

Plataforma Robótica Para Tareas de Reconstrucción Tridimensional de Entornos Exteriores

Jaime Pulido Fentanes ^{a,*}, Eduardo Zalama ^b, Jaime Gómez García-Bermejo ^b

^a *Fundación CARTIF, Parque Tecnológico de Boecillo, 47151 Valladolid, España*

^b *Instituto Tecnologías de la Producción, Universidad de Valladolid, Paseo del Cauce 59, 47011 Valladolid, España*

Resumen

Este artículo presenta los resultados obtenidos en el diseño e implementación de una plataforma robótica todoterreno para la investigación y el desarrollo de aplicaciones de robótica de servicios en entornos exteriores, con especial énfasis en las tareas de reconstrucción tridimensional del entorno. En el documento se describe la estructura mecánica del robot, su arquitectura hardware-software y de comunicaciones y los sistemas perceptivos embarcados. Finalmente, como aportación adicional se presenta un algoritmo diseñado específicamente para llevar a cabo la reconstrucción tridimensional automática y eficiente del entorno, que opera sin necesidad de información previa sobre el mismo. Los resultados avalan la funcionalidad tanto de la plataforma robótica en sí, como de los algoritmos de adquisición y alineación de la información tridimensional, así como de selección automática de las mejores posiciones de escaneo.

Palabras Clave:

Robot Móvil, Reconstrucción Tridimensional, Exploración.

1. Introducción

El modelado tridimensional de entornos de exterior está cobrando una importancia creciente, debido tanto a la aparición de nuevos medios de soporte y visualización de la información tridimensional, como al interés que presenta en campos como urbanismo, obras públicas, arquitectura inversa o arqueología, entre otros.

Por lo general la reconstrucción completa de un escenario exige su medición desde distintos puntos de vista. Sin embargo, los sistemas de captura de datos tridimensionales empleados habitualmente son estacionarios. Esto conlleva que un operario debe seleccionar una serie de ubicaciones en base a su experiencia y a la tipología del entorno, y trasladar el equipo de medición secuencialmente a lo largo de ellas (tanto el propio escáner como el ordenador asociado, trípode, baterías, GPS etc.). Esto se traduce en un proceso largo y costoso, de una productividad reducida.

Autores como (Blaer y Allen 2007) y (Nüchter, Lingemann y Hertzberg 2006) han planteado el uso de robots móviles para facilitar el proceso de reconstrucción de entornos exteriores. De esta manera se puede sacar provecho de los recursos que ofrece el robot como movilidad, energía,

localización y sistema informático. Además, los entornos exteriores representan un ámbito de aplicación paradigmático para la robótica de servicios por su interés práctico, incluso cuando los humanos están incluidos en el lazo de control (Birk y Kenn 2003). De hecho encontramos aplicaciones en las que robots teleoperados o semi-autónomos tienen una gran utilidad, por ejemplo en tareas de intervención y rescate en situaciones de riesgo (Amano 2002). Adicionalmente, problemas como la localización y construcción de mapas simultáneos (SLAM) resultan menos críticos en exteriores gracias a los sistemas de posicionamiento global tipo GPS.

En este contexto general, el presente trabajo aborda el problema del modelado tridimensional de entornos de exterior por medio de un robot móvil, equipado con un escáner laser y una serie de sensores que proveen información adicional sobre el entorno. En la actualidad existen pocas plataformas robóticas suficientemente flexibles para la realización de tareas en este tipo de entornos, por lo cual se ha optado por utilizar una plataforma robótica de desarrollo propio.

En el presente artículo se describe esta plataforma y se aborda específicamente su uso para la reconstrucción automática y eficiente de entornos exteriores. Sin embargo el robot es lo suficientemente flexible para ser utilizado en la

investigación y el desarrollo de nuevas aplicaciones en robótica de servicios. Algunas de estas posibles aplicaciones, de gran trascendencia práctica, son por ejemplo las misiones de búsqueda y rescate en situaciones de riesgo para los humanos, tales como incendios, derrumbes, el trabajo en presencia de sustancias peligrosas, escapes químicos o accidentes nucleares.

El artículo está organizado tal como se describe a continuación. En la sección 2 se resumen algunos trabajos relacionados. La sección 3 describe las características principales de la plataforma robótica, tanto desde el punto de vista hardware como de control, así como sus sistemas perceptivos y de comunicaciones. La reconstrucción tridimensional del entorno, incluyendo la obtención automática de mapas de navegabilidad del mismo, se aborda en la sección 4. En la sección 5 se describe la estrategia propuesta para la exploración autónoma del entorno por parte del robot. Finalmente, en la sección 6 se muestran algunos resultados y en la sección 7 se resumen las conclusiones.

2. Trabajos Relacionados

En la actualidad es posible encontrar diversos proyectos orientados a la creación de modelos tridimensionales de grandes entornos exteriores. Muchos de estos proyectos están orientados a la generación de modelos a gran escala de ciudades. Proyectos como “3D city” (Früh y Zakhor 2003), “City Scanning Project” (Teller 1997), “4D Cities” (Dellaert 2005) o Google Street View (Williams 2010) son ampliamente conocidos. Sin embargo las plataformas de captura de datos empleadas son equipos de medición que simplemente, recogen la información tridimensional del entorno conducidos por humanos, y toda la información es procesada a posteriori.

En el proyecto Kurt 3D (Nüchter, Lingemann, y otros 2007) se ha desarrollado una plataforma de exteriores con un escáner de tres dimensiones basado en un sistema *pan-tilt* y un escáner laser lineal, sobre una plataforma móvil. El objetivo de este proyecto es el desarrollo de técnicas para la localización y mapeado simultáneo (SLAM) en tres dimensiones usando un algoritmo ICP (Iterative Closest Point) (Besl y Mckay 1992) para corregir la posición del robot.

El proyecto AVENUE (Blair y Allen 2009) se ha propuesto el desarrollo de un sistema para la reconstrucción tridimensional de entornos urbanos. Para ello se ha implementado un robot dotado de un escáner laser tipo Cyrax y un algoritmo de alineación de datos basado en características. Además en este proyecto se ha desarrollado un algoritmo de planificación de vistas basado en un mapa 2D del entorno.

Otro proyecto destacable es el “Smarter Team” (Jensen, y otros 2005) y (Pfaff, y otros 2007), orientado a la construcción de un coche autónomo para la reconstrucción de entornos urbanos. En este caso el vehículo se encarga de la navegación y reconstrucción del entorno, aunque la alineación de datos se realiza fuera de línea.

Finalmente, en esta misma línea cabe destacar los distintos proyectos desarrollados para participar en el *DARPA Challenge*, los cuales han dispuesto complejos y completos sistemas de navegación y captura de información del terreno sobre vehículos comerciales que han de cumplir autónomamente con una serie de misiones en diferentes

entornos. En estos casos la generación de un modelo tridimensional no es importante y los datos 3D son utilizados únicamente para percibir el entorno.

El presente trabajo tiene como objetivo la reconstrucción automática de entornos de exterior desde una perspectiva de solución completa del problema. En una primera parte se describe el desarrollo de una plataforma móvil, su sistema perceptivo, su arquitectura y los sistemas de comunicación. La principal contribución de esta primera parte es la integración de sistemas en una arquitectura escalable basada en componentes, y su materialización en una plataforma competitiva en relación a los sistemas de adquisición tridimensional tradicional. En la segunda parte, se describe un algoritmo para la reconstrucción tridimensional del entorno sin necesidad de conocimiento previo del mismo, así como su validación en la plataforma desarrollada.

3. Características de la Plataforma

El desarrollo y construcción del robot aquí presentado (ver Figura 1) puede separarse en dos partes fundamentales. Por un lado se ha construido una plataforma móvil todoterreno versátil, ideada para su utilización en la mayor cantidad posible de aplicaciones robóticas en exteriores. Por otro lado, se ha desarrollado un sistema de medición tridimensional que es un dispositivo independiente y permite la captura de información tridimensional del entorno circundante de forma rápida.



Figura 1: Robot Todoterreno con el sistema de medición tridimensional embarcado.

La combinación de ambos elementos resulta en un sistema que permite realizar mediciones tridimensionales de entornos complejos con un esfuerzo mucho menor que el requerido con los sistemas estacionarios. En las siguientes subsecciones se describen las principales características de este sistema.

3.1. Diseño de la Plataforma Robotizada

Una de las mayores contribuciones técnicas de este trabajo es el diseño y construcción de una plataforma todoterreno que resulta útil tanto para la investigación en el desarrollo de cualquier tipo de tareas, como para la implementación de un sistema robotizado en entornos de trabajo reales.

Con el fin de que la plataforma robotizada cuente con la flexibilidad necesaria para realizar diferentes tipos de misiones en exteriores, se han tenido que considerar dos factores principales.

El primero es el diseño de una mecánica robusta que permita el desplazamiento por todos los distintos tipos de terreno en los que el robot puede llegar a desempeñar misiones.

El segundo y más importantes es el desarrollo de un sistema perceptivo y de comunicaciones que permita un grado de autonomía ajustable en función del tipo de misión. De esta forma el robot puede realizar misiones con diferente nivel de intervención humana.

Estos niveles de autonomía han sido discutidos por distintos autores (Bruemmer, Dudenhoeffer y Marble 2002); (Goodrich, y otros 2001). En concreto, se ha relacionado directamente la autonomía del robot con la realización de las tareas, de forma que algunas de éstas se realizan más eficazmente con un mayor grado de autonomía. La Figura 2 presenta estos niveles de autonomía junto con las tareas para las que presentan más eficacia.

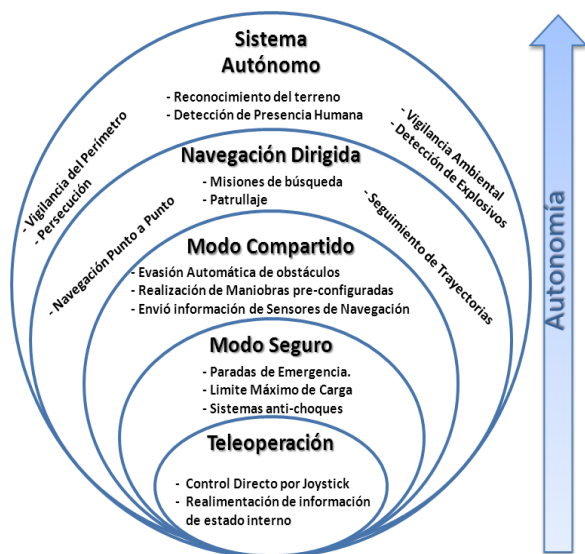


Figura 2: Niveles de Autonomía para un robot móvil

Para que la plataforma pueda alcanzar todos estos grados de autonomía debe contar con un sistema perceptivo completo que le permita navegar por el entorno (ver sección 3.4), además de los dispositivos específicos para cada misión.

Por otro lado, el sistema de comunicaciones (ver sección 3.5) depende directamente del tipo de misión que este desempeñando el robot y de la cantidad de información que debe fluir entre el operador y el robot.

3.2. Características generales de la plataforma móvil

La plataforma tiene unas dimensiones de 104 cm de largo por 85 cm de ancho y posee tracción independiente de 6 ruedas. Esto le permite desplazarse por terrenos rugosos e inestables, así como introducirse en espacios angostos o de difícil accesibilidad y ser transportada en un vehículo furgoneta de pequeño tamaño.

Las ruedas sobresalen del cuerpo del vehículo en ambos extremos, lo que facilita por ejemplo la escalada de obstáculos. Además se ha dotado a los bajos de una protección en plano inclinado con el fin de superar distintos tipos de obstáculos.

Con el fin de lograr una plataforma flexible que se pueda adaptar a las distintas circunstancias previstas para el robot, se ha diseñado un sistema de tracción basado en dos trenes de ruedas situados en los laterales, creando una configuración diferencial. Cada tren puede ser configurado con 2 o 3 ruedas, pues la rueda central es fácilmente desmontable. Las ruedas cuentan con motor eléctrico integrado en la llanta.

La configuración de 4 ruedas es ideal para superficies poco irregulares como calzadas, caminos o suelos lisos. Esta configuración presenta una gran maniobrabilidad pues permite al robot realizar giros sobre sí mismo sin desplazarse de su sitio y sin excesivo rozamiento, lo cual es favorable de cara a la autonomía del vehículo. La configuración con 6 ruedas es aconsejable para suelos más irregulares como superficies empedradas, rugosas y montes. Otra característica relevante es la posibilidad de instalar bandas de tracción (orugas). En esta configuración se utilizan las 3 ruedas de cada módulo, rodeadas por bandas de tracción, y resulta especialmente útil en terrenos de gran inestabilidad como lodo, arena y nieve.

Debido a la multifuncionalidad que se espera del robot, se han instalado dos conectores en los laterales para facilitar la operación adicional de diferentes dispositivos tales como un cabezal de escaneo 3D, un brazo robotizado o cualquier otro elemento destinado a misiones específicas.

3.3. Arquitectura de Control

El sistema de control de la plataforma está dividido en dos niveles de gestión. A bajo nivel se utiliza un microcontrolador tipo dsPIC, encargado de ejecutar las tareas más básicas del robot y de mayor exigencia temporal tales como: el control de velocidad, manejo de situaciones de emergencia (setas de emergencia, batería baja, pérdida de comunicación), recogida de información sobre el estado interno del robot y su transmisión hacia las capas de control de más alto nivel. Este microcontrolador añade gran versatilidad al sistema puesto que permite el uso de la plataforma aún sin un sistema informático (por ejemplo cuando está siendo teleoperado).

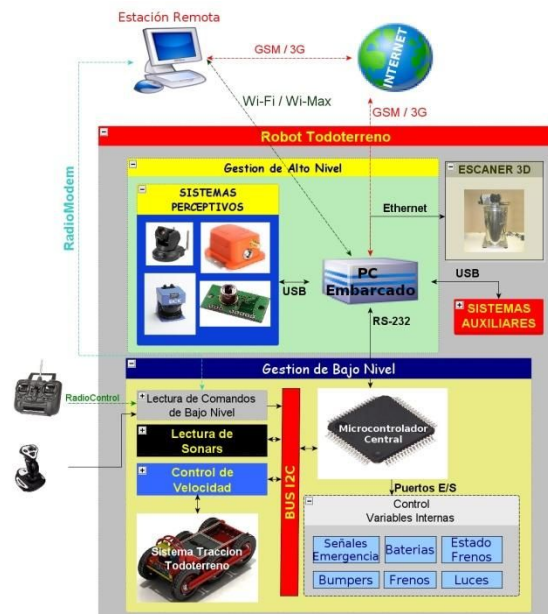


Figura 3: Arquitectura Hardware del Sistema

Igualmente el microcontrolador se encarga de gestionar los lazos de control del robot, verificar fallos en las comunicaciones o retrasos en los procesos y detectar e identificar cualquier emergencia interna para actuar en consecuencia.

Esto se realiza mediante el uso de interrupciones en el microcontrolador, que garantizan una tasa de muestreo exacta para la realización de cada uno de los lazos de control. Además, las comunicaciones y lecturas de sensores se realizan mediante temporizadores independientes de los de los lazos de control garantizando de esta forma la ejecución periódica de cada una de las tareas.

Igualmente el controlador cuenta con un sistema de gestión de conflictos basado en prioridades, de forma que si dos tareas se superponen en el tiempo el microcontrolador realiza primero la más prioritaria y posteriormente realiza las otras tareas pendientes en orden de prioridad. Estos sistemas de control de prioridades que permiten cumplir con los requisitos más estrictos de tiempo real y gestión de conflictos.

Igualmente, como modo a prueba de fallos el microcontrolador cuenta con un sistema de perro guardián que monitoriza la ejecución del programa y lo reinicia al detectar algún fallo. También se cuenta con un hilo que monitoriza las comunicaciones y detiene al robot en caso de fallo. Finalmente el robot cuenta con un mecanismo hardware que activa el freno al no recibir una señal periódica desde el microcontrolador que puede indicar un fallo electrónico.

La Figura 3 muestra la arquitectura hardware del sistema donde se muestran los dispositivos controlados por el sistema de gestión de bajo nivel y por el de alto nivel.

Para las tareas de más alto nivel la plataforma dispone de un ordenador embarcado tipo PC-104 que se encarga de gestionar las cámaras web y la conexión de red del robot, leer los sensores de alto nivel (GPS, IMU, etc.) y ejecutar los algoritmos de localización, exploración y navegación integrados en el sistema.

En este nivel, los módulos software se organizan en capas según su función dentro del sistema (figura 4). Los módulos realizan tareas específicas y son supervisados por un módulo específico de gestión denominado *Central* que verifica la comunicación entre los módulos. Para ello se utilizan las librerías "Inter-Process Communication" (Simmons 2009) que permiten el intercambio de datos entre diferentes módulos que se conectan entre sí mediante un sistema de publicación/suscripción que facilita la comunicación y evita bloqueos mutuos.

La capa de control de dispositivos contiene los módulos que se comunican con los dispositivos de percepción, el microcontrolador del robot, el escáner láser y los dispositivos auxiliares (en caso de haberlos). Estos módulos controlan los datos provenientes de los dispositivos y traducen la información para que los módulos de control del robot y de supervisión y teleoperación puedan hacer uso de ella.

Los módulos de control del robot son los que se encargan de realizar las tareas para las que ha sido programado el sistema (por ejemplo la exploración de un entorno) incluyendo todos los procesos auxiliares que se puedan requerir para la realización de dichas tareas (localización, navegación, etc.).

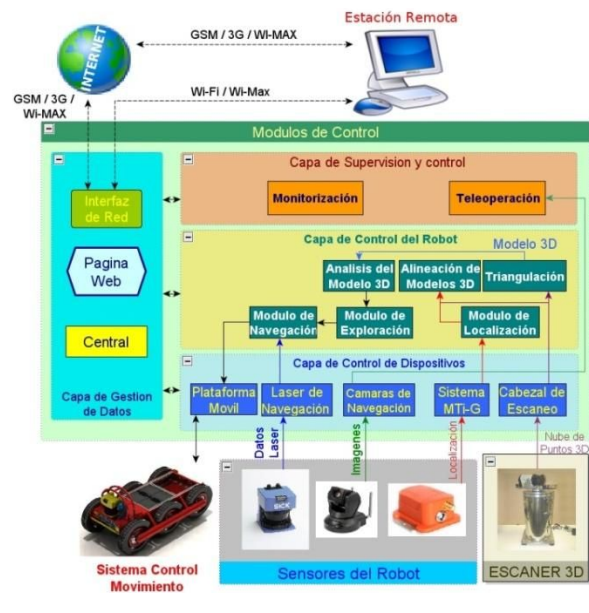


Figura 4: Módulos Software del sistema

Finalmente, la capa de supervisión y control contiene los módulos encargados de recibir las órdenes de un operador humano (cuando exista) y de transmitir la información sobre el estado del robot al dicho operador. La Figura 4 muestra los módulos software utilizados para la exploración de un entorno.

3.4. Sistemas Perceptivos

Los sistemas perceptivos incorporados a la plataforma están orientados a dos tareas principales: la localización del robot y la percepción del entorno.

Para la localización se utiliza como sensor principal un MTi-G de Xsens, el cual es un sistema de sensorización pequeño, liviano y de muy bajo consumo, ideal para la navegación y control de sistemas no tripulados. Está compuesto por una unidad de medición tipo IMU (sistema de medición inercial), un sistema GPS, un sensor de presión atmosférica, un sensor de campo magnético en 3D y un procesador digital interno que ejecuta un algoritmos de fusión de datos en tiempo real con una tasa de muestreo muy superior a la de los sistemas GPS comerciales. Integrando esta información en un filtro junto con la odometría de la plataforma, es posible localizar al robot con una precisión suficiente para la navegación en entornos exteriores.

Los demás sistemas perceptivos permiten al robot capturar información relevante acerca del entorno. Para la teleoperación y la supervisión de la navegación se utilizan dos webcam instaladas en la parte anterior y posterior. A través de estas cámaras el PC embarcado captura imágenes en color que pueden ser visualizadas en el ordenador de teleoperación y en otros ordenadores conectados a Internet.

Adicionalmente, se han instalado tres sensores de ultrasonidos en cada extremo del robot orientados hacia la dirección de avance, que recogen información de los posibles obstáculos así como de irregularidades en el terreno que tiene frente a él (como piedras, zanjas o escalones).

También para la navegación se ha dispuesto en la parte superior del robot un escáner láser tipo SICK LMS 200 que puede ser fácilmente instalado o removido, y que se puede ser

utilizado para detectar obstáculos o personas a mayor distancia que los ultrasonidos. Junto a este sistema, el robot dispone también de un pequeño sensor térmico multipunto que permite localizar fuentes de calor en el área de trabajo.

Finalmente la plataforma cuenta con una cámara pan-tilt con un zoom óptico de 10X, la cual facilita la teleoperación del sistema y resulta sumamente útil para misiones de vigilancia.

3.5. Sistema de comunicaciones

El robot ha sido equipado con los siguientes sistemas de comunicación: Radiocontrol, radiomódem, WiFi, WiMax y 3G/GPRS (ver Figura 5). El objetivo es mantener siempre un enlace de comunicación disponible para poder comunicarse con el robot.

El control directo de teleoperación se realiza mediante el sistema de radiocontrol. Este transmite comandos de referencias al receptor embarcado y es apropiado para teleoperación directa en zonas de trabajo que no excedan los 0,5 km de radio. La tecnología WIFI, gracias a su velocidad, alcance (unos 100-150 metros) y ancho de banda, permite la teleoperación a media distancia mediante un ordenador portátil, así como disponer de realimentación visual y de acceso al sistema de control de alto nivel del robot.

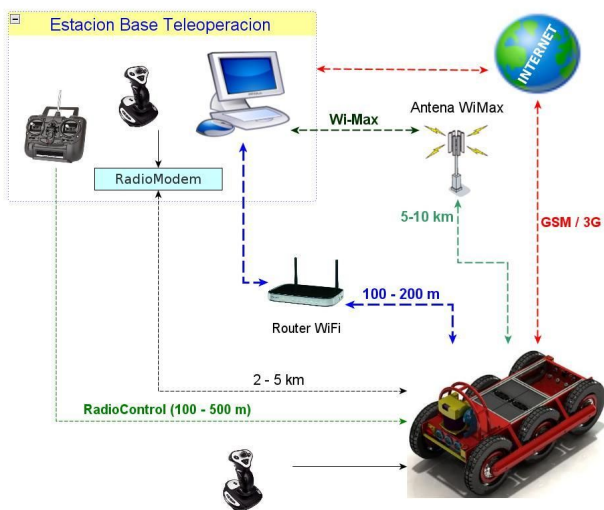


Figura 5: Sistemas de Comunicación del Robot

Para situaciones en las que es necesaria una mayor cobertura se ha provisto al robot de comunicación WiMax, un concepto similar a WiFi pero con mayor cobertura y ancho de banda, que posibilita la teleoperación hasta una distancia de 5-6 km. La implementación de este sistema requiere una estación base WiMax con la antena orientada hacia la zona de trabajo del robot, y un adaptador WiMax con antena omnidireccional instalado en el robot.

Finalmente se ha incluido un modem de telefonía (3G) que permite controlar el robot desde cualquier ordenador remoto que disponga de conexión a Internet (siempre que en la zona de trabajo haya cobertura 3G o GPRS). Se ha incluido un servidor web en el ordenador embarcado que publica una página en la que es posible ver la ubicación, el recorrido y el

estado del robot en tiempo real, a través de una interfaz desarrollada utilizando el API de google maps (ver Figura 6).

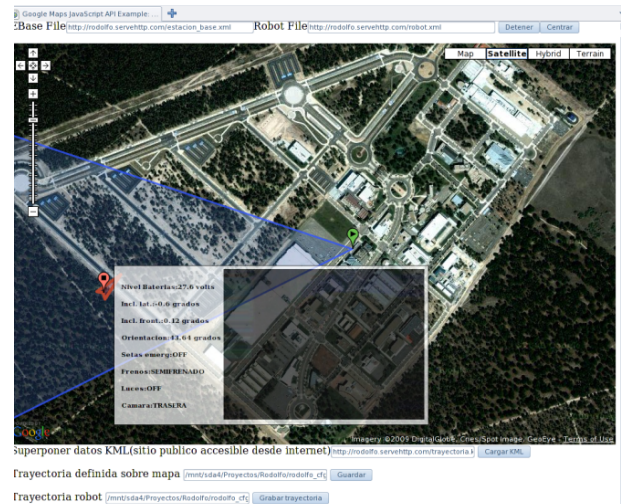


Figura 6: Interfaz de Supervisión por web

4. Generación del Modelo

La reconstrucción del entorno es la tarea fundamental para numerosas aplicaciones. Por este motivo se ha desarrollado un cabezal de toma de datos 3D que puede ser montado sobre la plataforma robótica, y es el encargado de la reconstrucción del entorno de trabajo. Este cabezal es un dispositivo independiente y permite la captura de información tridimensional de todo el entorno que rodea al robot de forma rápida.

En las siguientes subsecciones se describe este dispositivo y la generación de modelos tridimensionales completos a partir de la información capturada.

4.1. Escáner 3D

Este sensor instrumental es el encargado de la adquisición de datos 3D para la reconstrucción del entorno. Se trata de un cabezal giratorio de desarrollo propio, formado por un escáner láser Sick LMS 111 instalado sobre una plataforma giratoria, la cual está compuesta por un motor DC, un codificador incremental para conocer la posición angular del escáner, y un conector giratorio a través del cual pasan las alimentaciones y los datos del escáner. La Figura 7 representa la forma en la que el escáner captura información del entorno. El escáner utilizado tiene precisiones inferiores que otros equipos de medición laser estacionarios (1-2 cm, frente a 0.3 -0.5 cm de éstos). Sin embargo, su naturaleza industrial hace que el conjunto tenga un menor coste, una mayor productividad de medición y una mayor robustez, lo que facilita el embarcado en un robot.

La velocidad de giro de la plataforma (hasta 10 r.p.m) permite obtener un escaneo completo del entorno en menos de 20 segundos para una resolución angular de 0.5 grados.

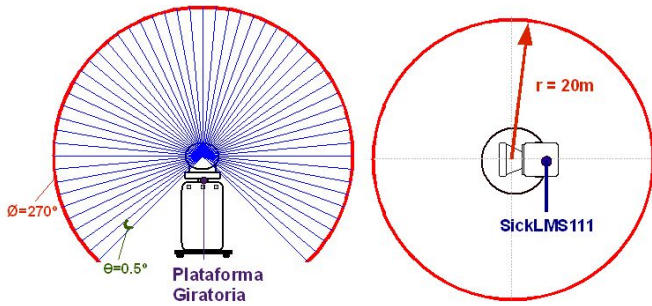


Figura 7: Representación del Escáner 3D. El láser Sick LMS111 proporciona medidas cada 0.5° en un sector de 270° de un plano. La torre giratoria hace girar 360° el LMS 111 para cubrir todo el espacio.

4.2. Reconstrucción tridimensional

Cabe destacar que si bien el robot es capaz de capturar datos en movimiento, el procesamiento de estos datos resulta más complejo que si se adquieren con el robot estacionario. Esto es debido a que se requiere extrapolar la posición del escáner (en los seis grados de libertad) para cada toma de datos, lo cual incrementa los requerimientos computacionales y el error de medida, al tiempo que se complica el proceso de triangulación de la nube de puntos. Además, gracias a la rapidez con la que el escáner puede reconstruir el entorno (20 segundos una toma completa), la diferencia en términos de tiempos entre la captura estacionaria y la captura con el robot en movimiento es escasa. Por todo ello resulta preferible la toma de datos con un escáner estacionario.

Una vez se ha capturado una nube de puntos usando el escáner 3D, se realizan dos procesos. Por un lado, se triangula el modelo para facilitar el análisis de la información tridimensional por parte de otras aplicaciones del sistema, como por ejemplo el módulo de exploración autónoma. Por otro lado se realiza el proceso de alineamiento de los escaneos, el cual es utilizado para calcular las matrices de alineamiento de cada nuevo modelo tridimensional, con los modelos capturados anteriormente. Esto resulta fundamental para crear modelos completos de un entorno complejo en donde se requiera más de una toma.

Triangulación

La triangulación se realiza aprovechando la forma ordenada en la que el escáner 3D captura la nube de puntos, que permite crear los triángulos entre puntos vecinos (por ejemplo, entre los dos primeros puntos de una lectura láser y el primer punto de la lectura siguiente). Si un punto está más allá del alcance del láser, el triángulo es descartado.

Una vez creados todos los triángulos, se evalúan independientemente usando la ley del seno (ecuación 1) para establecer una relación entre el largo de los lados y el seno de sus ángulos (ver Figura 8), y descartan aquellos para los que dicha relación γ está fuera de ciertos límites.

$$\gamma = \frac{\text{sen}(\theta_1)}{\text{sen}(\theta_2)} \quad (1)$$

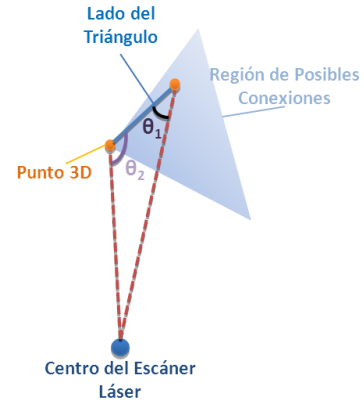


Figura 8: Evaluación de la validez de un triángulo

Los triángulos descartados se almacenan en una lista aparte que puede ser utilizada para ver los planos de occlusión.

El modelo triangulado es muy útil para la evaluación de la calidad del modelo resultante así como para la extracción de superficies del entorno (tales como terreno navegable u obstáculos).

Alineación de Escaneos

Aunque el uso de sistemas de posicionamiento global reduce enormemente el problema del SLAM, es necesario usar un algoritmo que se encargue de alinear las diferentes tomas realizadas por el robot. Esto se debe principalmente a que aunque se cuenta con un sistema de posicionamiento global, este sólo provee información sobre tres grados de libertad (X, Y, Z). La posición respecto a los tres grados de libertad restantes (*yaw*, *pitch* y *roll*) es obtenida usando sistemas menos precisos como sensores de campo magnético, acelerómetros e inclinómetros. Es necesario garantizar que estas mediciones son correctas ya que una pequeña imprecisión sobre uno de estos grados de libertad puede originar serios problemas para crear el modelo del entorno.

Siguiendo el proceso de SLAM 6D propuesto por (Nüchter, Lingemann, y otros 2007) se ejecuta un algoritmo ICP cada vez que se captura una nueva nube de puntos, para alinearla con las anteriores dándole una posición inicial estimada por el sistema de localización. Cuando se detecta un lazo cerrado se ejecuta un algoritmo para corregir el error acumulado en los alineamientos anteriores, de forma que se alinea todo el modelo. El proceso es el siguiente:

1. Estimar la posición y orientación del robot usando el sistema de localización.
2. A partir de esta estimación, calcular una matriz de transformación inicial para el alineamiento ICP.
3. Usar ICP para alinear los escaneos.
4. Al detectar un lazo cerrado se corrige el error acumulado en las alineaciones previas.

La matriz obtenida tras este proceso se utiliza para actualizar la posición del robot de modo que a partir de este instante, a todas las posiciones dadas por el sistema de posicionamiento se les aplica la misma corrección reduciendo así la incertidumbre en el posicionamiento.

Análisis de la calidad del modelo

El análisis de la calidad del modelo permite evaluar la calidad de la adquisición de los datos en términos comparativos. En general los puntos obtenidos cuando el haz láser incide perpendicularmente sobre la superficie del entorno y a corta distancia son de mejor calidad (representan mejor el entorno) que cuando incide a mayor distancia y con ángulo de incidencia más oblicuo. Una medida indirecta de la calidad es el área de los triángulos formados por la nube de puntos, siendo preferibles los triángulos pequeños sobre los grandes.

La calidad no es una característica homogénea, por lo cual es necesario evaluarla punto a punto. En el proceso de análisis se tienen en cuenta diferentes factores, para calificar la calidad de cada punto en una escala de 0 a 1 (donde 0 es la calidad más baja y 1 la calidad mínima requerida o mejor). La calidad por punto $AP(p)$ del modelo se calcula usando la siguiente ecuación:

$$AP(p) = \frac{\sqrt{[\omega_a(\frac{A_{max}}{Ar(p)})]^2 + [\omega_n(\frac{\vec{P}}{|\vec{P}|} \cdot \vec{N})]^2}}{\sqrt{(\omega_a^2 + \omega_n^2)}} \quad (2)$$

$Ar(p)$ es el área representada por cada punto o en otras palabras, la suma de un tercio del área de cada triángulo al que pertenece el punto p . A_{max} es el área máxima deseada para cada triángulo. \vec{P} es un vector desde el centro del escáner hasta el punto en cuestión y \vec{N} es el vector normal en este punto. Finalmente, ω_a y ω_n son parámetros que permiten ponderar la relevancia del área del triángulo y del ángulo de incidencia, en la calificación del punto.

4.3. Mapa de navegación

El mapa de navegación es una representación que se propone para facilitar el cálculo de trayectorias de navegación en entornos exteriores y está basado en el concepto de navegación presentado por (Hertzberg, y otros 2008). En apariencia, es un mapa muy similar los mapas de celdas de ocupación utilizados en los entornos 2D. Sin embargo, en este caso los valores contenidos en las celdas representan la probabilidad de que éstas puedan ser o no atravesadas por el robot.

Para crear esta representación es necesario extraer del modelo 3D las zonas de paso seguro y los obstáculos del entorno, para luego proyectar esta información sobre un mapa 2D.

Extracción de Obstáculos y Zonas de Navegación Segura del Modelo 3D

Los datos 3D contienen gran cantidad de información sobre el entorno. Sin embargo los puntos capturados pueden pertenecer a tres categorías según (Nüchter, Lingemann y Hertzberg 2006): obstáculos, suelo u objetos que el robot no puede alcanzar. Por ello es necesario procesar los datos 3D para extraer la información relevante de la nube de puntos.

La extracción de áreas de navegación seguras se hace calculando una puntuación según la probabilidad de pertenencia a estas zonas para cada punto de la malla. Así, si un punto está en un ángulo alcanzable para el robot (es decir, el robot no tiene que escalar más allá de sus posibilidades para alcanzarlo) y su vector normal tiene una proyección alta sobre el eje Z, entonces se considera que el punto tiene una alta probabilidad de pertenecer a una zona de navegación segura y por ende se le otorga una puntuación alta. Esta calificación $F(p)$ se obtiene utilizando la siguiente ecuación:

$$F(p) = S(p) \cdot H(p) \quad (3)$$

$S(p)$ es una función que otorga una puntuación de navegabilidad según la proyección de la normal del triángulo sobre el eje Z y la capacidad de escalada del robot, en la forma:

$$S(p) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{N_z(p) - \cos(\theta)}{1 - \cos(\theta)}}}} \quad (4)$$

En esta expresión, $N_z(p)$ es la magnitud del componente Z del vector normal al punto y θ es el ángulo de inclinación máxima que el robot puede escalar.

$H(p)$ es una función que otorga una puntuación de navegabilidad a cada punto según su altura con respecto a la posición con la que fue escaneada,

$$H(p) = e^{-\frac{P_z(p)^2}{2d(p) \sin(\theta)}} \quad (5)$$

Aquí $P_z(p)$ es la diferencia de altura del punto p con respecto a la base del robot, $d(p)$ es su distancia hasta el escáner sobre el plano XY y θ es el ángulo de inclinación máxima que el robot puede escalar.

En las ecuaciones 4 y 5 los términos exponenciales penalizan mayormente a los puntos con peores características de forma que la puntuación en estos casos sea cercana a cero eliminando así la posibilidad de que sean considerados parte de una superficie navegable.

La detección de obstáculos se realiza usando las mismas premisas, pero ahora sólo se consideran los puntos que estén en un ángulo y altura alcanzables para el robot.

Las puntuaciones son más altas si el área del punto es más grande y la proyección angular de la normal del punto sobre el rayo al escáner laser es alta. Esta calificación $B(p)$ final se obtiene mediante:

$$B(p) = \left(\frac{N_{xy}(p) Ar(p)}{A_{max}} \right) \left(\frac{\vec{P}}{|\vec{P}|} \cdot \vec{N} \right) \quad (6)$$

donde $N_{xy}(p)$ es la magnitud del vector resultante de sumar las componentes X e Y de la normal \vec{N} de cada punto y \vec{P} es un vector desde el centro del escáner hasta el punto p . A_{max} y $Ar(p)$ han sido explicado en la ecuación 2.

Creación del Mapa de Navegabilidad

Este mapa se crea sobre una cuadrícula bidimensional en la que cada celda representa un espacio cuadrado del entorno y contiene un valor entre 0 y 1, el cual representa la probabilidad de que la celda sea atravesable. (0 implica que la celda no se puede cruzar y 1 que es completamente atravesable). Este valor es inicializado a 0.5 y se calcula al proyectar los puntos

3D. Cada punto que haya obtenido un marcador superior a un umbral para la extracción de zonas seguras de navegación, aumenta la puntuación que representa la navegabilidad de la celda para el robot. Por el contrario cada punto con un marcador superior al umbral en la extracción de obstáculos disminuye esta puntuación. La ecuación 5 permite calcular el valor de navegabilidad para cada celda del mapa,

$$C_{nc}(c) = 0.5 + \left(\frac{\sum_{i \in \varphi} F(i)}{2(n_{pf} + n_{po})} \right) - \left(\frac{\sum_{i \in \alpha} B(i)}{2(n_{pf} + n_{po})} \right) \quad (7)$$

donde φ es el conjunto de los puntos sobre la celda c con $F(p) \geq 0.7$, n_{pf} es el número de puntos en el conjunto, α es el conjunto de puntos $B(p) \geq 0.7$ y n_{po} es el número de puntos en este conjunto.

5. Exploración Autónoma

Sobre esta plataforma se ha desarrollado también un algoritmo de exploración autónoma (Pulido Fentanes, Zalama y Gómez-García-Bermejo 2011), diseñado específicamente para llevar a cabo labores de reconstrucción 3D de entornos exteriores sin necesidad de información previa sobre el terreno. Su objetivo es lograr que el proceso de toma de datos sea lo más eficiente posible, garantizando que la calidad mínima del modelo supera un umbral preestablecido, con el menor número posible de escaneos. Como criterios para evaluar la cantidad de información nueva a percibir, se utilizan la mejora en la calidad del modelo y el coste de la trayectoria a cada posible nuevo punto de escaneo. El algoritmo permite que el robot tenga una aplicación real y útil en entornos exteriores.

La Figura 9 muestra un diagrama de bloques del proceso. Primero se realiza un análisis de los datos 3D en el cual se determina la calidad actual del modelo y las zonas de interés, y se extraen las zonas de navegación seguras y los obstáculos (tal y como se explicó en la sección anterior). Posteriormente se crea el mapa de navegabilidad sobre el cual se generan una serie de posiciones aleatorias en celdas navegables, que serán evaluadas para determinar cuál es la mejor para la siguiente captura de datos.

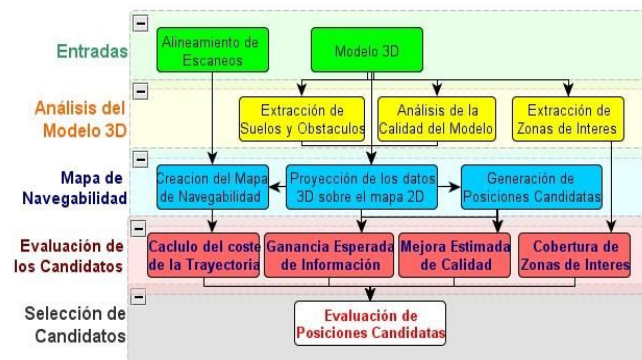


Figura 9: Diagrama del Algoritmo de exploración

La evaluación de las posiciones objetivo es una ampliación para tres dimensiones del algoritmo (Basilico y Amigoni 2009), diseñado para seleccionar la siguiente mejor vista basándose en múltiples criterios. Los criterios seleccionados a

diferencia del algoritmo en 2D incorporan la evaluación de la mejora en la calidad del mapa, la cantidad de zonas de interés cubiertas desde el objetivo además de la ganancia esperada de información del entorno, y la dificultad de navegación.

La evaluación de candidatos se realiza mediante

$$u(c) = \frac{w_A A(c) \cdot w_Q Q(c) \cdot w_O O(c)}{w_C C(c)} \quad (8)$$

donde $u(c)$ es la función de evaluación de la utilidad de cada celda, c es la celda evaluada, $A(c)$ es un valor normalizado que representa la ganancia esperada en la información del entorno, $Q(c)$ es la mejora en la calidad del mapa, $O(c)$ representa el número de zonas de interés vistas desde cada celda c , $C(c)$ es una función de coste que cuantifica la dificultad de alcanzar cada candidato, y finalmente w_A , w_Q , w_O y w_C son valores constantes que representan el peso de cada criterio en la función de evaluación.

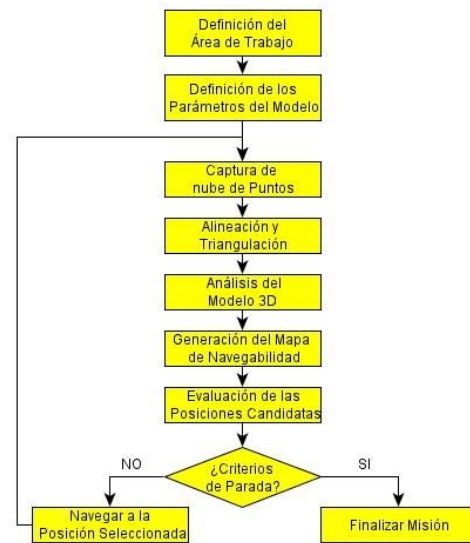


Figura 10 - Proceso de exploración

Una vez se han evaluado todas las posiciones, el robot fija como destino la que obtiene la calificación más alta. Una vez allí, el robot realiza una nueva toma y repite el proceso hasta haber satisfecho todos los requisitos. La Figura 10 muestra el proceso de reconstrucción de un entorno en varias tomas.

El cálculo de las funciones de evaluación de los diferentes criterios se explica en las siguientes secciones.

Ganancia Esperada de Información

La ganancia de información se evalúa calculando el área inexplorada vista desde cada una de las celdas. Con este fin se utiliza el mapa de navegabilidad y se cuentan las celdas no exploradas que estén dentro del área de cobertura del escáner, menos las celdas ocluidas.

$$A(c) = A_c(c)(C_{se} - n_{il}) \quad (9)$$

$A_c(c)$ es el área representada por cada celda, C_{se} el número de celdas sin explorar vistas desde cada posición y n_{il} el número de celdas ocluidas desde este punto. Para el cálculo de las celdas ocluidas se traza una línea imaginaria desde la

posición evaluada, hasta cada una de las celdas sin explorar. Si el valor de navegabilidad de cualquiera de las celdas por las que atraviesa esta línea es menor que 0.3, la posición se cuenta como ocluida.

Mejora Esperada de la Calidad

Para el cálculo de esta función es necesario crear un mapa de calidad del entorno. Dicho mapa se crea de forma similar al mapa de navegabilidad, pero en este caso cada celda almacena el promedio del valor de calidad de los puntos proyectados sobre ésta, $Q_a(c)$. Esto se hace mediante:

$$Q_a(c) = \frac{1}{np(c)} \sum_{p \in c} AP(p) \quad (10)$$

donde $np(c)$ es el número de puntos en cada celda. Una vez creado este mapa, se calcula la calidad esperada para cada celda usando los mismos criterios que para la evaluación de la calidad del modelo, en otras palabras el área por punto esperada y la incidencia del rayo sobre los planos del entorno.

El primer factor se calcula usando la resolución del escaneo y la distancia desde la celda analizada c hasta cada una de las celdas que están a su alcance e , para estimar el tamaño de los triángulos, en la forma:

$$EQ_{AP}(c, e) = \frac{2A_{max}}{r(c, e)^2 \sin(res_p) \sin(res_t)} \quad (11)$$

En esta expresión $r(c, e)$ es la distancia desde la posición evaluada hasta una celda e que está en su radio de cobertura, res_p y res_t son las resoluciones del escaneo tridimensional en términos angulares en *pan* y *tilt* respectivamente y A_{max} es el área máxima deseada para cada triángulo.

Para calcular la mejora en la calidad por la incidencia del rayo sobre los planos, se calcula la proyección del rayo teórico sobre la normal local, generando un vector normalizado sobre cada punto desde la posición candidata. Cuanta más alta es la proyección, mas frontalmente se suponen capturados los planos desde cada posición. Este valor se promedia para cada celda del mapa de calidad, de forma que es equiparable con los otros dos valores usados para esta estimación. La ecuación siguiente muestra la forma de calcular este valor para cada celda.

$$EI_c(e) = \frac{1}{np(e)} \sum_{k \in e} \left(\frac{\vec{R}_k}{|\vec{R}_k|} \cdot \vec{N}_k \right) \quad (12)$$

\vec{R}_k es un vector desde la posición evaluada c hasta cada punto (k) de la celda e y \vec{N}_k es un vector unitario normal a cada uno de los puntos. De esta manera la mejora en la calidad $Q(t)$ para cada una de las posiciones evaluadas t se calcula usando,

$$Q(c) = \sum_{e \in \sigma} \left(\frac{\sqrt{[\omega_a EQ_{AP}(c, e)]^2 + [\omega_n EI_c(e)]^2}}{\sqrt{(\omega_a^2 + \omega_n^2)}} - Q_a(e) \right) \quad (13)$$

donde σ es el conjunto de las celdas en el rango del escáner desde la posición evaluada c , y ω_a y ω_n son los valores utilizados para el análisis de la calidad del modelo.

Zonas de Interés

Las zonas de interés son los planos ocluidos del modelo, extraídos en el proceso de triangulación. Estos planos son almacenados con su vector normal. Para calcular la cobertura de estas zonas desde cada posición evaluada, se crea un vector desde la posición candidata hasta el centro de cada plano ocluido que este en el rango de cobertura del escáner, y utilizando la siguiente ecuación se estima su cobertura,

$$O(c) = \sum_{i \in \beta} |\vec{r}_{ci} \cdot \vec{V}_i| \quad (14)$$

Aquí β representa el conjunto de planos ocluidos visibles desde la posición candidata c y \vec{r}_{ci} es un vector desde la celda evaluada hasta el centro del plano ocluido. Cada plano ocluido escaneado es removido de la lista.

Estimación del coste de la trayectoria

Este proceso se hace calculando una trayectoria desde la posición actual del robot hasta cada una de las posiciones candidatas sobre el mapa de navegabilidad, que cruce únicamente las celdas con un valor de navegabilidad $C_{nc}(c)$ mayor que 0.7. El coste de llegar hasta cada posición candidata se calcula usando

$$C(c) = \sum_{t \in \tau(a, c)} d_{ec}(c, c-1) \cdot \frac{1}{C_{nc}(c)} \quad (15)$$

donde $\tau(a, c)$ es el conjunto de celdas en la trayectoria desde la celda actual a hasta cada posición evaluada c y $d_{ec}(c, c-1)$ es la distancia entre cada celda y la siguiente en la trayectoria

6. Resultados

Se han reconstruido dos entornos distintos usando el sistema aquí presentado. El primero es el edificio de la Fundación CARTIF en Boecillo (Valladolid, España). Este escenario se eligió por ser un sitio fácilmente accesible, geoméricamente bien definido, con caminos de acceso claros, hierba rodeando el edificio y algunos desniveles, todo lo cual permite ensayar los diferentes sistemas y algoritmos implementados.

El segundo entorno es un edificio abandonado en Viana de Cega (Valladolid, España). Ha sido elegido por ser una estructura grande rodeada de un entorno con muchos elementos como piedras, escombros, árboles y hierba alta, de manera que resulta ideal para la validación del sistema.

6.1. Edificio Fundación CARTIF

En este entorno se realizó una prueba del sistema utilizando el algoritmo de exploración para seleccionar los puntos de escaneo. Los parámetros del algoritmo fueron configurados para darle más importancia a la calidad que a cualquier otra característica del modelo. Igualmente se otorgó mucho peso a la función de coste de la trayectoria, para garantizar que el

algoritmo escoge puntos de vista que se encuentran dentro de los caminos circundantes del edificio. La Figura 11 muestra una vista aérea del escenario.



Figura 11: Vista aérea del edificio de la Fundación CARTIF

El proceso de reconstrucción requirió 55 escaneos para completar el modelo. En términos de tiempo, desde el instante de arranque del sistema hasta el último escaneo, el robot estuvo en funcionamiento 1 hora 37 minutos. La trayectoria realizada puede verse en la Figura 12.

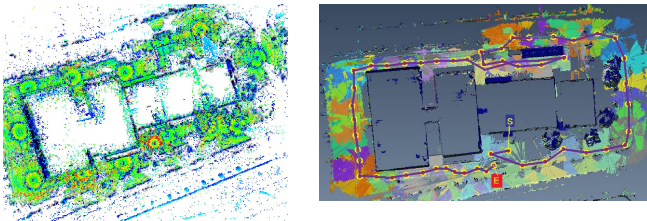


Figura 12: Izq. Calificación de calidad para el modelo resultante. Los colores más fríos representan mejor calidad. Der. Trayectoria realizada por el Robot desde el punto S.

El resultado ha sido un modelo de buena calidad realizado con una trayectoria sencilla, que no requirió grandes esfuerzos mecánicos por parte del robot. La Figura 13 muestra una vista del modelo resultante tras el proceso.

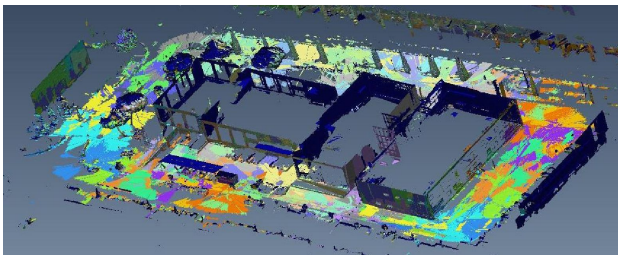


Figura 13: Modelo Resultante.

Igualmente el mapa de navegabilidad obtenido durante este proceso (ver Figura 14) muestra que esta representación es válida para evaluar la navegabilidad sobre un entorno típico de exteriores.

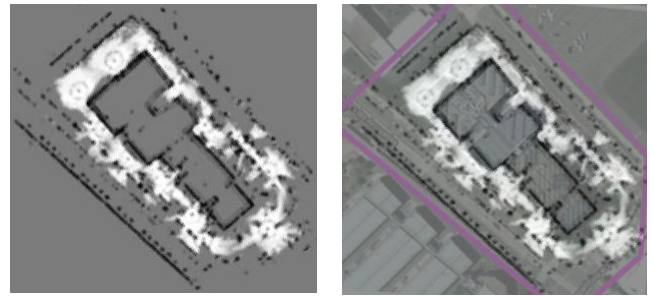


Figura 14: Izq. Mapa de Navegabilidad obtenido. Der. Mapa superpuesto sobre vista aérea.

En definitiva, el experimento muestra que el sistema resulta útil para la creación de un modelo tridimensional de un entorno exterior de tipo urbano bastante estructurado y que es capaz de realizar el proceso de forma rápida y eficiente. Además, el algoritmo de exploración ha demostrado ser útil para la selección automática de puntos de vista.

6.2. Edificio Abandonado

Este escenario (Figura 15) es un entorno mucho más complejo que el anterior y por ende, más interesante. Tiene una estructura muy grande rodeada de múltiples objetos como árboles o escombros que dificultan considerablemente tanto la navegación sobre el terreno como la captura de datos tridimensionales. Además su estado de abandono, con accesos limitados y muy deteriorados, lo hace un escenario ideal para comprobar la capacidad del robot de generar modelos 3D útiles de forma rápida, en escenarios complejos.

El terreno es a grandes rasgos plano, pero presenta ciertas elevaciones y las superficies navegables son de tierra y piedras o hierba alta. Esto representa un reto tanto para el sistema de tracción como para la extracción del mapa de navegabilidad.



Figura 15: Vista aérea del entorno escaneado

En este caso se ha diseñado un simulacro de situación de emergencia en la cual es necesario obtener un modelo tridimensional de un edificio que posiblemente esté colapsando, para evaluar los posibles riesgos de una intervención en el mismo. El simulacro se realizó primero con el sistema aquí presentado y posteriormente con un sistema estacionario operado por un experto, con el fin de hacer una comparación realista entre ambas soluciones.

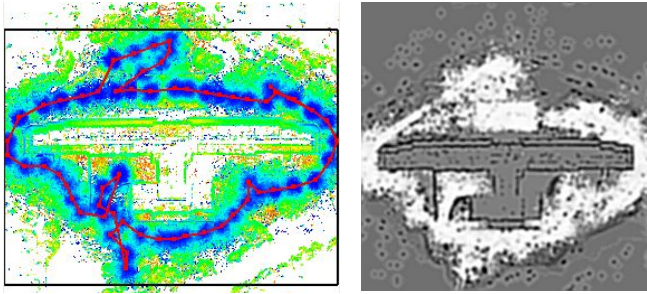


Figura 16: Izq. Calificación de calidad para el modelo resultante. Los colores más fríos representan mejor calidad y trayectoria realizada por el Robot. Der. Mapa de Navegabilidad obtenido.

El levantamiento del modelo con el robot requirió 63 escaneos para la reconstrucción del entorno, los cuales fueron realizados en 1 hora 58 minutos. El recorrido realizado por el robot fue de 690 metros. El modelo resultante tiene una calidad satisfactoria que permite la evaluación de vías de acceso. El mapa de navegabilidad obtenido muestra claramente la diferencia entre las zonas más accesibles para el robot y aquellas con elementos que dificultan la navegabilidad (ver Figura 16).

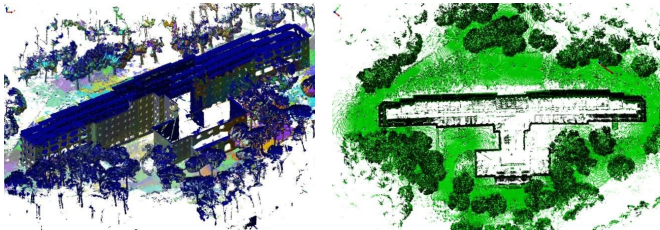


Figura 17: Modelo del entorno obtenido con el robot

El Modelo obtenido con el sistema (Figura 17) permite evaluar la zona los accesos y ver las condiciones del edificio.

Comparación con un Sistema Estacionario

Para esta comparación un operador experto hizo una reconstrucción parcial del entorno usando un sistema LEICA HDS-3000. Los resultados pueden verse en la Figura 18 y la Figura 19.

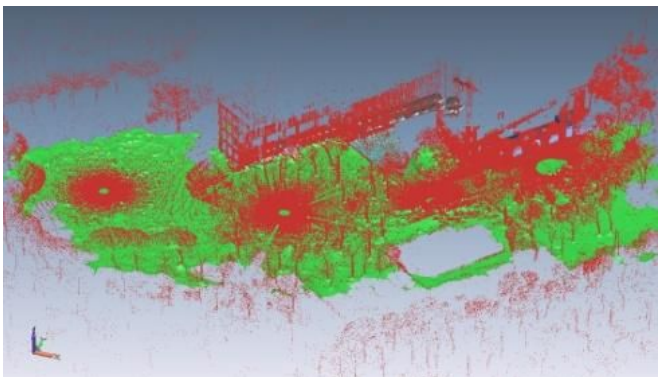


Figura 18: Modelo capturado por el sistema estacionario con las tomas alineadas

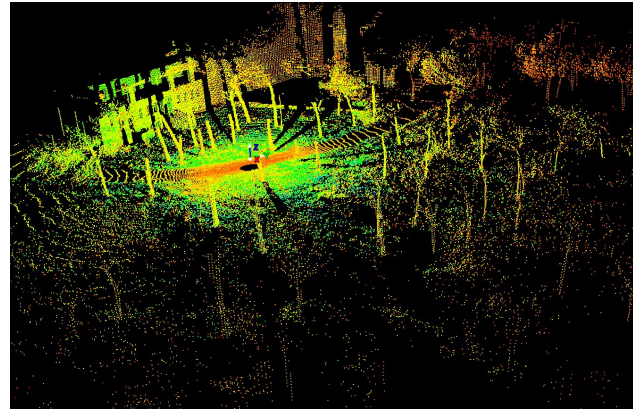


Figura 19: Nube de puntos del sistema estacionario

El sistema estacionario tiene un alcance de 100 metros y puede alcanzar resoluciones de 1 mm² desde esa distancia, de manera que el modelo capturado tiene una calidad que nuestro sistema no puede alcanzar. Por otro lado, el sistema necesita 5 minutos de calentamiento y preparación, y en este caso cada escaneo requirió 15 minutos para estar listo. Una vez terminado el escaneo, es necesario apagar el sistema por seguridad y transportarlo manualmente hasta la nueva posición. El peso del sistema de escaneo (13 kg) y sus baterías (8 kg), además de la necesidad de transportar también el trípode y el ordenador portátil, hacen de esta una labor ardua para una sola persona.

La reconstrucción realizada en este caso fue solo parcial por cuestiones de tiempo, pero el operador destacó que debido al gran número de oclusiones presentes en el entorno, probablemente serían necesarios hasta 20 escaneos, lo cual se traduce en unas 8 horas de trabajo solo en la captura de datos. Además sería necesaria una fase de alineamiento posterior que podría llegar a requerir un tiempo casi igual al de la toma de datos.

En este sentido el sistema aquí propuesto resulta mucho más rápido no solo en la fase de captura de datos, sino también en el proceso de alineamiento (el cual se hace de forma simultánea). En concreto, la reconstrucción del mismo entorno se realizó en menos de dos horas (aunque fueran necesarios más escaneos). Obviamente esta reducción de tiempo que se consigue con el sistema propuesto, puede ser vital en situaciones de emergencia.

Además merece la pena destacar que en algunas situaciones de emergencia donde puedan encontrarse agentes tóxicos o radioactivos el riesgo para un operador humano puede ser muy elevado. Sin embargo, el sistema robótico puede ser supervisado a una distancia considerable.

En términos de calidad los modelos no son directamente comparables, ya que el sistema estacionario es un equipo de altas prestaciones que puede alcanzar resoluciones muy altas. Además, la alineación de los escaneos se realiza de forma manual y su precisión depende mucho de la pericia del operador.

7. Conclusiones

En el presente artículo se ha presentado un robot diseñado para la reconstrucción sencilla y eficiente de entornos exteriores. El robot está dotado de múltiples sistemas

perceptivos orientados a la teleoperación, localización y navegación del sistema. Además cuenta con un escáner tridimensional como herramienta principal para la generación de modelos del entorno. Junto al robot se ha presentado un método para la exploración autónoma del entorno a partir de la información tridimensional capturada.

Los resultados obtenidos demuestran que el sistema es capaz de generar modelos útiles de distintos entornos exteriores, de forma rápida y con un esfuerzo considerablemente menor que el requerido por un sistemas estacionarios. Igualmente se puede observar que en situaciones de emergencia el sistema puede resultar de gran utilidad, gracias a su rapidez y a su capacidad para ser supervisado a grandes distancias.

Cabe también destacar el algoritmo de exploración aquí presentado, que es capaz de generar trayectorias eficientes para la reconstrucción de un entorno complejo, garantizando el cumplimiento de requerimientos mínimos de calidad en el modelo resultante.

La transferencia tecnológica de este sistema se puede plantear a dos niveles. Por una parte, la plataforma en sí resulta de gran utilidad en las tareas de rescate en zonas de difícil accesibilidad o zonas peligrosas que permitan operación autónoma o teleoperada. Este ha sido precisamente el objetivo del proyecto ROBAUCO, bajo el cual se ha desarrollado esta plataforma por la que han manifestado interés el ejército y protección civil.

Por otra parte es posible plantear la transferencia como sistema de adquisición tridimensional de exteriores, si bien en este caso la transferencia se podría realizar a medio plazo, considerando que a corto puede ser más interesante una transferencia en forma de servicio de medición tridimensional, lo que además permitirá una mayor maduración del sistema.

English Summary

A Robotic Platform for Tridimensional Reconstruction Tasks on Outdoor Environments.

Abstract

This article presents the results obtained during the design and development of an all-terrain robot for the research of service robotics applications on outdoor environments, with a strong focus on 3D reconstruction labors of outdoor environments. This document describes the mechanics of the all-terrain platform, its hardware and software architectures and its communication systems. Also a description of the robots perceptive system can be found, finally as an additional contribution, an algorithm for automatic environment exploration is presented, in which captured 3D information from the environment is analyzed in order to choose the next best position for a 3D scan according to different criteria. The presented results show that our system is useful for outdoor 3D reconstruction.

Keywords:

Mobile Robot, Tridimensional Reconstruction, Exploration.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a Don José María Llamas Fernández por su muy valiosa ayuda en la comparación de nuestro sistema con un sistema estacionario y por otras múltiples recomendaciones.

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología, (CICYT) bajo el proyecto DPI2008-06738-C01 y Ministerio de Industria Comercio y Turismo bajo el proyecto FIT-170200-2007-1 Programa concesión de ayudas para apoyo a centros tecnológicos a través de proyectos consorciados.

Referencias

- Amano, H. «Present status and problems of fire fighting robots.» *SICE 2002. Proceedings of the 41st SICE Annual Conference*. 2002. 880 - 885.
- Basilico, Nicola, and Francesco Amigoni. "Exploration strategies based on multicriteria decision making for an autonomous mobile robot." *Proceedings of ECMR, 2009*. 2009. 259 - 264.
- Besl, P. J., y H. D. McKay. «A method for registration of 3-D shapes.» *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 1992: 239-256.
- Birk, Andreas, y Holger Kenn. «A Rescue Robot Control Architecture Ensuring Safe Semi-autonomous Operation.» *RoboCup 2002: Robot Soccer World Cup VI*, 2003: 254-262.
- Blaer, Paul S, and Peter K Allen. "View Planning and Automated Data Acquisition for Three-Dimensional Modeling of Complex Sites." *Journal of Field Robotics* 26, no. 11-12 (2009): 865-891.
- Blaer, Paul S, y Peter K Allen. «Data Acquisition and View Planning for 3-D Modeling Tasks.» *IROS*. San Diego, CA: IEEE/RSJ, 2007.
- Bruemmer, David J., Donald D. Dudenhoefler, y Julie L. Marble. «Dynamic Autonomy for Urban Search and Rescue.» *Proceedings of the 2002 {AAAI} Mobile Robot Workshop*. AAAI Press, 2002. 3337.
- Dellaert, Frank. *4D cities spatio-temporal reconstruction from images*. 2005. <http://www.cc.gatech.edu/4d-cities/> (último acceso: 10 de 11 de 2010).
- Früh, Christian, and Avidesh Zakhor. "Constructing 3D City Models by Merging Ground-Based and Airborne Views." *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '03)*. 2003. 562.
- Goodrich, Michael A. , Dan R. Olsen Jr., JacobW. Crandall , y Thomas J. Palmer. «Experiments in Adjustable Autonomy.» *Systems, Man, and Cybernetics, 2001 IEEE International Conference on*. Tucson, AZ , USA : IEEE, 2001. 1624-1629.
- Hertzberg, Joachim, Kai Lingemann, Christopher Lörken, Andreas Nüchter, y Stefan Stiene. «Does It Help a Robot Navigate to Call Navigability an Affordance?» *Lecture Notes in Computer Science Towards Affordance-Based Robot Control* (Springer Berlin / Heidelberg), 2008: 16 - 26.
- Jensen, Bjorn, Jan Weingarten, Sascha Kolski, and Roland Siegwart. "Laser range imaging using mobile robots: From pose estimation to 3D-models." *1st Range Imaging Research Day*. Zurich, Switzerland, 2005. 129-144.
- Nüchter, Andreas, Kai Lingemann, and Joachim Hertzberg. "Extracting drivable surfaces in outdoor 6d slam." *37nd International Symposium on Robotics (ISR '06)*. Munich, Germany, 2006.
- Nüchter, Andreas, Kai Lingemann, Joachim Hertzberg, and Hartmut Surmann. "6D SLAM - 3D mapping outdoor environments." *Journal of Field Robotics* (John Wiley and Sons Ltd) 24, no. 8-9 (2007): 699 - 722.

- Pfaff, Patrick, Rudolph Triebel, Cyrill Stachniss, Pierre Lamon, Wolfram Burgard, and Roland Siegwart. "Towards Mapping of Cities." *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Roma, 2007. 4807-4813.
- Pulido Fentanes, Jaime, Eduardo Zalama, y Jaime Gómez-García-Bermejo. «Algorithm for Efficient 3D Reconstruction of Outdoor.» *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation (ICRA11)*. Shangai, 2011.
- Simmons, Reid. *Inter Process Communication (IPC)*. 9 de 11 de 2009. <http://www.cs.cmu.edu/~IPC/> (último acceso: 16 de 11 de 2010).
- Teller, Seth. «Automatic acquisition of hierarchical, textured 3D geometric models of urban environments: Project Plan.» *Proceedings of the Image Understanding Workshop*. New Orleans, 1997.
- Williams, Matt. *Street View: Explore the world at street level*. 2010. http://maps.google.es/intl/en_us/help/maps/streetview/ (último acceso: 10 de November de 2010).