, y permite conocer la distancia que existe entre el sensor y una superficie u objeto. Cuando el láser incide sobre un objeto, es reflejado y llega a la posición donde está situado el sensor láser, calculándose la distancia entre el sensor y el objeto o superficie a partir del tiempo transcurrido entre la emisión del láser y la recepción.

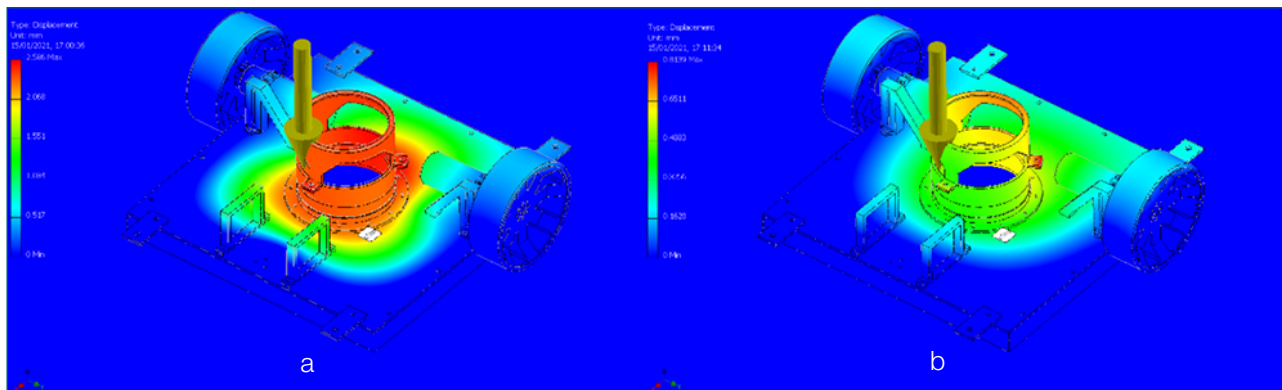


Figura 4. FEA prototipo de banco de pruebas (a) y de prototipo de robot embarcado (b)

ción del haz reflejado, obteniendo gran precisión y un error reducido en la determinación de distancias.

Los valores de salida del sensor LiDAR [7] son puntos en dos o tres dimensiones. Estas nubes de puntos son de alta precisión, por lo que son altamente eficaces a la hora de elaborar mapas donde la localización del vehículo se hace secuencialmente, calculando el movimiento del vehículo y ubicando los puntos en el mapa en base a este desplazamiento (Figura 5).

En ocasiones, estas nubes de puntos son poco densas, sobre todo cuando el robot se encuentra en espacios con pocos obstáculos, donde es más fácil que el vehículo se desoriente debido a la dificultad de alinear las nubes de puntos que genera el LiDAR. Este método SLAM también tiene el problema de que requiere una alta velocidad de computación, por lo que es necesario optimizar los procesos para una mayor velocidad de respuesta.

Debido a la existencia de estos inconvenientes, los sistemas LiDAR SLAM suelen incorporar una combinación de sistemas de medición, como los datos de una IMU o un GPS, o incluso incorporar odometría en las ruedas del robot. Por este motivo, se quiere implementar en el futuro un sistema VSLAM en el prototipo que se está desarrollando, incorpo-

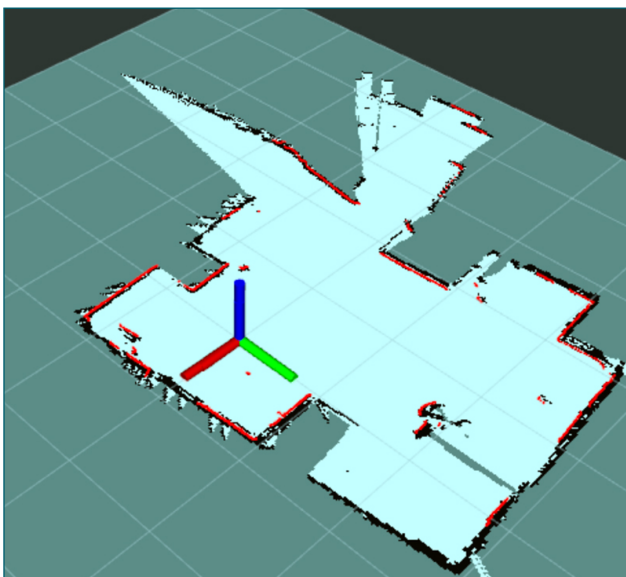


Figura 5. Mapa de posicionamiento del robot mediante sistema LiDAR.

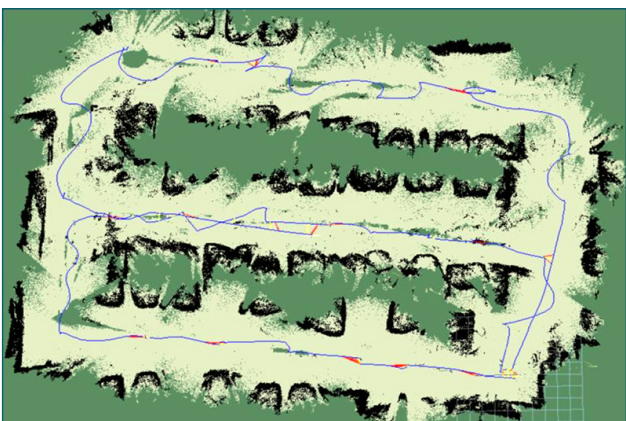


Figura 6. Mapa de posicionamiento del robot mediante VSLAM para evitar obstáculos.

rando una cámara de profundidad [8] encargada de calcular la distancia y posición de los objetos, y una cámara de seguimiento que incluye una unidad de medición inercial [9] (Figura 6).

Caracterización radiológica

El robot se ha diseñado para que pueda portar un detector de radiación con el que se pueda hacer un análisis espectroscópico de la radiación gamma emitida por la superficie por la que se desplace, de tal forma que se puedan identificar los principales radioisótopos que se encuentren presentes. Para facilitar la visualización en las tareas de desmantelamiento, el robot llevará integrado un *software* que permita identificar los puntos por los que ha pasado, con un código de color según el nivel de radiación registrado. Para esto se enlazará la información de la posición que proporciona el sistema láser con el registro del detector en cuentas por segundo, pudiendo además seleccionarse la región espectral de interés para poder visualizar la posible presencia de radioisótopos determinados (Figura 7).

Para llevar a cabo esta tarea, el robot dispondrá de tres modos de funcionamiento:

- Manual: el robot es dirigido por un operario para situarlo en la posición de interés respecto al origen, inicio del movimiento, y realizar la medida correspondiente.
- Puntual: el robot se desplaza hasta un punto específico, introducido por el operario, dentro de los límites de la pared. Una vez situado sobre este punto permanece estático durante un tiempo determinado hasta que el detector registra un espectro de la radiación presente. Este modo permite conocer la radiación emitida por un punto de interés de forma más precisa.
- Barrido o trayectoria definida: el robot parte del origen una vez situado en la pared objeto de la medición. A continuación, el robot empieza a tomar medidas mientras se va desplazando a lo largo y ancho de la pared. Este método permite tomar una medida de la radiación general permitiendo detectar las zonas de mayor contaminación de forma rápida.

CONCLUSIONES

La implementación de tareas de caracterización radiológica mediante el uso de medios más automatizados supone en primer lugar, un aumento en la seguridad del operario y

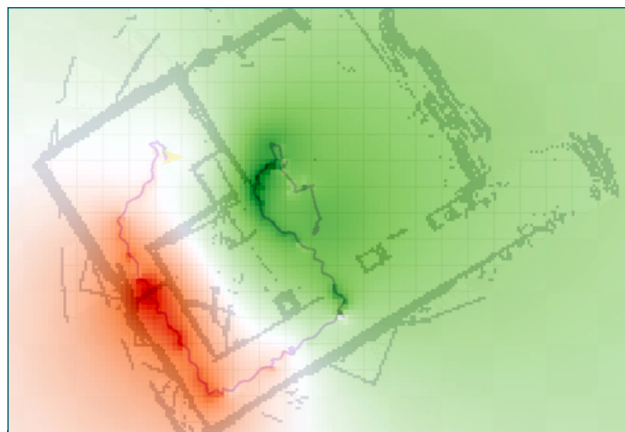


Figura 7. Mapa de calor de caracterización radiológica.

menos tiempo expuesto a la radiación sin la necesidad de acceder a lugares de difícil acceso con arneses, andamios u otro tipo de utensilios.

Por otro lado, también garantiza un trabajo más eficaz y eficiente. Un control en la distancia del detector, medidas en lugares de difícil acceso, menor tiempo de ejecución, ahorro de costes, así como la obtención y tratamiento de datos a tiempo real.

ENUSA se encuentra actualmente desarrollando herramientas automatizadas para la caracterización radiológica, especialmente útiles en tareas de desmantelamiento, como el robot trepador presentado en este artículo.

Se ha conseguido un robot móvil capaz de adherirse a superficies con diferentes inclinaciones, empleando la técnica de vacío mediante una turbina eléctrica, pudiéndose desplazar por estas superficies mediante el empleo de ruedas conductoras. Además es capaz de portar un detector de radiación para realizar caracterizaciones radiológicas de manera automática.

Actualmente, se encuentra en una fase avanzada de prototipado, con pruebas en entornos reales, en las que se lleva al robot a sus límites para conocer con mayor precisión sus capacidades.

A continuación, se rediseñará para que pueda portar otros tipos de detectores, y se desarrollará el procesado de datos en tiempo real, así como el posprocesado

Desde el punto de vista de control, se le quiere dotar de mayor autonomía para realizar las tareas, como puede ser la capacidad de eludir posibles obstáculos en su trayectoria de forma automática.

Con todo ello, ENUSA espera disponer de un dispositivo robótico especializado para realizar caracterizaciones radiológicas en labores de desmantelamiento.

REFERENCIAS

- [1]. A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. Francisco Rubio, Francisco Valero and Carlos Llopis-Albert.
- [2]. Introduction to Autonomous Mobile Robots Roland Siegwart and Illah R. Nourbakhsh A Bradford.
- [3]. Introduction to Mobile Robot Control. Spyros G. Tzafestas
- [4]. MathWorks, "What is SLAM? 3 things you need to know". En línea: <https://uk.mathworks.com/discovery/slam.html>
- [5]. Association for Advancing Automation, "What is Visual SLAM Technology and What is it Used For?". Vision Online Marketing Team, 05/15/2018. En línea: <https://www.automate.org/blogs/what-is-visual-slam-technology-and-what-is-it-used-for>
- [6]. Universal Laser Systems, "The Fundamentals of Laser Technology". En línea: <https://www.ulsinc.com/learn>
- [7]. "What is lidar?", National Ocean Service. En línea: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/lidar.html>
- [8]. Intel Realsense, "Beginner's Guide to Depth (Updated)", July 15, 2019. En línea: <https://www.intelrealsense.com/beginners-guide-to-depth/>
- [9]. "IMU Sensor Working and its applications", ElProCus. En línea: <https://www.elprocus.com/imu-sensor-working-applications/>