

CONFIGURACIÓN Y CONSTRUCCIÓN SISTEMÁTICA DE UN VEHÍCULO AUTÓNOMO PARA LA MINERÍA

Joaquín Gutiérrez José Luis Gordillo

Centro de Inteligencia Artificial, ITESM Campus Monterrey

Av. Eugenio Garza Sada 2501 Sur C.P. 64849

Monterrey, N.L., México, tel. (52)(81) 8384379

joaquina@cia.mty.itesm.mx, gordillo@campus.mty.itesm.mx

RESUMEN

Se describe el desarrollo de un Vehículo Autónomo. Para obtener la configuración del vehículo se aplica una metodología sistemática que traduce la tarea del ambiente de trabajo en la síntesis del Vehículo Autónomo. El proceso de síntesis usa la descripción geométrica de la tarea y del ambiente para generar una serie de posibles configuraciones, compuestas por los grados de libertad necesarios para llevar a cabo la tarea. Un análisis de cada composición determina la configuración dominante. Cada grado de libertad de esta configuración se traduce en un componente específico a través de expresiones matemáticas que relacionan los requerimientos y propiedades de la tarea y del ambiente con las características de los componentes. Una tarea en el ámbito minero sirve como ejercicio para demostrar la metodología.

1 INTRODUCCIÓN

Los Vehículos Autónomos (VAs) son requeridos para realizar tareas en ambientes peligrosos o alejados y en aplicaciones donde los robots estacionarios están limitados. Los VAs pueden trasladarse a una área deseada y ejecutar cierta clase de trabajo; como, recopilación de datos, manipulación de herramientas, etc. A pesar del potencial que presentan, incluyendo razones de seguridad y productividad, su uso no es extenso, debido a la complejidad del proceso de diseño y que estos se basan ampliamente en la experiencia de los diseñadores. La alternativa es desarrollar procesos prácticos para su construcción.

En este artículo un proceso sistemático de síntesis es formulado. La síntesis se centra en la generación de la configuración y construcción de VAs, basada en el análisis de la tarea,



Fig. 1. Metodología para la Síntesis de Ve-

la geometría de las operaciones y restricciones importantes para su diseño y construcción. El uso de la metodología pretende sistematizar la construcción de VAs, aprovechando la universalidad de los vehículos y el inventario de productos desarrollados durante décadas de ingeniería.

Existen precedentes en la automatización de vehículos mineros [4, 7, 9]. Así como investigación sobre la configuración de robots basada en la tarea [2, 6]. El diseño de robots móviles usando componentes modulares y algoritmos genéticos también han sido explorado [3, 5]. El diseño analítico de un sistema de locomoción de un vehículo es presentado en [1]. Sin embargo se requieren de metodologías para la configuración racional.

La metodología transforma la descripción geométrica de la tarea en los grados de libertad necesarios para realizarla en un componente específico. El artículo es organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se describe la Metodología. La sección 3 presenta

su aplicación a la tarea de la actualización topográfica de túneles. En la sección 4 se describe el Prototipo. Los resultados son presentados en la sección 5. Finalmente se presentan las conclusiones en la sección 6.

2. METODOLOGÍA

La metodología para la síntesis de VAs (figura 1), consiste del módulo de Abstracción de la Tarea que recibe la descripción de la tarea y del ambiente de trabajo; a partir de la cual se genera los requerimientos de configuración y la descripción geométrica, que son transformados por el módulo de Análisis del Sistema en términos de los movimientos o grados de libertad requeridos para llevarla a cabo. Formando las posibles configuraciones (patrón de configuraciones). Se evalúa cada configuración para seleccionar la composición dominante (configuración básica), usando criterios de simplicidad y uniformidad de su Espacio de Configuración (Espacio-C), generando los parámetros de configuración, como

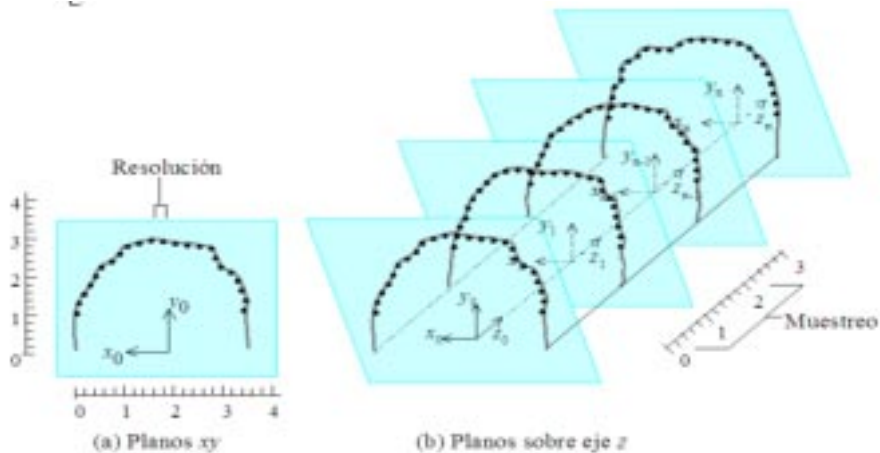


Fig. 2. Definición de la tarea de Actualización Topográfica de un Túnel, como la generación de planos xy (a) y proyectados sobre el

longitud, rango, etc. Los requerimientos y los parámetros de configuración son utilizados por el módulo de Diseño del Sistema como métricas para seleccionar cada componente, implicando expresiones matemáticas que los relacionan con las características de los componentes (requerimientos de componentes) de un inventario con actuadores, sensores, plataformas móviles y elementos de control.

Como salida, la metodología integra los componentes a uno de los subsistemas funcionales (Locomoción, Posicionamiento y Herramienta) del esquema genérico de un Vehículo Autónomo (figura 5). Además se proporciona la estrategia básica, incluyendo esquemas de control para realizar la tarea con cierto grado de autonomía.

La configuración y los esquemas son refinados a través de una fase de experimentación y de ejecución misma de la tarea en el ambiente real de operación.

3 DESARROLLO

A continuación se describe el ejercicio de la metodología aplicada a la tarea de actualización topográfica de un túnel. En este ejercicio es de interés únicamente la medición de las paredes del túnel.

3.1. Abstracción de la tarea

La actualización topográfica del túnel consiste en hacer mediciones del perfil del túnel. Las especificaciones de la tarea se presentan en la figura 2, estableciendo los requerimientos de configuración a satisfacerse, como una resolución menor a 0.01 m a intervalos de 2 m, y la restricción de no incluir combustibles como fuente de poder. La tarea se interpreta físicamente como la valoración dimensional del volumen de la mina, mediante la generación de planos xy (2D) proyectados sobre el eje z , figura 2. La proyección se expresa geoméricamente en un espacio de tres dimensiones (3D) en un sistema

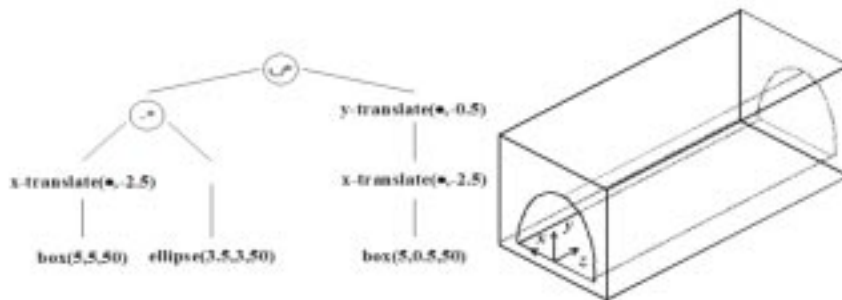


Fig. 3. Descripción Geométrica de un Túnel Gén-

de coordenadas, donde la descripción geométrica del túnel y la tarea es generada por geometría constructiva de sólidos, usando operaciones Booleanas y movimientos básicos sobre instancias primitivas estándares (figura 3).

3.2 Análisis

La etapa consiste en la identificación de los movimientos requeridos para resolver la tarea, a partir de su descripción geométrica, analizando exclusivamente los movimientos y abstrayendo la estructura del artefacto. Se busca determinar el número y tipo de grados de libertad (GDL), cuya composición solucione la tarea, con un mínimo de complejidad.

El análisis comienza con la combinación de tres movimientos básicos, rotación (R) o translación (P), debido a que la actualización físicamente se obtiene en un espacio 3D. La figura 4 muestra los patrones de configuraciones generados: (a) cartesiano ($P_1P_2P_3$), (b) cilíndrico ($P_1R_2P_3$) y (c) articulado ($R_1R_2R_3$), con su Espacio-C correspondiente. La

selección de la composición dominante radica en la simplicidad del Espacio-C. La configuración $P_1R_2P_3$ presenta un Espacio-C con un barrido más uniforme (figura 4 centro), con un menor rango de operación y asociado a una función de segundo orden, a diferencia del resto que requieren un mayor orden y complejidad. Otro elemento por considerar es su estabilidad. El movimiento P_2 de la composición $P_1P_2P_3$ (figura 4 izquierda) debe soportar al tercer movimiento por una mayor distancia.

Un artefacto con estas características es más complejo de construir, debido a que la estructura tiene que ser rígida y requiere de un contrapeso para mantener su centro de gravedad o instalar infraestructura extra en la mina. El arreglo $R_1R_2R_3$ (figura 4 derecha) muestra una desventaja substancial, no se mueve a lo largo del túnel, por lo que no cumple con la tarea.

La selección es el patrón cilíndrico ($P_1R_2P_3$) como la configuración básica. El movimiento P_1 es ejercido sobre el eje z con incrementos Dz y transportar al resto de los movimientos; por lo tanto

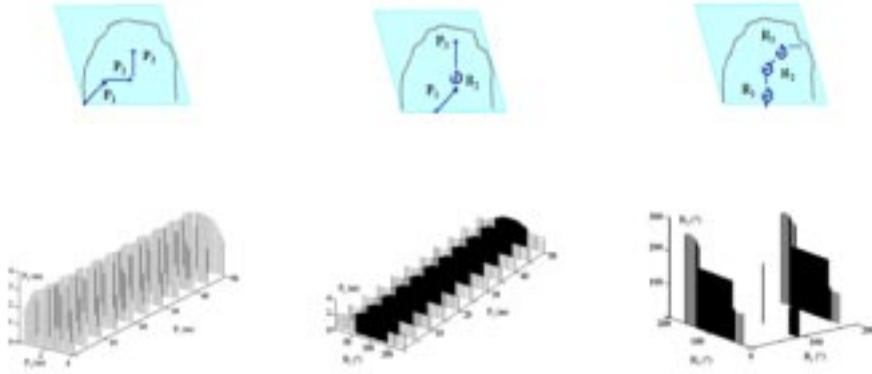


Fig. 4. Generación de Configuraciones para realizar la ta-

es mapeado al subsistema de Locomoción. El segundo movimiento es rotacional realiza sobre el mismo eje z con incrementos Dq y transporta al ultimo movimiento y conforma el subsistema de Posicionamiento. P_3 es lineal y esta relacionado directamente a la medición e identificado como la Herramienta. Estas especificaciones representan en forma procedural la estrategia básica para realizar la tarea.

3.3 Diseño

Para sintetizar la configuración básica se evalúan los componentes que satisfagan las especificaciones para cada uno de sus movimientos. Haciendo uso de un inventario de componentes: sensores, actuadores y de vehículos disponibles. Dado que el movimiento P_3 es soportado por el movimiento R_2 y ambos por el primer

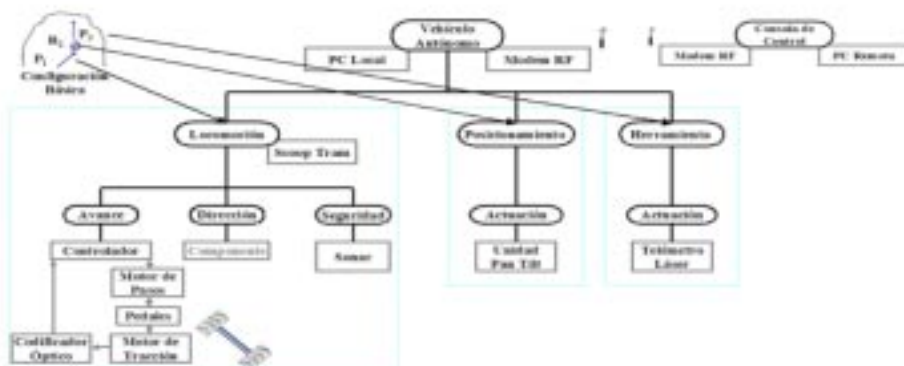


Fig. 5. Integración de los componentes seleccionados a un subsistema funcional de Locomoción, Posicionamiento y Herramienta, conformando el esquema genérico de un Vehículo

movimiento P_1 , el análisis y selección se desarrolla de orden inverso a la ejecución de la configuración.

3.3.1 Tercer Movimiento (P_3): Herramienta

El movimiento P_3 es analizado como el instrumento de medición. La opción es la utilización de medidores de contacto y telémetros. Por mayor simplicidad en su operación, los telémetros presentan una ventaja con respecto a los de contacto. Los trabajos realizados por Scheduling [9] muestran que los telémetros láser o ultrasónicos pueden utilizarse en los ambientes difíciles de una mina. Sin embargo, la precisión otorgada por los telémetros láser supera a los ultrasónicos. En este ejercicio se cuenta con un telémetro láser que cumple con las especificaciones. El modelo Sentinel 100, fabricado por la compañía Optech, tiene un rango de 0.2 hasta 250 m, una precisión de 0.03 m, un peso de 0.6 kg y opera en ambientes con polvo, niebla o vapor.

3.3.2 Segundo Movimiento (R_2): Posicionamiento

El láser debe estar acoplado un grado de libertad que le permita girar en el eje z. Para lograr este movimiento rotacional las opciones son la utilización de un motor CA, DC, de pasos, o bien la utilización de una unidad rotatoria PTU (Pan Tilt Unit), por facilidad de control y cumplimiento de los requerimientos para el movimiento R_2 , relacionado a la capacidad de carga y precisión, la unidad rotatoria PTU es seleccionada. La unidad Pan-Tilt modelo PTU-46-

17.5 es fabricada por Directed Perceptions, Inc., con una capacidad de cargar 1.81kg, a una velocidad máxima de 300 °/s y resolución de 0.051°.

3.3.3 Primer Movimiento (P_1) Locomoción

Para obtener el perfil completo del túnel es necesario ejecutar el movimiento translacional (P_1). La selección del componente debe considerar las situaciones adversas de la mina y transportar los componentes seleccionados, así como los dispositivos para su control y operación. Por las propiedades del terreno las opciones están limitadas a vehículos todo terreno y aquellos dedicados a la minería, quedando fuera los robots móviles usados en laboratorios; por ejemplo, el NOMAD 200 (Nomadic Technologies) presenta desventajas para navegar en este tipo de terreno por las dimensiones de sus ruedas y su elevado centro de gravedad.

La mejor opción disponible es un vehículo minero LHD, diseñado específicamente para las condiciones requeridas. La figura 7 muestra el vehículo eléctrico LHD modelo «Scoop Tram», con operación hidráulica, un peso de 5 toneladas y una capacidad de carga de hasta 16 toneladas.

4 ARQUITECTURA DEL SISTEMA: Prototipo

Con la selección de los componentes se lleva a cabo la construcción del Vehículo Autónomo. La figura 5



Fig. 6. Construcción del Vehículo Autónomo, consiste del vehículo “scoop tramp”, la unidad PTU y el telémetro láser, así como de los componentes necesarios para

muestra la arquitectura y los subsistemas principales. La consola de control es una computadora remota (PC-remota) donde se establecen los comandos de alto nivel, enviados por un enlace de radiofrecuencia a la computadora local (PC-local) del vehículo y operar los subsistemas de Locomoción, Posicionamiento y Herramienta. El Módulo de Comunicación que establece el canal de radio enlace half-duplex entre ambas computadoras, constituyen dos módems de Radio Frecuencia (RF), de diseño propio, con velocidad de 1200 baudios conectados a los

puertos seriales respectivamente. El subsistema de Locomoción tiene como finalidad ordenar y supervisar los movimientos de avance y alto del vehículo. La velocidad y sentido del vehículo depende de la posición en un par de pedales, los cuales activan los actuadores hidráulicos. El módulo de avance desarrollado activa los pedales a través de un mecanismo electromecánico, conformado por dos motores de pasos y un juego de tensores y poleas. Un codificador óptico de Danaher Controls Inc., a 600 pulsos por revolución se utiliza para cerrar el lazo de control, el cual es acoplado a la transmisión. Para

incrementar la seguridad se adapta un detector de obstáculos basado en el sonar Polaroid 6500. El detector envía a la computadora local una señal de alto cuando un obstáculo aparece en la trayectoria del vehículo. Fig. 6. Construcción del Vehículo Autónomo, consiste del vehículo "scoop tramp", la unidad PTU y el telémetro láser, así como de los componentes necesarios para su operación.

El subsistema de Posicionamiento y Herramienta están conformado por la unidad PTU y el Telémetro láser respectivamente, ambos son controlados por la PC local por donde se transmiten los comandos y se reciben las mediciones de distancia. La información recabada se utiliza para obtener el modelo tridimensional de los túneles de la mina. La computadora local es una PC-Pentium a 133 MHz, con 32 MB de RAM y el sistema operativo Windows 95, con tres puertos seriales, destinado a controlar la PTU, el telémetro láser y la comunicación, y un puerto paralelo para controlar el sonar, codificador óptico y activar los pedales de avance. La PC remota es una computadora IBM-386 a 66 MHz, con 32 MB de RAM, un puerto serial, un puerto paralelo y Windows 95 como sistema operativo. Los programas de control se realizaron en Turbo C++ v3.0 y conforman una extensión de la estrategia básica especificada en la sección del Análisis del Sistema.

5 EXPERIMENTACIÓN

La sección reporta los resultados

obtenidos durante las experimentaciones, tanto en las instalaciones del ITESM, como los obtenidos en un túnel real. La representación gráfica de las mediciones se realizó utilizando un graficador programado en Java 3D.

La integración del Vehículo Autónomo (figura 6) se realizó en el sótano del edificio del CEDES en el Campus Monterrey. La configuración fue refinada mediante la serie de experimentaciones con forme a la estrategia básica.

Las pruebas en el ambiente real se efectuaron en el túnel principal de la mina «Las Golondrinas». Durante la ejecución de los experimentos se establecieron las condiciones iniciales en la consola remota, transmitiendo los comandos al Vehículo Autónomo. Cada metro el vehículo efectuaba un alto para realizar 15 mediciones con el telémetro láser separadas 10°. La distancia total recorrida por el vehículo fue de 15 metros (figura 7). Las medidas resultantes son aproximadas puesto que se consideró que el piso de la mina es un plano.

Los resultados principales de las pruebas son un aumento de hasta el 20 % en exactitud, con respecto a los métodos manuales. Otro aspecto importante es la disponibilidad de los datos, la cual es prácticamente en tiempo real, debido a que se genera y procesa digitalmente, por lo tanto el cómputo de la información es más rápido. Si bien el LHD representa una buena opción, existen otras alternativas como vehículos todo terreno de menor dimensiones y costo (e.g., una cuatrimoto). Para darle mayor precisión

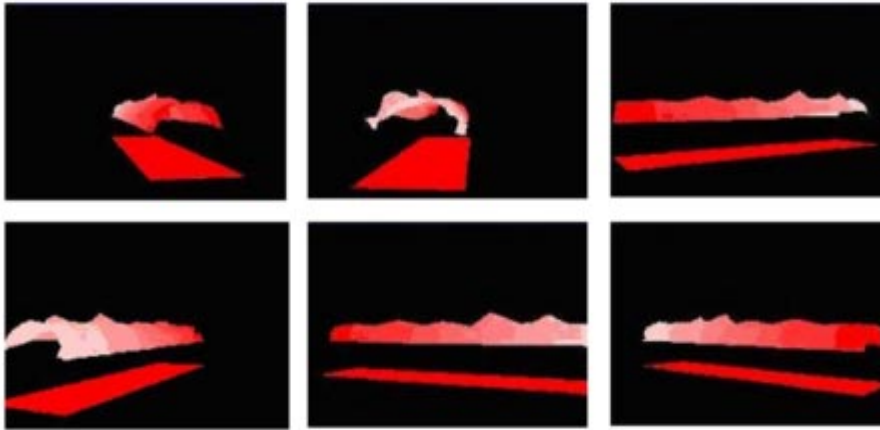


Fig. 7. Diferentes vistas del resultado obtenido en la mina “Las Golondrinas” del Grupo Peñoles. La banda inferior representa el piso de la mina y la parte superior muestra las irregularidades del techo o cielo del túnel

a la localización del vehículo dentro de la mina deben usarse sistemas inerciales de navegación que otorguen la orientación absoluta del vehículo, auxiliándose de marcas en los túneles como en [8].

6 CONCLUSIONES

Se ha presentado el trabajo para el desarrollo de un Vehículo Autónomo aplicando una metodología para su configuración y construcción. Con base en los resultados obtenidos se puede concluir que: (a) La metodología configuró un vehículo para de realizar la tarea. Identificando la mejor composición de movimientos básicos, los componentes para desarrollar cada uno de estos movimientos y la estrategia básica de operación. (b) La

aplicación de esta metodología facilitó la construcción del Vehículo Autónomo para resolver la tarea; explotando la universalidad de los vehículos convencionales. (c) La metodología sistematizada sugiere que los componentes (mecánicos, electrónicos, sensores, actuadores, módulos de control y programas de cómputo) se podrán seleccionar y ensamblar con mayor rapidez, haciendo práctica la construcción de Vehículos Autónomos. (d) El resultado del concepto cilíndrico ($P_1R_2P_3$), seleccionado por la metodología se aproxima a lo que generalmente se obtendría intuitivamente. (e) La configuración del sistema para la actualización topográfica del túnel es factible y ahorra tiempo en el proceso, presentando mayor precisión.

R E F E R E N C I A S BIBLIOGRÁFICAS

1. Apostolopoulos, D.: Analytical Configuration of Wheeled Robotic Locomotion. Ph.D. thesis, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh PA. (2001)
2. Chedmail, P., and Ramstein, E.: Robot Mechanisms Synthesis and Genetic Algorithms. Proc. of the 1996 IEEE Robotics and Automation Conference. (1996) 3466-3471
3. Farritor, S., Dubowsky, S., and Rutman N.: On the Design of Rapidly Deployable Field Robotic Systems. Proceedings of the 1996 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering Conferences. (1996)
4. Hurteau, R., and St-Amant M.: Optical Guidance System for Underground Mine Vehicle. IEEE Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation, Nice France (1992) 639-644
5. Leger, P.C., and Bares, J.: Automated Task-Based Synthesis and Optimization of Field Robots. Proceedings of the 1999 International Conference on Field and Service Robotics (FSR99), Pittsburgh PA. (1999)
6. Paredis, C., and Khosla, P.: Synthesis Methodology for Task Based Reconfiguration of Modular Manipulator Systems. Proceedings of the International Symposium on Robotics Research, Hidden Valley PA. (1993)
7. Petty, M. K., Billingsley, J., Tran-Cong, T.: Autonomous LHD Loading. Proceedings of the 4th Annual Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP'97). (1997)
8. Scheduling, S., Dissanayake, G., Nebot E., and Durrant-Whyte, H.: Slip Modelling and Aided Inertial Navigation of an LHD. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 20-25 April, Albuquerque NM USA. (1997)
9. Scheduling, S., Nebot, E. M., Stevens, M., Durrant-Whyte, H., Roberts, J., Corke, P., Cunningham, J., Cook, B.: Experiments in Autonomous Underground Guidance. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque N. Mexico., (1997) 1898-1903