

Plataforma para reconstrucción virtual de entornos tridimensionales

Autor: Salvador Domínguez Quijada
Centro de Automatización Robótica y Tecnologías de la Información y de la Fabricación
Parque Tecnológico de Boecillo. Valladolid
saldom@cartif.es

Resumen

El propósito de la plataforma móvil para la reconstrucción tridimensional es integrar una serie de dispositivos que capturen información del entorno a modelar y que dichas medidas estén referenciadas a ser posible respecto de un sistema de coordenadas definido de antemano. Entre los dispositivos utilizados en la plataforma están un escaner láser de la marca Sick, un posicionador angular para inclinar dicho escaner un cierto ángulo, una webcam para la captura de imágenes utilizadas en las texturas del modelo, un posicionador angular que gira la cámara un cierto ángulo, un sistema de tracción que permite trasladar el conjunto a un cierto lugar, un sistema de medición odométrica para conocer las variaciones de posición sufridas por el robot en su traslación, un sistema de posicionamiento global que permita corregir la posición odométrica y referenciar la posición respecto de un sistema de coordenadas externo. Con todos estos dispositivos agrupados es posible la toma de los datos necesarios para modelar tridimensionalmente el entorno por el que se mueve el robot.

1 INTRODUCCIÓN

La obtención de modelos tridimensionales del entorno es uno de los temas de investigación que está tomando un gran auge en los últimos años. Tradicionalmente el modelado tridimensional se ha centrado en piezas de mediano o pequeño tamaño [1,2] pero sólo unos pocos se han centrado en el desarrollo de modelos tridimensionales de interiores y exteriores de edificios mediante robots [3,4,5,6]. La aparición de los scanners radiales y en particular el laser SICK ha supuesto una autentica revolución en el campo de la navegación y construcción de mapas de entorno en robótica móvil. Este scanner se ha embarcado en pequeños robots móviles modelos B21R, pionner, etc [7] de forma que mediante barrido horizontal permite la construcción de mapas de entorno bidimensionales y localizar el robot al mismo tiempo utilizando técnicas probabilísticas [8,9,10]. Recientemente algunos investigadores han motorizado este tipo de scanners para obtener un barrido completo de la escena del robot [11,12]. En este artículo se presenta el desarrollo de un robot

móvil para la reconstrucción tridimensional de entornos de interior con texturas fotorealistas al que se le ha dotado de un scanner laser Sick LMS 200 y una web-cam con un sistema de servocontrol. Si bien la utilización de la información proporcionada por el láser puede ser utilizada para localizar el robot al mismo tiempo que se genera el mapa del entorno se ha incluido un sistema de localización basado en balizas [13] y un sistema de odometría óptica para permitir validar y contrastar otras técnicas de localización que puedan utilizarse.

Para la reconstrucción de un modelo virtual a partir de un entorno real es necesario un sistema de medida que proporcione las coordenadas (x,y,z) de un número suficiente de puntos como para tener una resolución aceptable en el modelo. Estas coordenadas han de estar referidas a un sistema de referencia global, a poder ser único, para simplificar la reconstrucción total. Si consideramos que el sistema de medición está colocado en el robot, tenemos un único punto de vista desde el cual no es posible, en la mayoría de los casos, "ver" todos los puntos del espacio que se quiere modelar. Para poder conseguir abarcar un número aceptable de puntos es necesario trasladar el punto de vista a otros lugares desde los que se abarquen las zonas que no son visibles desde los otros puntos de vista. Al trasladar el robot a otro punto es necesario conocer la nueva posición del robot para poder relacionar las medidas en este punto con el sistema de referencia global y así obtener las coordenadas absolutas del punto medido(x,y,z). Esto nos obliga a incorporar un sistema de localización al propio robot que nos proporcione las coordenadas (x,y,theta) del robot. (Aquí estamos suponiendo que el robot se mueve en un plano horizontal, es decir, con coordenada z constante y theta es la orientación del robot dentro del sistema de referencia global).

Podemos dividir la plataforma en 5 bloques:

- Sistema de tracción.- permite trasladar el robot a cualquier parte de la zona de trabajo.
- Sistema de localización.- permite conocer la posición y orientación del robot en cada instante con la suficiente precisión. Este sistema estaría compuesto por un sistema odométrico y un sistema de posicionamiento global
- Sistema de posicionamiento angular.- permite posicionar el plano de medición láser en el ángulo de inclinación deseado para poder

hacer barridos de medición con dicho plano en la zona de interés. También permite posicionar la cámara en un ángulo determinado dentro de dicho plano permitiendo crear una secuencia de imágenes que abarquen toda la zona de interés para después superponerlas en la superficie 3D medida.

- Sistema de medición y captura. Compuesto por el medidor de distancias láser y la webcam para la captura de imágenes.
- Sistema de procesamiento y tratamiento de la información. (PC portátil)

2 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS

2.1 SISTEMA DE TRACCIÓN

El sistema de tracción (ver Figura 1) es de tipo diferencial, compuesto por una base con 3 ruedas, dos traseras de tracción y una rueda loca delantera de dirección. El sistema es de tracción diferencial debido a que la dirección que adopta el vehículo está directamente relacionada con la diferencia de giro entre las dos ruedas traseras. Si ambas ruedas giran el mismo ángulo, ó dicho de otra forma, van a igual velocidad, el sistema se trasladará de forma rectilínea, de lo contrario la velocidad angular instantánea del robot en radianes/segundo será (1)

$$\omega_{Robot} = R * (\Delta \omega_{ruedas}) / D \quad (1)$$

donde R es el radio de las ruedas traseras, D es la distancia entre las mismas y $\Delta \omega_{ruedas}$ es el incremento de velocidades angulares alrededor del eje de ambas ruedas. En cualquier caso la velocidad lineal del centro del eje de tracción, que es considerado el centro del robot, será (2):

$$V_{robot} = (v_1 + v_2) / 2 = R * (\omega_1 + \omega_2) / 2$$

(2)

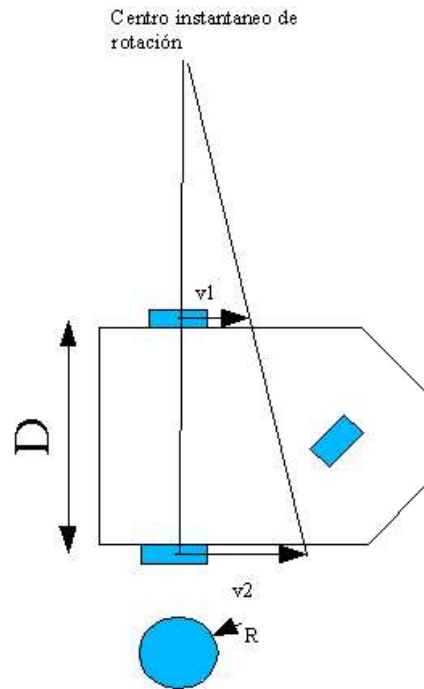


Figura 1. Esquema cinemático del sistema de tracción.

Cada rueda es propulsada por un motor de continua realimentado por codificador incremental y con una reducción adecuada para disminuir la velocidad y aumentar el par. Tenemos de esta forma un control a bajo nivel de los ejes de tracción al realimentarlos con los codificadores incrementales, pero además estos mismos codificadores incrementales nos permitirán obtener los incrementos de giro que cada rueda realiza lo cual nos es útil para implementar odometría en el sistema. Como veremos más adelante, además de este sistema odométrico implementamos otro de tipo óptico para reforzar a éste, debido a que las ruedas presentan problemas de deslizamientos y otras imprecisiones inherentes al hecho de estar moviéndose sobre ruedas. El control de los ejes de tracción se realiza a través de un microcontrolador PIC que utiliza las lecturas de los codificadores incrementales como realimentación y que genera un control PWM (Pulse Width Modulation) a través de un driver de potencia. El microcontrolador es capaz de obedecer ordenes del microcontrolador maestro del tipo: muévete x grados ó gira a x velocidad angular. El sistema de tracción lleva su propio microcontrolador que controla ambas ruedas y que está integrado en el sistema de control que se describe más adelante.

2.2 SISTEMA DE LOCALIZACIÓN

Para determinar la posición y orientación del robot sin error de tipo acumulativo como puede ser la odometría, es necesario utilizar información de referencia externa. A este tipo de sistemas se les

denomina sistemas de posicionamiento global y es más conocido es el GPS para determinar la longitud y latitud de cualquier punto sobre la faz de la tierra, estos sistemas emplean como referencias satélites que orbitan alrededor de la tierra. El sistema empleado [14] en este robot presenta algunas similitudes con ellos como la de utilizar puntos discretos de referencia que en nuestro caso son balizas activas de RF (ver Figura 2) activadas por laser en lugar de satélites.

Primeramente se describirá el sistema de posicionamiento global basado en balizas activas y después el sistema de odometría empleado.

Sistema de posicionamiento global.

Se trata de un GPS de pequeña escala que permite localizar el vehículo dentro de la zona balizada.

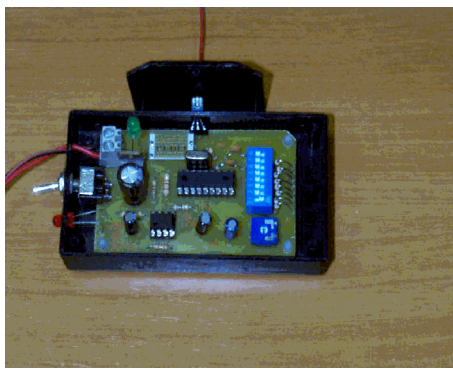


Figura 2. Baliza del sistema de posicionamiento global

El funcionamiento del sistema es el siguiente. Primeramente suponemos distribuidas por la zona de trabajo una serie de balizas (ver figura 2). El robot lleva acoplado en vertical un mástil que posee un láser infrarrojo giratorio en su extremo superior. Este láser (ver figura 3) está difuminado en un plano vertical unos 12° para asegurar la intersección del láser con las balizas circundantes. Cuando el haz láser intercepta una baliza genera un pulso en la fotocélula de la misma. Este pulso es la señal de activación para que la baliza emita, a través de su módulo de radiofrecuencia interno, un código característico de la baliza y que puede ser configurado por el usuario a través de unos microinterruptores. Este código está formado por 8 bits con los que es posible colocar hasta 256 balizas por el entorno de trabajo. Un receptor de radiofrecuencia situado en el robot recibe los códigos emitidos por la balizas momento en el cual calcula el ángulo hacia el que se encuentra orientado el láser en ese momento que es obviamente donde se encuentra la baliza activada en relación al robot y genera en ese momento una trama compuesta por el código de la baliza, el ángulo de la baliza y el instante de captura o “timestamp”.

Esta información es enviada al PC a través del puerto serie, el cual la procesará para determinar la posición. Cuando el PC recibe las tramas del decodificador angular de balizas la busca en un mapa de configuración de balizas previamente calculado, que es donde se asocia un código de baliza con sus coordenadas en el plano y se añade esta información a una lista de historial, la cual siempre contiene sólo las balizas recibidas con una antigüedad limitada. Por lo que al recibir la última trama y una vez añadida la información a la lista la actualiza borrando la baliza que superen la antigüedad especificada. El siguiente paso es determinar cuales tres de las balizas del historial producen una triangulación con menos error, y esto es equivalente a decir las tres del historial que estén situadas con una diferencia angular respecto del robot lo más parecida posible a 90° . A continuación se aplica una técnica basada en cruce de arcos capaces (ver figura 4) para determinar la posición del robot. Un arco capaz es aquel lugar geométrico del plano desde el cual se ven dos puntos con la misma diferencia angular. Se trata de un arco de circunferencia. En nuestro caso dos de los puntos (extremos del arco) son dos de las balizas de las 3 seleccionadas en el paso anterior, como necesitamos otro arco para determinar la intersección se eligen una de las balizas del primer arco y la baliza que quedaba por escoger.

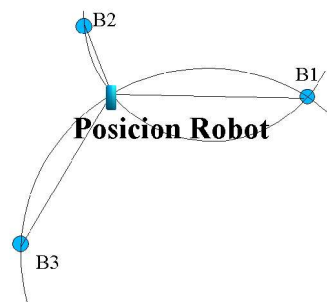


Figura 4. Esquema de triangulación por arcos capaces

Realizando los cálculos pertinentes se determina la intersección que es la posición del robot. Una vez tenemos la posición del robot, conociendo la posición de la última baliza detectada, y conociendo la posición angular de dicha baliza respecto del robot es inmediato calcular cómo debe estar orientado este para que dicha baliza se vea con dicho ángulo, por lo cual tenemos la orientación del robot.

Construcción del mapa de balizas

Como se ha comentado anteriormente es preciso conocer la posición de las balizas en el entorno de trabajo de la manera más precisa que sea posible para obtener un menor ruido y error en la posición del vehículo. El método empleado para el cálculo del mapa de balizas se basa en combinar el cálculo



Figura 3. Aspecto del láser

trigonométrico para el paso de coordenadas esféricas a cartesianas con la triangulación a 3 puntos. El mapa se va construyendo por partes. Primeramente se obtienen las posiciones de las balizas visibles desde un determinado punto, después se desplaza el equipo de medida, se calcula la nueva posición del equipo de medida y se obtienen las posiciones de las balizas visibles en ese punto agregándolas al mapa de balizas existente. El método se va aplicando sucesivamente hasta abarcar todo el mapa.

Como sistema de medida se emplea un posicionador Pan-Tilt de 0.001° de precisión en ambos ejes y un medidor de distancia simple láser de $\pm 3\text{mm}$ de error colocado en el Pan-tilt. El sistema es tal que proporciona las coordenadas (x,y,z) del punto apuntado respecto de su sistema de referencia local. El problema viene cuando se mueve el equipo a otra posición, entonces a priori se habrá perdido la posición relativa en el nuevo punto respecto de la posición inicial o global. Para calcular la relación de coordenadas cuando se mueve el equipo se marcan antes del movimiento del equipo 3 puntos característicos del entorno obteniéndose sus coordenadas locales, después de trasladarlo se vuelven a marcar los mismos puntos. Mediante un cálculo matricial sencillo de cambio de ejes se puede averiguar la matriz de transformación entre ambas poses, por lo tanto, una vez obtenidas las posiciones de las balizas en la nueva pose se convertirán al sistema global o inicial mediante dicha matriz de transformación. Esta matriz se recalcula con cada traslado del sistema de medida.

A pesar de parecer un método engorroso es posible obtener un mapa de balizas en el que haya que modificar la posición del sistema de medida un par de veces en no más de 1 hora. El esfuerzo merece la pena pues hay que tener en cuenta que una vez posicionadas las balizas ya dispondremos de un sistema GPS que nos dará la posición y orientación del vehículo en toda la zona de trabajo y nos habrá resuelto al 90% el problema de la localización. Será una cuestión de fusión sensorial con la odometría para obtener una posición más refinada y precisa.

Sistema odométrico por tracking óptico

Pese a que se dispone de un sistema de localización que nos proporciona la posición y orientación global directamente, esto no es suficiente puesto que sólo

tenemos información de la actualización de la posición cuando se detectan 3 balizas distintas que den una triangulación aceptable. Puede suceder que haya zonas ó situaciones en las que no se pueda triangular ó que la velocidad en la actualización de la posición y la precisión que necesitemos sea mayor que la que proporciona sólo el sistema de posicionamiento global. Para poder solventar estas situaciones utilizamos el sistema odométrico. En realidad existen dos sistemas odométricos en el robot. Uno de ellos proporciona la posición odométrica de una manera clásica, es decir, por integración de los incrementos recorridos por cada una de las ruedas, el otro está formado por dos ratones ópticos modificados y situados bajo el chasis de la plataforma (ver figura 5).



Figura 5. Aspecto del odómetro óptico

Como es sabido un ratón se comporta como un sensor vectorial de velocidad proporcionando las componentes de velocidad en su eje y en el eje transversal pero no permite conocer su velocidad angular. Si se fijan dos ratones alineados sobre un mismo segmento rectilíneo conoceríamos la velocidad vectorial de los extremos del segmento. Realizando unos cálculos trigonométricos sencillos es posible conocer la posición del centro del segmento y la orientación del segmento.

Para evitar el problema del deslizamiento se utilizan ratones ópticos. Este tipo de ratones proporciona el movimiento basándose en el desplazamiento que sufre la imagen del suelo sobre un sensor CCD integrado. Para proyectar la imagen del suelo sobre el CCD utilizan una lente convergente enfocada (ver figura 6) de tal manera que la superficie del suelo para proyectarse con nitidez sobre el CCD ha de estar a ras de la superficie del ratón. Para poder utilizarlo en nuestra plataforma es necesario aumentar la distancia de enfoque de ambos ratones para que no arrastren sobre el suelo, esto se consigue utilizando unos conceptos básicos de óptica y otras lentes convergentes. Para conseguir enfocar la imagen del suelo la distancia entre éste y el punto focal de la lente ha de ser mayor que la distancia focal. Con esta condición, para cada posición entre suelo y punto focal, la imagen se proyectará al otro lado entre el infinito y el punto focal. Sólo hay que fijar la distancia que queremos entre lente y suelo y después buscar la posición idónea del CCD al otro lado de la lente de manera que quede enfocada. Para

evitar que entre luz lateral en el sistema de enfoque es necesario tapan el espacio lateral entre lente y CCD con un tubo opaco.

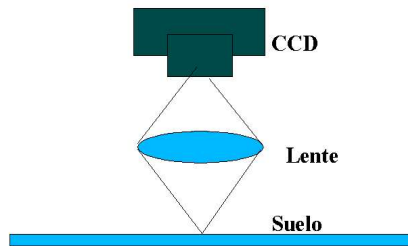


Figura 6. Sistema óptico

Como se ha dicho se emplean dos ratones ópticos para calcular la posición y orientación odométrica. En la figura 7 se muestra un esquema de un incremento de posición y orientación sufrido por el odómetro. Los círculos son ambos ratones antes y después del movimiento. Suponemos que el odómetro proporciona los incrementos de posición lo suficientemente rápidos como para considerar que son muy pequeños. En estas circunstancias podemos aproximar los incrementos de posición local de los ratones como si no existiese giro pues la variación en el giro es muy pequeña y el incremento de giro se puede calcular en base a dichos incrementos.

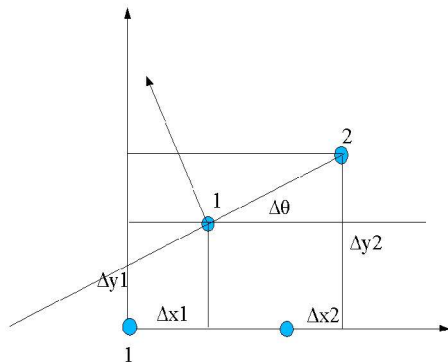


Figura 7. Esquema incremental del odómetro

El incremento en la orientación del odómetro viene dado por la ecuación (3).

$$\Delta \Theta = \arctan((\Delta y_2 - \Delta y_1) / (\Delta x_2 - \Delta x_1))$$

$$\Theta = \Theta + \Delta \Theta \quad (3)$$

Ahora necesitamos pasar los incrementos de posición locales del odómetro a incrementos de posición absolutas. (ver Figura 8) Si tomamos el ratón 1 como origen del sistema de referencia local los incrementos absolutos vienen dados por las ecuaciones (4):

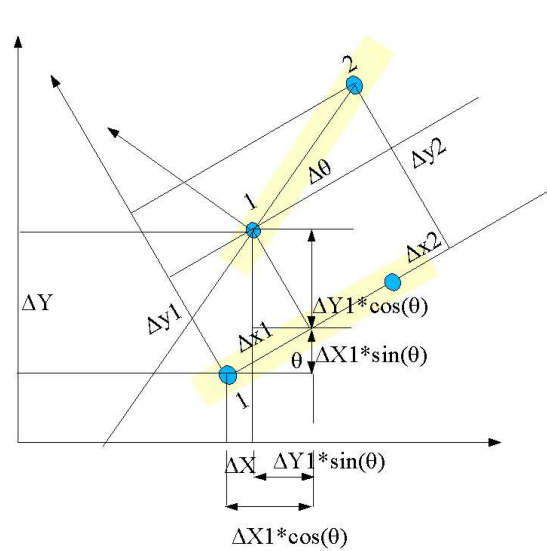


Figura 8. Determinación de la posición absoluta

$$\Delta X = \Delta X1 * \cos(\Theta) - \Delta Y1 * \sin(\Theta)$$

$$\Delta Y = \Delta X1 * \sin(\Theta) + \Delta Y1 * \cos(\Theta)$$

$$X = X + \Delta X$$

$$Y = Y + \Delta Y$$

(4)

Odometría clásica.

A pesar de haber incorporado un odómetro óptico se creyó conveniente aprovechar la información disponible del movimiento de las ruedas a través de los codificadores incrementales de los motores de las mismas.

La odometría óptica por sí sola puede presentar problemas de reflexión del suelo o de que éste sea excesivamente regular, no proyectando una imagen con rasgos distinguibles en el CCD y no pudiendo realizar de esta forma un tracking adecuado del movimiento. Por otra parte, la odometría clásica utilizando las ruedas presenta el problema del deslizamiento de las mismas o de imprecisiones geométricas en el movimiento de rodadura. Sin embargo ambos tipos se pueden complementar aprovechando las ventajas que ambos tienen y compensando entre sí sus inconvenientes.

El objetivo es fusionar la información recibida de ambas odometrías y del sistema GPS para proporcionar una localización estable, precisa y no degenerativa.

2.2 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO ANGULAR

Este sistema es el encargado de orientar el scanner láser en un determinado plano (ver figura 9), además orienta la cámara en una orientación dentro de dicho plano. Consta de 2 motores paso a paso. El primero de ellos permite posicionar con una precisión de 0,001 grados el láser. Este motor está realimentado a través de codificador incremental que está acoplado, como se puede ver en la figura 9, al eje de giro del escaner a través de unas poleas y una correa.

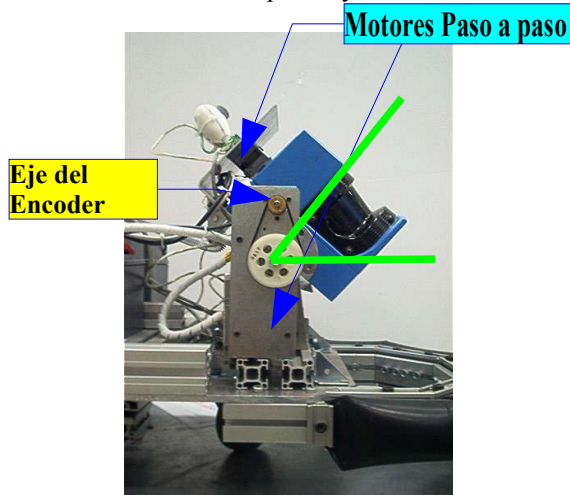


Figura 9. Sistema de posicionamiento angular

El control de los motores lo realiza un circuito microcontrolador a través de un driver de potencia especial para este tipo de motores. Este microcontrolador está programado para controlar 2 ejes paso a paso, uno de ellos con realimentación por codificador incremental y el otro en lazo abierto. El lazo realimentado es el de inclinación del plano del láser mientras que el de lazo abierto, es el de la cámara puesto que las fuerzas que intervienen son menos críticas. Este microcontrolador realiza la función de esclavo en el bus común I2C que comunica el maestro y todos los esclavos de control. Su única función es posicionar 2 ejes accionados por motores paso a paso, de esta manera forma parte del control descentralizado que se persigue en este diseño al igual que el esclavo de control de motores de tracción. Como se puede observar en la figura 10, la cámara está situada en el mismo eje del motor paso a paso, por lo que la resolución en el posicionamiento de la cámara es la misma que la de un paso del motor. Puesto que 1 paso del motor son $1,8^\circ$, esta será la resolución del posicionamiento de la cámara. Además se puede observar que el giro está graduado con una escala angular para poder supervisar de manera visual la posición.

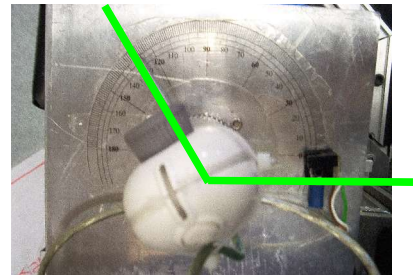


Figura 10. Sistema de posicionamiento de la cámara

Ambos ejes poseen unos optoacopladores en los extremos del recorrido cuyo objetivo es fijar el cero de cada eje.

2.3 SISTEMA DE MEDICIÓN.

Scanner láser.

El dispositivo de medición elegido se trata de un LMS200 de la marca SICK (ver figura 9) con las siguientes características:

- Rango de medición máximo de 80m.
- Resolución angular máxima de 0.25° aunque puede ser elegida entre $0.25^\circ/0.50^\circ/1.00^\circ$.
- Tiempo de respuesta de un escaneo 53ms/26ms/13ms dependiendo de la resolución elegida.
- Error de medición típico de ± 5 mm.
- Comunicación a través de RS232/RS422 (configurable)
- Alimentación a 24V DC.
- Ángulo de barrido de 180° , lo cual proporciona a la máxima resolución un vector de 720 medidas en el plano de barrido.

2.4 SISTEMA DE CONTROL.

La filosofía en el diseño ha sido la de descentralizar cada una de las funciones básicas del sistema pudiéndose añadir más funciones complementarias en un futuro sin verse afectado el resto de módulos. El esquema de control es el que se puede apreciar en el diagrama de bloques de la figura 11.

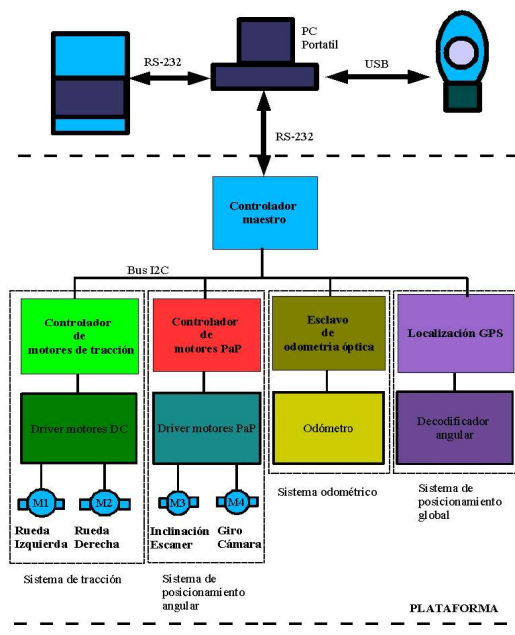


Figura 11. Esquema de control

Dentro del esquema de control hay que distinguir la plataforma que engloba los bloques dentro del rectángulo en línea punteada del resto. Aunque todos estos sistemas vayan embarcados en el robot el procesamiento de toda la información y por decirlo de alguna manera el “cerebro” del mismo es el ordenador portátil. En este ordenador se ejecutarán todos los programas que sincronizarán las poses de la plataforma con la captura de datos del escaner y las instantáneas de la cámara. Además procesará toda esta información para obtener el modelo tridimensional del entorno. Estará conectado por un lado con el escaner a través del puerto RS-232, con la webcam a través del puerto USB y con la plataforma a través de otro puerto USB con adaptador para RS-232 y de esta forma comunicarse con el microcontrolador maestro como si de otro puerto RS-232 se tratase.

La plataforma está compuesta por varios módulos funcionales conectados a un bus I2C. Este tipo de red debe ser comandada por un microcontrolador maestro que es el que sincroniza toda la comunicación con los esclavos. Este maestro es el que está por otra parte conectado al PC por RS-232. De él recibirá las órdenes de posicionamiento y, por otra parte proporcionará la información de estado. Además este microcontrolador es el encargado del cálculo de la odometría clásica.

Cuando el microcontrolador maestro recibe una orden del PC, se comunicará con los esclavos pertinentes para su ejecución.

La información del estado del sistema es proporcionada del maestro al PC de una manera

periódica, de esta forma, si en algún momento el PC pierde comunicación con la plataforma, el maestro lo detectará y ordenará una parada de emergencia.

En la red existen 4 esclavos, cada uno encargado de una tarea distinta: odometría óptica, posicionamiento global, posicionamiento angular de escaner y cámara y control de tracción.

Odometría óptica. El odómetro proporciona la información de movimiento de los dos ratones ópticos que posee al esclavo de odometría, el cual realiza los cálculos y proporciona la posición odométrica al maestro cuando es necesaria. Ambos, odómetro y esclavo de odometría están comunicados a través de su puerto RS-232.

Posicionamiento global. Al igual que sucede en el odómetro, aquí tenemos por un lado el decodificador angular que proporciona información sobre el ángulo, timestamp y código de la baliza detectada al esclavo de posicionamiento global, el cual realiza los cálculos de triangulación proporcionando la posición y orientación del robot al maestro cuando éste la requiera.

Posicionamiento angular de escaner y cámara. Está formado por un esclavo que controla a través de un driver de potencia los motores paso a paso que posicionan el escaner y la webcam. También puede proporcionar la información angular de estos ejes en caso de que sea requerida por el maestro.

Control de tracción. Uno de los esclavos se encargará de controlar los motores de tracción tanto en posición como velocidad a través de los pertinentes drivers de potencia y de esta forma poder controlar la dirección y velocidad a la que queremos que se dirija el robot.

2.5 Resultados experimentales.

A continuación se muestran a modo de ejemplo los resultados del modelado del interior de las instalaciones de Cartif (ver figura 12) y otro del exterior de la fachada de la iglesia de San Pablo en Valladolid (ver figura 13).



Figura 12. Modelado de un pasillo de Cartif



Figura 13. Modelado de la fachada de la iglesia de San Pablo (Valladolid).

Ambos casos son el resultado de la superposición de las imágenes captadas con la webcam a modo de textura sobre la nube de puntos. El aspecto que presenta la nube de puntos tomada con el escaner en el caso del pasillo se puede apreciar en la figura 14.

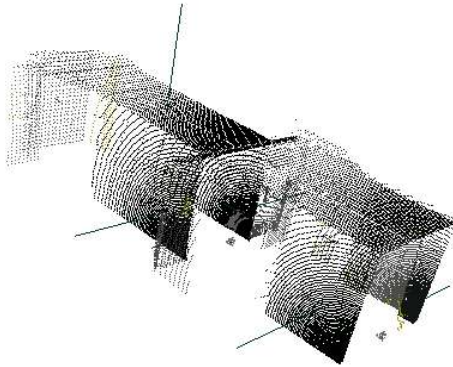


Figura 14. Nube de puntos 3D capturados con el escaner.

Conclusiones.

La construcción de esta plataforma supone una gran ayuda a la hora de construir modelos tridimensionales de diversos entornos que luego pueden servir de gran utilidad para un buen número de aplicaciones entre las que cabe reseñar la disposición de estos modelos para la reconstrucción del patrimonio histórico-artístico de fachadas o interiores de edificios monumentales, o simplemente para disponer de un modelo virtual de diversos entornos 3D por los que podremos navegar con ayuda del ordenador y que pueden tener aplicación didáctica.

Referencias.

- [1] H.Hoppe, Surface reconstruction from unorganized points, Ph.D. thesis, University of Washington (1994).
- [2] H. Dinh, G. Turk, A sampling of surface

reconstruction techniques, Tech. Rep.

- [3] M. Hebert, R. Hoffman, A. Johnson, J. Osborn, Sensor based interior modeling, in: American Nuclear Society 6th Topical Meeting on Robotics and Remote Systems (ANS '95), 1995, pp. 731 – 737.

- [4] Y. Liu, R. Emery, D. Chakrabarti, W. Burgard, S. Thrun, Using EM to learn 3D models with mobile robots, in: Proceedings of the International Conference on Machine Learning (ICML), 2001.

- [5] L. Iocchi, K. Konolige, M. Bajracharya, Visually realistic mapping of a planar environment with stereo, in: Proc. of the seventh International Symposium on Experimental Robotics. Hawaii, 2000.

- [6] D. Hähnel, W. Burgard, S. Thrun, Learning compact 3D models of indoor and outdoor environments with a mobile robot, in: Proceedings of the fourth European workshop

on advanced mobile robots (EUROBOT '01), 2002.

- [8] E.Zalama, G.Candela, J. Gómez, J.R.Perán, Concurrent mapping and localization for mobile robots with segmented local maps, in: Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2002, pp. 546–551.

- [7] C. Stachniss, W.Burgard, Using coverage maps to represent the environment of mobile robots. Univ. of Freiburg.

- [9] K.Konolige, Improved occupancy grids for map building, Autonomous Robots 4 (1997) 351–367.

- [10] S.Thrun, W.Burgard, D.Fox, A probabilistic approach to concurrent mapping and location for mobile robots, Machine Learning 31/5 (1998) 1–25.

- [11] H. Surmann, K. Lingemann, A. Nuchter, J. Hetzberg, A 3D laser finder for autonomous mobile robots, in: Proceedings of the 32nd International Symposium on Robotics, Seoul, Korea, 2001, pp. 153–158.

- [12] H. Surmann, K. Lingemann, A. Nuchter, J. Hetzberg, Fast acquiring and analysis of three dimensional laser range data, in: Proceedings of the 6th International Fall Workshop Vision, Modelling, and Visualization 2001, Stuttgart, Germany, 2001, pp. 59–66.

[13] E. Zalama, S. Dominguez, J. Gómez, J. Perán,
A new beacon navigation system, in:
Mechatronics and Machine Vision 2002: Current
Practice, Research Studies Press
Ltd, Baldock, 2002, pp. 263–270.