

SUPERVISIÓN, TELEOPERACIÓN Y NAVEGACIÓN DE VEHÍCULOS INDUSTRIALES Y SU INTEGRACIÓN EN EL SISTEMA DE GESTIÓN

Leopoldo Armesto, Marta C. Mora, Josep Tornero

*Dept. Ingeniería de Sistemas y Automática.
POB:46022 Camino de vera s/n.
Univesidad Politécnica de Valencia
{leoaran,marmoag,jtornero}@isa.upv.es*

Resumen: La gestión del transporte y su automatización afectan de manera importante al proceso productivo. En este artículo se ha desarrollado una solución global que permite automatizar los procesos de gestión y de transporte en almacenes, integrándolos en el sistema de información de la empresa. En concreto, dentro de la automatización del transporte, se ha desarrollado aplicaciones modulares conectadas entre sí en una arquitectura software y hardware común. En los módulos desarrollados destacan: una aplicación de gestión óptima de las ubicaciones, una aplicación SCADA que supervisa los movimientos de los vehículos dentro de la planta, una aplicación de teleoperación que permite combinar imágenes virtuales y reales, una aplicación de navegación que dirige los vehículos hacia sus destinos evitando colisiones, etc. En el desarrollo de estos módulos se ha implementado técnicas conocidas de fusión sensorial con filtro de Kalman, generación de mapas, campos potenciales artificiales, programación lineal y dinámica, etc. *Copyright*© 2005 CEA-IFAC.

Palabras clave: Automatización, robots móviles, supervisión, teleoperación, navegación.

1. INTRODUCCIÓN

Las crecientes expectativas de los clientes en cuestiones de calidad, la reducción de los plazos de entrega, la gestión eficiente del tiempo y de los recursos exigen la permanente adaptación de la estructura empresarial a los cambios del mercado

y a las innovaciones tecnológicas, sometiéndolas a constantes procesos de reingeniería. Se prima cada vez más la competitividad de las empresas que, si no actualizan su tecnología, quedan obsoletas y son incapaces de alcanzar las cuotas de mercado de sus competidoras. La clave para la supervivencia de la empresa está en adoptar una posición más cercana a las necesidades del cliente, reduciendo los retrasos tanto en la entrega de productos como en los servicios suministrados.

La Logística Integral implica una organización eficiente tanto de los flujos de mercancía como de los

⁰ Este trabajo ha sido financiado por dos proyectos de investigación del Ministerio de Ciencia y Tecnología: "Automatización de los Procesos de Transporte en PYMES"(Ref. 1FD97-1136) y "Sistema de Automatización Integral para la Gestión del Transporte de Materiales (AutoTrans)"(DPI2000-0362-P4-05)

flujos de información (pedidos, servicios, recepción, transporte, etc.). En general las PYMES utilizan, para el transporte interno de palets, carretillas elevadoras manuales, tripuladas por un operario. Una incorrecta distribución de la planta industrial suele derivar en distancias mayores de las necesarias lo que conduce a un uso poco eficiente de recursos, tanto humanos como materiales. La utilización de vehículos autoguiados pretende básicamente una reducción de costes de mano de obra al tiempo que reducir la aleatoriedad introducida por el conductor de las carretillas.

En este artículo, se presenta una solución global de automatización del proceso transporte en almacenes, así como su integración en el sistema de información de la empresa (ERP: Enterprize Resources Planning). El propósito fundamental de esta aplicación consiste en unificar los planes de producción, la gestión del almacén y la automatización del transporte basado en una flota de carretillas industriales.

Para la automatización del transporte, se han desarrollado diferentes aplicaciones con una arquitectura software y hardware común:

- De gestión óptima de ubicaciones integrada en el sistema de información de la empresa.
- SCADA realizando la supervisión de los vehículos dentro de la planta y actúa de interfaz entre el ERP y los vehículos.
- De teleoperación permitiendo combinar imágenes virtuales y reales.
- De localización y construcción del mapa del entorno mediante SLAM.
- De planificación global y local de movimientos mediante técnicas de programación dinámica y Campos Potenciales Artificiales, que combinadas permiten guiar a los vehículos hacia sus destinos evitando obstáculos.

2. GESTIÓN ALMACEN

Los sistemas de información tipo ERP están diseñados para mejorar la gestión empresarial en todos sus ámbitos; integran todos los departamentos y funciones de la compañía en un paquete software, particularizado a las necesidades de cada departamento. La instalación de un ERP desencadena importantes cambios en la empresa ya que modifica su administración, la interacción entre sus divisiones internas, su respuesta frente al mercado, etc. En la presente implementación, se ha seleccionado el software comercial KEWAN (de Dimensión Informática), especialmente adecuado

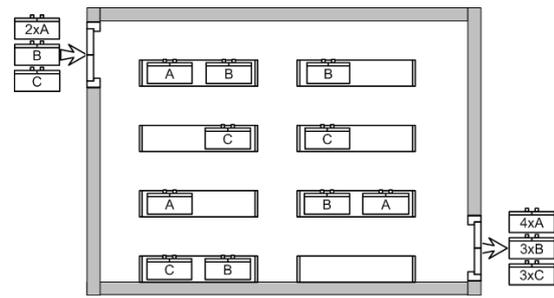


Figura 1. Ejemplo de almacén con pedidos de carga y descarga

para PYMES. Cada módulo es de instalación independiente y abarca un área de aplicación específica, permitiendo así la adaptación del software a las necesidades de la empresa. El KEWAN soporta los motores de base de datos más extendidos (Oracle, Informix, SQL-server...) y se basa en una filosofía cliente/servidor. El servidor centraliza los datos y gestiona el acceso de distintos clientes a la base de datos, además de generar todos los documentos utilizados por la compañía. Se han instalado los módulos logístico, financiero y de producción, que permiten conectar con la gestión integral del almacén.

Con el fin de minimizar pérdidas de tiempo, errores y desorganización en el almacén, se ha desarrollado una aplicación para la optimización de ubicaciones dentro del almacén basada en técnicas de programación lineal binaria. Esta aplicación está integrada dentro del sistema de información, de manera que se minimicen dichos tiempos, según las diferentes entradas y salidas de material que requiera la empresa. La solución adoptada pasa por minimizar un índice compuesto que representa los costes asociados a las operaciones de transporte, carga y descarga. Gráficamente se muestra el propósito del módulo de optimización de ubicaciones para un caso sencillo. En concreto, se dispone de un almacén tipo como se muestra en la 1, con una ocupación de las ubicaciones (estado almacén) determinada. Si se requiere realizar, de acuerdo a la planificación de

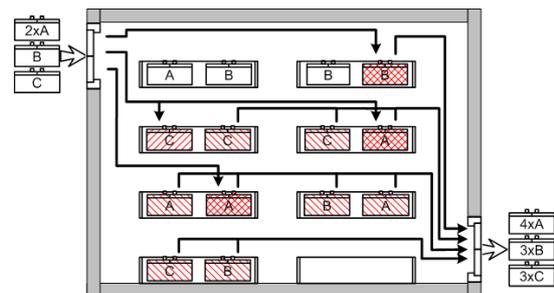


Figura 2. Ejemplo de resultado optimización de ubicaciones

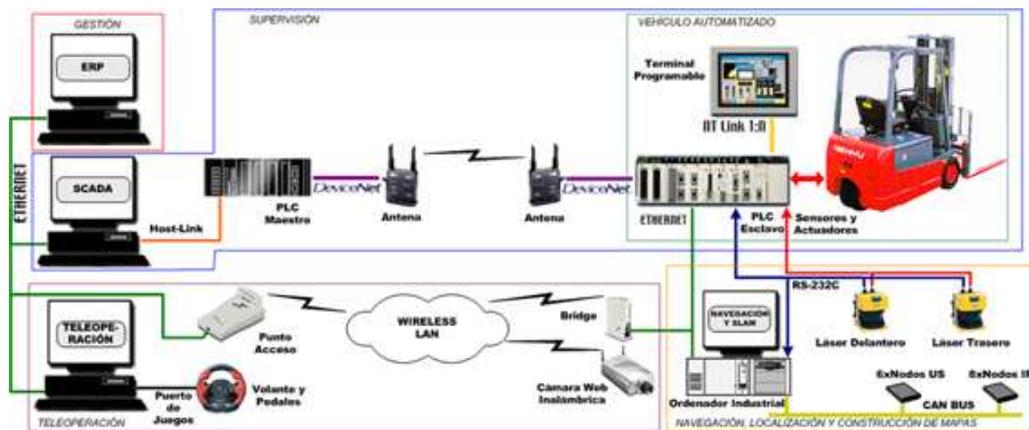


Figura 3. Arquitectura hardware de la aplicación completa

la empresa, unas operaciones de carga de productos (2 de A, 1 de B y 1 de C) y descarga determinadas (4 de A, 3 de B y 3 de C). La operación de descarga está condicionada a la carga, es decir, se asume que primero se cargan los materiales y después se descargan. Los costes de cada ubicación están asociados al desplazamiento/tiempo requerido para su transporte. Un ejemplo de optimización de ubicaciones se muestra en la figura 2 según los criterios especificados.

3. ARQUITECTURA HARDWARE Y SOFTWARE

La arquitectura hardware desarrollada, se muestra en la Figura 3, para el caso de una sola carretilla. El ERP determina en última instancia las órdenes de movimiento de material que deben de realizar los operarios manualmente o las carretillas de forma autónoma. Éstos movimientos son enviados, a través de un fichero XML a una aplicación SCADA, que se encarga de hacer de interfaz entre el sistema de gestión y los vehículos, además de realizar las funciones propias de monitorización y supervisión.

El SCADA transmite a un PLC (CJ1M de OMRON) las órdenes recibidas, contemplando el tipo de producto, la ubicación origen y destino, la cantidad a transportar, el tiempo previsto requerido, etc. Este PLC es el maestro de una red DeviceNet en la que los esclavos son PLCs instalados en los vehículos industriales (CS1 de OMRON). La comunicación entre el maestro y los esclavos se realiza mediante antenas inalámbricas DeviceNet. Cada PLC esclavo realiza el control del vehículo en el que está ubicado, interactuando con sus sensores y actuadores. Cada vehículo posee un terminal programable conectado al PLC que actúa como interfaz con el operario.

La carretilla industrial utilizada posee tres ruedas (dos delanteras y una trasera orientable) accionadas por motores de corriente continua. Un diferencial eléctrico gobernado por el pedal de aceleración controla los motores delanteros, mientras que una palanca establece el sentido del vehículo (avance, neutro y retroceso). El control de la rueda trasera se realiza electromecánicamente acoplado al volante con un potenciómetro. Mediante un sencillo mecanismo de relés industriales, se conmuta entre las señales de mando originales del vehículo y las generadas por el PLC para el modo autónomo.

Como sensorización adicional se han instalado dos encoders incrementales, que miden la velocidades de las ruedas delanteras, y un encoder absoluto, que mide la orientación de la rueda trasera. Además se utilizan dos sensores láser de telemetría con un alcance de unos 50 m. Estos sensores poseen unas salidas digitales que se activan cuando se produce una intrusión en dos zonas configurables (de aviso y de protección). También proporcionan información de distancia que es utilizada para construir el mapa del entorno y autolocalizar al vehículo. Un bus de 6 sensores de ultrasonidos (US) y 8 infrarrojos (IR) complementa las zonas de detección láser. Cada sensor se integra en un nodo CAN compuesto

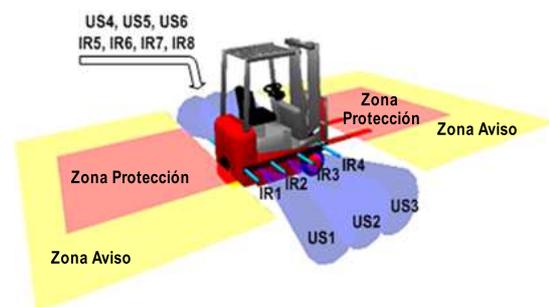


Figura 4. Áreas de Protección

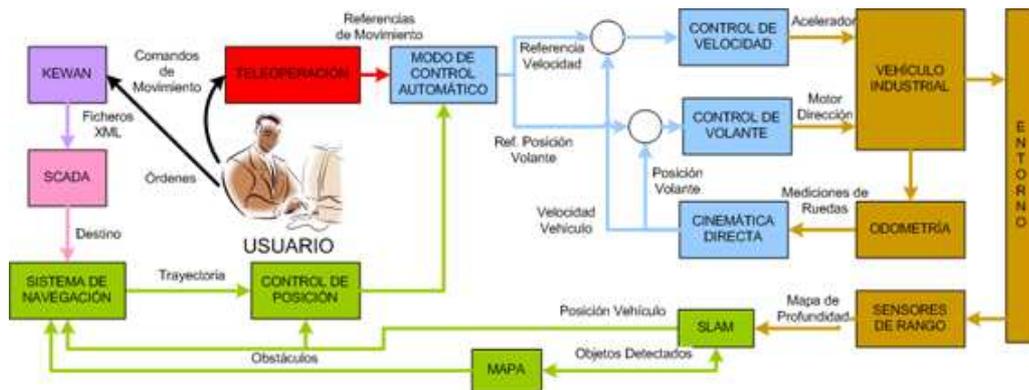


Figura 5. Arquitectura Software de la aplicación completa

por un μC (PIC16F87 de Microchip), además de un controlador y un driver de CAN respectivamente. Concretamente, los nodos de US utilizan el sensor Polaroid y su kit de disparo de la serie 6500. El μC básicamente se encarga efectuar los disparos de ondas ultrasónicas del sensor, detectar la recepción del eco devuelto, calcular la distancia a los objetos mediante el tiempo de vuelo (TOF) y transmitir la medida a través del bus CAN. Los sensores de IR (GP2D de SHARP) también miden la distancia a los objetos, aunque no un rango de alcance mucho menor, 8 m. para los US frente a 70 u 80 cm. para los IR. En la figura 4 se muestra la configuración de los sensores, así como sus áreas de protección.

Un ordenador industrial sobre el vehículo gestiona nodos CAN y la información de los láser de telemetría. Este ordenador, es el encargado de los módulos de localización y construcción de mapas, así como el de planificación, genera en última instancia las referencias de velocidad de los motores para el control del vehículo. Dichas referencias de control van directamente a los PLCs. Por otro lado, un ordenador central con un volante y unos pedales, conectado inalámbricamente con el vehículo, implementa la aplicación de teleoperación.

Una de las principales ventajas de la arquitectura propuesta es que es completamente modular y por tanto, pueden implantarse algunos de sus módulos de forma independiente según las necesidades de la empresa. En este sentido, los módulos de teleoperación y navegación, autolocalización y construcción de mapas son independientes. El módulo de supervisión puede también integrarse con el resto de módulos.

En la arquitectura software de la Figura 5 se puede distinguir varios módulos que funcionan en los distintos PCs y PLCs del hardware. Por un lado, se dispone del ERP, descrito en la sección 2, que permite la realización de la gestión del almacén de modo

que, a partir de los partes de transporte, transmite a una aplicación SCADA los órdenes de movimiento de los vehículos. La aplicación SCADA, que se describe en la sección 4, monitoriza las posiciones de los vehículos y además se encarga de transmitirles las órdenes de movimiento de forma inalámbrica a cada vehículo. Para el control autónomo (o semiautónomo) de los vehículos, se han desarrollado dos aplicaciones: una de teleoperación y otra de navegación. El módulo de teleoperación se describe en la sección 5, mientras que el módulo de navegación se describe en la sección 7. Estas dos aplicaciones, requieren de la correcta autolocalización del vehículo dentro del almacén. Con este fin, se ha desarrollado una aplicación para la localización y construcción de mapas basado en SLAM, reseñada en la sección 6.

4. SUPERVISIÓN DE LA PLANTA

Para la supervisión general del almacén se ha desarrollado una aplicación SCADA completa que incluye un terminal programable en cada vehículo como interfaz hombre-maquina. La aplicación SCADA, se ha desarrollado mediante el CxSupervisor (de OMRON).

4.1 Aplicación SCADA

La aplicación SCADA utiliza una pantalla principal de interfaz como se representa en la Figura 6, mostrándose una distribución de planta con los distintos departamentos, estanterías de almacenaje y vehículos en su ubicación real. La información del estado de cada vehículo, su modo de funcionamiento y datos de sensores, como la activación de zonas del láser por ejemplo, son igualmente representados.



Figura 6. Interfaz de la aplicación SCADA

El PLC de control de cada vehículo, esclavo de la red DeviceNet, es el encargado de transmitir al SCADA la información recogida del vehículo. Los vehículos se encuentran numerados para facilitar su identificación y su selección en la pantalla de información. La aplicación SCADA ha sido diseñada para monitorizar hasta 15 vehículos simultáneamente. Por otra parte, esta aplicación actúa como interfaz de comunicación, recibiendo órdenes del ERP y transmitiéndolas a los PLCs, todo ello a través de archivos XML. El intercambio de datos se realiza a través de carpetas de archivos predefinidas tal como se muestra en la Figura 7. Básicamente, dicho intercambio de datos se realiza a través de carpetas compartidas, de manera que cada orden se ubica en su carpeta correspondiente según su nivel de procesamiento (no procesadas, recibidas, en proceso o completadas).

4.2 Terminal Programable

El terminal programable instalado en cada uno de los vehículos industriales presenta una interfaz específica compuesta por varias pantallas. Desde la pantalla principal (Figura 8), se accede a

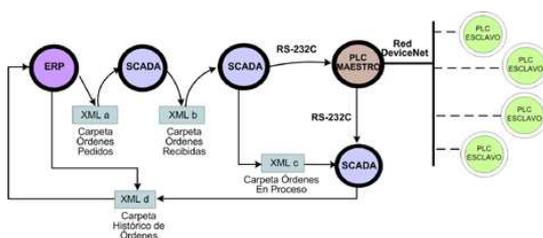


Figura 7. Flujo de información entre aplicaciones de gestión y supervisión



Figura 8. Interfaz Terminal Programable

seis pantallas secundarias: Indicadores Gráficos, Gestión de Órdenes, Zonas de Protección, Indicadores Numéricos, Ajuste Parámetros y Generación de Movimientos. La pantalla Indicadores Gráficos monitoriza el estado de los distintos sensores y actuadores de la carretilla industrial. En Gestión de Órdenes se visualizan los partes de transporte a realizar, con sus datos (producto, cantidad, ubicación, destino, etc). Desde ella se permite la interacción directa con la aplicación de gestión de ERP. En Zonas de Protección, se muestran las zonas detectadas por los sensores de rango. Indicadores Numéricos es una pantalla con propósitos de depuración del programa. En Ajuste de Parámetros se modifican parámetros del PLC relativos al vehículo. Finalmente desde Demostración de Movimientos se pueden iniciar los distintos modos de control automático, descritos a continuación: teleoperación y navegación.

5. TELEOPERACION

La teleoperación es necesaria cuando se manejan materiales peligrosos o el vehículo se debe mover



Figura 9. Interfaz virtual de teleoperación



Figura 10. Almacén real

en áreas con riesgo de explosión o de contaminación. Se ha desarrollado una aplicación de teleoperación cliente/servidor, descrita en (Armesto *et al.*, 2003) basada en un PC de sobremesa ubicado fuera del área peligrosa que actúa como servidor de un cliente, implementado en el PLC del vehículo. Se transmiten órdenes de movimiento: velocidad del vehículo y posición del volante, suministradas por un joystick (volante y pedales) y a su vez, el PLC devuelve, en tiempo real, posición y orientación del vehículo obtenidas a partir del algoritmo de SLAM descrito en la siguiente sección. Para la ayuda a la teleoperación, se ha instalado una webcam inalámbrica en la parte frontal del vehículo y se ha implementado, en DarkBasic, un entorno 3D virtual del almacén en el PC servidor (Figura 9). De esta manera, la aplicación combina imágenes virtuales con imágenes reales (Figura 10) procedentes del vehículo. En <ftp://158.42.164.64/Videos> se muestra un video de la teleoperación de una de las carretillas en una Feria de Valencia (ProtoDesign). A pesar de que no se trata de un entorno industrial, la teleoperación se realizó en un entorno repleto de personas cruzándose continuamente, deteniéndose el vehículo de manera automática y continuando con los recorridos preestablecidos.

Actualmente, se está sustituyendo el joystick (volante y pedales) por una cabina industrial de simulación, en la que el operario puede realizar la teleoperación con una conducción más realista y con mayor seguridad.

6. LOCALIZACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE MAPAS

Como es bien conocido, el problema de localización y construcción del mapa se puede resolver

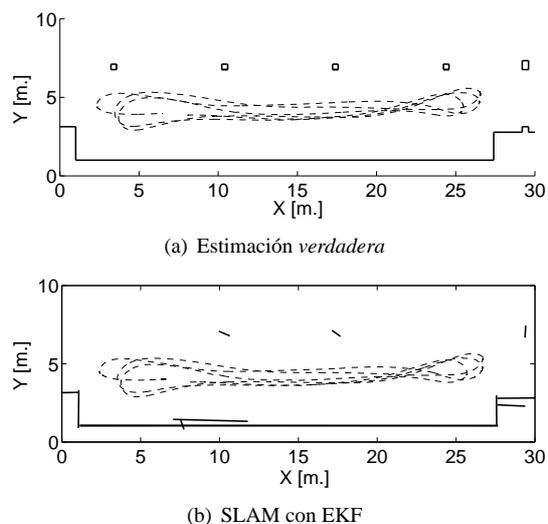


Figura 11. Estimación de la traza del robot y construcción del mapa.

de manera simultánea (SLAM), sin asumir una posición inicial y un entorno conocido. Un número considerable de contribuciones se han realizado para resolver el problema del SLAM, de entre las que merece la pena destacar tanto tanto las mapas geométricos como en celdillas de ocupación para representar el entorno (Smith *et al.*, 1988; Thrun *et al.*, 1998; Dissanayake *et al.*, 2001; Jensfelt and Christensen, 2001; Castellanos *et al.*, 2001).

Existen diferentes técnicas para la estimación de la posición de un robot y del mapa. Una de las más utilizadas es el filtro de Kalman Extendido (EKF), aunque también se utiliza la fusión bayesiana, entre otras. Considerando que el estado se compone del estado del robot y de un conjunto de objetos que definen el entorno de forma paramétrica, se puede realizar estimaciones recursivas del mismo a partir de las mediciones realizadas.

Precisamente, debido a la gran diversidad de sensores existentes en robótica móvil: encoders, inerciales, láser de telemetría, ultrasonidos, infrarrojos, GPS, sistemas de visión, etc., cada sensor actúa a una frecuencia de muestreo diferente. En la mayoría de los casos se trata de limitaciones tecnológicas como, por ejemplo, los retardos en la comunicación, el tiempo de procesamiento de la información, etc. Por este motivo, con el fin de aprovechar al máximo las características de cada sensor, es necesario el uso de técnicas multifrecuenciales. En (Armesto and Tornero, 2004) se describe en detalle la aplicación de construcción del mapa y localización del vehículo basado en técnicas multifrecuenciales de fusión sensorial de las medidas láser y encoders.

Se ha realizado un experimento de la carretilla dan-

do vueltas en círculos por una parte del almacén, en el que las medidas de encoders se miden cada 50ms y los barridos del láser se toman cada 500ms, debido al retardo en las comunicaciones. Por un lado, se ha realizado sólo la localización suponiendo un mapa conocido (estimación *verdadera*), como se muestra en la Figura 11(a). Por otro lado, se ha implementado la estimación con EKF, tanto del mapa como de la posición del robot que se muestra en la Figura 11(b), donde se observa que son bastante parecidos a los de la estimación *verdadera*.

7. NAVEGACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS DE PROGRAMACIÓN DINÁMICA Y CAMPOS POTENCIALES ARTIFICIALES

El sistema de navegación autónomo de un robot, es uno de los aspectos más críticos en esta aplicación, puesto que su implantación en una industria implica resolver aspectos legales, de seguridad y confinamiento que no se plantean en este artículo. A pesar de ello, proponemos una solución al problema como una parte más de la investigación. El sistema de navegación se divide en dos módulos para la planificación de los movimientos: global y local.

Para la planificación global de movimientos, se utiliza un mapa topológico formado por nodos, en el que cada nodo puede describe la intersección entre pasillos o así como las diferentes zonas de interés de un almacén. Mediante técnicas de programación dinámica se calcula el recorrido con menor coste que debe de seguir el vehículo (secuencia de nodos) para llegar desde el origen al destino. Los costes entre nodos pueden representar unidades de tiempo o distancias. En la figura 12 se muestra un ejemplo de la planificación mediante programación dinámica, donde los cambios de pasillo penalizan un total de 2 unidades, cruzar recto de pasillo a pasillo penaliza una sola unidad y cruzar todo un pasillo horizontal y vertical cuesta 6 y 3 unidades respectivamente. Así mismo, se puede observar como resultado en rojo la secuencia de nodos con menor coste.

Para la navegación local, entre nodo y nodo, se utiliza el método de Campos Potenciales Artificiales (Khatib, 1986) que representa al robot como un punto en el espacio de configuraciones. La función potencial U suele definirse como la suma de un potencial atractivo U_{att} que atrae al robot, que estira del robot hacia la configuración destino, y de un potencial repulsivo U_{rep} , que empuja al robot lejos de los obstáculos. La planificación de movimientos

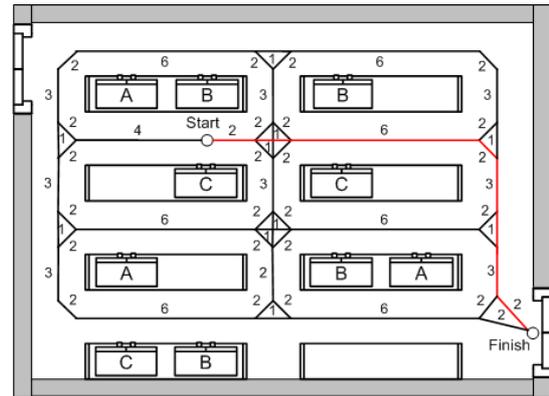


Figura 12. Planificación global mediante programación dinámica

se realiza en línea de una manera iterativa. En cada iteración, la fuerza artificial inducida por la función potencial en la configuración actual es considerada como la dirección de movimiento más prometedora y la generación de caminos se realiza a lo largo de esta dirección mediante incrementos (Depth First).

En este trabajo, se ha realizado una implementación de la técnica de navegación (local) mediante Campos Potenciales para un almacén. Se asume, por sencillez, un entorno completamente estructurado, que previamente se ha generado un mapa mediante exploración. La razón última de utilizar un método reactivo siendo el entorno conocido es que, aunque el robot móvil posee un mapa conocido del entorno, se desea que sea capaz de reaccionar ante obstáculos inesperados.

Sin embargo, este método presenta como gran inconveniente la existencia de mínimos locales en la función potencial. Esta problemática ha llevado a muchos investigadores a proponer modificaciones de la técnica básica en dos sentidos:

1. Dirigidas a mejorar el “comportamiento dinámico local” del robot a lo largo del camino generado (Khatib, 1996; Haddad *et al.*, 1998) o bien a reducir el número de mínimos locales y/o el tamaño de sus pozos atractivos (Kim and Khosla, 1992; Rosell and Iñiguez, 2002; Tanner *et al.*, 2003; P. *et al.*, 2000; Idiart and Trevisan, 2002)
2. Mejorar de las técnicas de búsqueda, como “Campo de Fuerza Virtual”, (Borenstein and Koren, 1989) y sus modificaciones (Borenstein and Koren, 1991; Ulrich and Borenstein, 1998; Ulrich and Borenstein, 2001), la utilización de obstáculos virtuales (Chengqing *et al.*, 2000) y el método de las Cargas Ficticias (Serradilla and Maravall, 1996; Maravall *et al.*, 2000) entre otros.

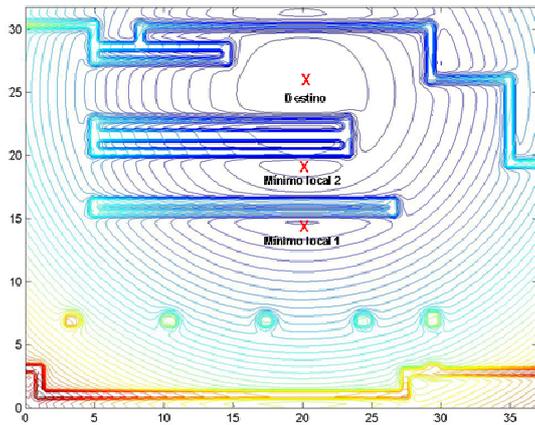


Figura 13. Contornos Equipotenciales.

La Figura 13 ilustra los contornos equipotenciales de la función potencial obtenida para el entorno del almacén, para un punto destino dado. En ella se observa la existencia dos mínimos locales en las posiciones (20,15) y (20,19) distintos del destino, ubicado en (20,25).

En la Figura 14 se muestra la planificación de movimientos desde distintos orígenes hasta la configuración destino. En particular, no se hace uso de la planificación global, dado que simplemente se pretende comprobar que el robot es capaz de escapar de los mínimos locales utilizando el método de la Cargas Ficticias. Obviamente, en un entorno tan estructurado como en un almacén, la correcta ubicación de los nodos evitará los problemas de mínimos locales, pero ello no implica que no puedan surgir debido a obstáculos imprevistos.

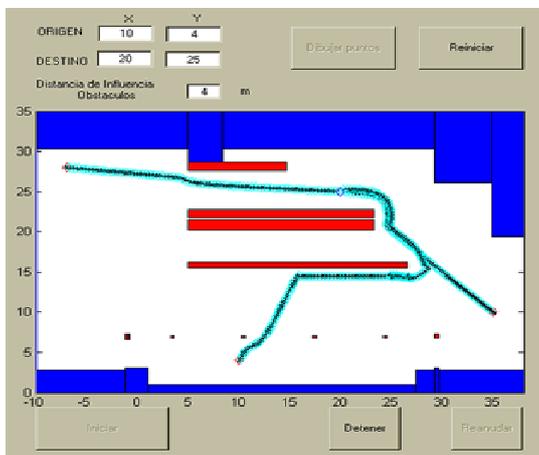


Figura 14. Planificación desde distintos orígenes.

8. CONCLUSIONES

El artículo presenta una solución global para el problema de automatización de almacenes. Dicha solución integra el sistema de información con el de transporte de mercancías.

Se ha descrito una completa arquitectura hardware basada en productos industriales robustos y fiables (PCs industriales y PLCs). Así mismo, la arquitectura software desarrollada, de naturaleza modular, permite integrar las diferentes aplicaciones planteadas para la automatización del transporte.

En la solución planteada se han utilizado diversas técnicas de optimización en cada uno de los niveles planteados: programación lineal en la optimización de ubicaciones, programación dinámica en la búsqueda del camino mínimo, método de la máxima pendiente en Campos Potenciales, utilización de filtro de Kalman para la minimización de la varianza del error de estimación, etc. Esto proporciona un buen banco de ensayos de dichas técnicas o sus variantes.

Finalmente, resaltar que este artículo es el resultado de un proyecto de investigación a tres años sobre la automatización de almacenes con vehículos industriales (AutoTrans, 2000), actualmente en fase de implantación. La solución adoptada tiene diferentes fases de implantación que a continuación se enumeran:

1. Integración del transporte con el sistema de gestión de la empresa (ERP).
2. Gestión óptima de ubicaciones.
3. Sensorización, control y comunicaciones del vehículo.
4. Sistema de autolocalización del vehículo.
5. Sistema de monitorización de vehículos (SCADA).
6. Teleoperación de vehículos.
7. Sistema autónomo de navegación.

De todas las fases descritas, actualmente están desarrolladas e implementadas todas ellas a excepción del sistema autónomo de navegación, que se está desarrollando en la actualidad como consecuencia de la integración de los módulos ya implementados. No obstante, se puede descargar una versión demo en <ftp://158.42.164.64/Demos> donde se muestran los resultados obtenidos relativos a optimización de ubicaciones y el sistema de navegación y autolocalización. La total automatización de un almacén real es difícil, por el coste elevado que supone la completa automatización de los vehículos, así como aspectos legales, seguridad y confinamiento.

Se está trabajando en el desarrollo de un producto industrial modular cuyos componentes podrán ser implantados independientemente según las necesidades de la empresa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran agradecer a V. Suesta por su colaboración en la sección 2.

REFERENCIAS

- Armesto, L. and J. Tornero (2004). SLAM based on Kalman filter for multi-rate fusion of laser and encoder measurements. In: *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (Accepted)*.
- Armesto, L., M. C. Mora, A. Herráez and J. Tornero (2003). A client/server application of industrial forklifts. In: *7th Symposium on Robot Control*. pp. 613–618.
- AutoTrans (2000). Sistema de automatización integral para la gestión del transporte de materiales. DPI2000-0362-P4-05, Ministerio de Ciencia y Tecnología.
- Borenstein, J. and Y. Koren (1989). Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics* **19**(5), 1179–1187.
- Borenstein, J. and Y. Koren (1991). The vector field histogram - fast obstacle avoidance for mobile robots. *IEEE Trans. Robot. Automation* **7**(3), 278–287.
- Castellanos, J.A., J.Ñeira and J.D. Tardos (2001). Multisensor fusion for simultaneous localization and map building. *Trans. on Robotics and Automation*.
- Chengqing, L., M.H. Ang, H. Krishnan and L.S. Yong (2000). Virtual obstacle concept for local-minimum-recovery in potential-field based navigation. *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation* **2**, 983–988.
- Dissanayake, M.W.M.G., P. Newman, S. Clark, H.F. Durrant-Whyte and M. Csorba (2001). A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem. *IEEE Trans. Robot. Automation* **17**(3), 229–241.
- Haddad, H., M. Khatib, S. Lacroix and R. Chatila (1998). Reactive navigation in outdoor environments using potential fields. *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation* pp. 1232–1237.
- Idiart, M. A. P. and M. Trevisan (2002). Directing a random walker with optimal potentials. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* **307**(1-2), 52–62.
- Jensfelt, P. and H.I. Christensen (2001). Pose tracking using laser scanning and minimalistic environmental models. *Trans. Robotics and Automation* **17**(2), 138–147.
- Khatib, M. (1996). Sensor-based motion control for mobile robots. PhD thesis. LAAS-CNRS, Toulouse, France.
- Khatib, O. (1986). Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *Int. J. Robotics Research* **5**(1), 90–98.
- Kim, J. and P. Khosla (1992). Real-time obstacle avoidance using harmonic potential functions. *IEEE Trans. Robot. Automation* **8**(3), 338–349.
- Maravall, D., J. De Lope and F. Serradilla (2000). Combination of model-based and reactive methods in autonomous navigation. *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation* pp. 2328–2333.
- P., Valavanis K., T. Hebert, R. Kolluru and N.C. Tsourveloudis (2000). Mobile robot navigation in 2-d dynamic environments using electrostatic potential fields. *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics - Part A* **30**(2), 187–197.
- Rosell, J. and P. Iñiguez (2002). A hierarchical and dynamic method to compute harmonic functions for constrained motion planning. *IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems* **3**, 2335–2340.
- Serradilla, F. and D. Maravall (1996). A navigation system for mobile robots using visual feedback and artificial potential fields. In: *13th European Meeting on Cybernetics and System Research*. pp. 1159–1164.
- Smith, R., M. Self and P. Cheeseman (1988). A stochastic map for uncertain spatial relationships. In: *Int. Symp. in Robot. Res.* pp. 467–474.
- Tanner, H.G., S. Loizou and K.J. Kyriakopoulos (2003). Nonholonomic navigation and control of cooperating mobile manipulators. *IEEE Trans. Robot. Automation* **19**(1), 53–64.
- Thrun, S., D. Fox and W. Burgard (1998). A probabilistic approach to concurrent mapping and localization. *Mach. Learning Autonomous Robots* pp. 29–53.
- Ulrich, I. and J. Borenstein (1998). Vfh+: Reliable obstacle avoidance for fast mobile robots. *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation* pp. 1572–1577.
- Ulrich, I. and J. Borenstein (2001). Vfh*: Local obstacle avoidance with look-ahead verification. In: *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*. pp. 2505–2511.