

Estrategia de Coordinación y Comunicación para Sistemas Robóticos Colaborativos

Coordination and Communication Strategy for Robotic Collaborative Systems

Ricardo Castillo Estepa, João Mauricio Rosário, Germán Vargas Torres

Departamento de Ingeniería en Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia

ricardo.castillo@unimilitar.edu.co

Resumen— En este trabajo se presenta el desarrollo y la implementación de una estrategia de comunicación y coordinación entre varios dispositivos robóticos, de manera que estos al trabajar en conjunto puedan constituir un sistema colaborativo. Esta estrategia permitirá a un grupo de varios agentes autónomos, exhibir comportamientos de cooperación y/o coordinación, de manera que estos puedan trabajar tanto de forma independiente para alcanzar objetivos locales, como también de forma colectiva para alcanzar objetivos globales, explorando o modificando su ambiente de operación. Para el desarrollo de la estrategia propuesta los agentes estarán distribuidos teniendo en cuenta una configuración de comando descentralizada, así el sistema integrado podrá adaptarse dinámicamente a perturbaciones internas o externas que puedan aparecer. En la validación de la estrategia propuesta será utilizada una arquitectura de comando heterárquica (descentralizada), para coordinar agentes o hólons de un sistema de manufactura con recursos físicos asociados. La estrategia descrita en este trabajo posibilitará que un sistema colaborativo este en capacidad reconfigurarse automáticamente, cuando aparece una falla o perturbación, redistribuyendo las actividades entre los agentes, sin necesidad de una reinicialización total del sistema.

Palabras clave— Automatización, Control descentralizado, Robótica Móvil, Sistemas Colaborativos

Abstract— This paper presents the development and implementation of a communication and coordination strategy among multiple mobile robotic devices, so that they can work together becoming a collaborative. This strategy will enable a group of several autonomous agents (mobile robots) to exhibit cooperative and/or coordinate behaviors, so that they can work both independently to achieve local objectives, as well as collectively to achieve overall objectives, exploring or modifying its operating environment. For the development of the proposed strategy, agents will be distributed taking into consideration a decentralized command configuration, so the integrated system can adapt dynamically to internal or external disturbances that may occur. For validation of the proposed strategy it will be used heterarchical command architecture (decentralized) in order to coordinate agents or holons with associate physical resources. The strategy discussed in this work will enable a collaborative system to automatically reconfigure itself when a failure is

detected, reallocating the activities and avoiding a total system restarting.

Key Words— Automation, Collaborative Systems, Decentralized control, Mobile robotics.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los robots se integran cada vez más a la vida cotidiana, desde sus aplicaciones tradicionales en automatización industrial y robots móviles teledirigidos hasta su integración con la sociedad en áreas como la robótica social y la construcción de dispositivos de rehabilitación y apoyo al movimiento.

No obstante, en la última década la robótica y la automatización han dirigido también su atención hacia el diseño e implementación de sistemas compuestos por múltiples robots (agentes) [1], [2] que pueden trabajar colectivamente para desarrollar tareas en las cuales la utilización de dispositivos individuales no ofrece buenos resultados en términos de tiempo y de gasto de energía [3], [4]. De esta manera a medida que los sistemas robóticos y de manufactura aumentan su complejidad en cuanto al número de componentes, estos Sistemas Multi-agentes (MAS) también necesitan de una planificación y programación de tareas que permita la coordinación de los componentes individuales, para que al trabajar colectivamente puedan desarrollar las actividades con más eficiencia que si estas fueran desarrolladas por un solo agente [5], [6].

De esta manera, es necesario el desarrollo de estrategias de colaboración que permitan que los componentes individuales del sistema puedan trabajar de forma cooperativa para alcanzar objetivos globales al combinar sus capacidades de decisión y actuación, haciendo frente de forma dinámica a perturbaciones inesperadas y cambios en el ambiente de actuación del sistema [7]. Estrategias de modo a lograr una coordinación eficaz entre los agentes, han utilizado como componente de comando: heurísticas, algoritmos genéticos, técnicas micro-oportunistas, métodos basados en mercados, y cada vez más, técnicas de inteligencia artificial distribuida basadas en algoritmos bio-inspirados (inteligencia de enjambre) [8], [9], [10]. Trabajos de investigación utilizando

las técnicas de comando descritas anteriormente se han implementado primero sobre arquitecturas de control jerárquicas (centralizadas) y luego sobre arquitecturas heterárquicas (totalmente descentralizadas) [11] en las cuales la aparición de una perturbación es fácilmente superada por medio de la capacidad de reconfiguración del sistema y la consecuente redistribución de las actividades de los agentes [12].

Con la realización y culminación de este trabajo se busca proponer, desarrollar e implementar una técnica basada en inteligencia artificial cooperativa que permita que un Sistema Multi-Agentes (MAS) pueda ser capaz de coordinar sus componentes. La estrategia descrita en este trabajo estará compuesta de tres partes: una arquitectura de comando heterárquica (descentralizada), una técnica de coordinación y comunicación entre los agentes basada en inteligencia artificial y un coeficiente de autonomía adaptativo al interior de cada uno de los agentes.

II. CONTENIDO

En las últimas décadas se han presentado cambios en el uso de la robótica dentro de los sistemas de manufactura industrial, los cuales han evolucionado desde una economía local hacia una economía global y mucho más competitiva, caracterizada por productos de alta calidad, menor costo y menor ciclo de vida; esto se refleja en una necesidad de los sistemas de manufactura para adaptarse dinámicamente y rápidamente a los cambios y perturbaciones del entorno [15].

A. Sistemas Colaborativos

De esta forma y para mantener la competitividad, las industrias requieren de la implementación de sistemas de manufactura integrados y coordinados utilizando un enfoque colaborativo, distribuido e inteligente, que pueda ofrecer flexibilidad y reconfigurabilidad, manteniendo la productividad y calidad de estos sistemas [13], [14], [16]. Por lo tanto nuevos paradigmas como la Gestión de Manufactura Colaborativa (CMM) surgen como una evolución y respuesta a la necesidad de adaptación a las emergencias que no es satisfecha completamente con el concepto original CIM (Computer Integrated Manufacturing) en el cual los Sistemas Automatizados de Producción (SAPs) presentan una integración de hardware y software basada en una arquitectura de control fuertemente jerárquica y centralizada y en una estructura de funcionamiento (planeamiento, agendamiento y ejecución) secuencial y rígida. Así, aunque esta arquitectura de control posibilite a los sistemas CIM una optimización de la producción (de uno o pocos productos) acarrea grandes complicaciones, requiriendo la interrupción del sistema completo cuando ocurre una falla en cualquier punto de la jerarquía [13] de manera que esta estructura rígida y jerárquica tampoco permite que estos sistemas se adapten con eficiencia y efectividad a los cambios en el ambiente.

Asociado a este concepto aparecen los sistemas de control de manufactura inteligentes y distribuidos (ver Figura 1), los cuales presentan redundancia de funciones y responsabilidades [14] y cuyo funcionamiento se basa en actividades distribuidas y paralelas realizadas por entidades o unidades autónomas (y homogéneas).

B. Sistemas de control de Manufactura Inteligentes y Distribuidos

Dentro de este contexto surgen los sistemas de coordinación y comunicación inteligentes y distribuidos, caracterizados por presentar una arquitectura de control descentralizada, que les permite ser robustos y adaptables a los cambios y perturbaciones. Dentro de este enfoque, el paradigma tecnológico conocido como sistemas basados en agentes, permite la implementación de otro paradigma: los sistemas holónicos, los cuales utilizan la tecnología de agentes. Los sistemas basados en agentes e consecuentemente los sistemas holónicos, además de satisfacer las necesidades descritas anteriormente, añaden otras ventajas como: modularidad, reconfigurabilidad, autonomía, escalabilidad y la reusabilidad [17].

C. Sistemas Basados en Agentes y Holónicos

Estos sistemas (Sistemas Multi Agentes MAS) se derivan del concepto de la Inteligencia Artificial Distribuida (DAI), un MAS se puede definir como un conjunto de agentes los cuales están representando los recursos de un sistema [16], estando organizado a través de una arquitectura heterárquica caracterizada por un alto nivel de autonomía y de coordinación. La coordinación necesaria para que los agentes puedan colaborar y / o cooperar entre sí, requiere un flujo regulado de información entre los agentes y su entorno. Esta comunicación entre los agentes que es un requisito constante en estos sistemas puede ser indirecta (usando el ambiente) o directa (intercambio de información entre agentes específicos) a través de un lenguaje con una sintaxis y semántica determinadas [14].

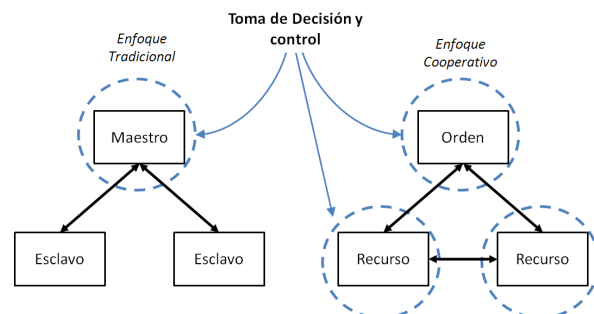


Figura 1. Enfoques tradicional y distribuido para la toma de decisiones [17]

La arquitectura de los sistemas de fabricación holónicos responde al concepto de Holarquía, la cual se define como un sistema de hólons organizados dentro de una estructura jerárquica y con posibilidad de cooperar entre sí para alcanzar

los objetivos globales del sistema al combinar los conocimientos y habilidades de los hólons individuales. La robustez del sistema de control se fundamenta en la distribución, en la cual el control no está centralizado en un solo elemento, por lo tanto la falla o pérdida de uno de estos elementos no conlleva a la inoperabilidad, parada o reinicio del sistema. De esta manera ante una perturbación la producción puede continuar incluso utilizando diferentes componentes. Además, también es posible adicionar, retirar o modificar fácilmente los módulos de hardware y software mientras el sistema continúa funcionando.

III. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRATEGIA PROPUESTA

La estrategia propuesta en este trabajo está compuesta de tres partes principales:

- Una arquitectura de control heterárquica (distribuida).
- Sistema de control de manufactura y comunicación entre los agentes del sistema.
- Un componente adaptativo al interior de los agentes con el fin de lograr una adquisición automática de conocimiento.

A. Arquitectura Heterárquica

La arquitectura seleccionada para ser utilizada dentro de la estrategia propuesta y que responde al enfoque colaborativo HMS es la arquitectura colaborativa ADACOR (ADActive holonIc COntrol aRchitecture for distributed manufacturing systems) [15], la cual se propuso, desarrolló e implementó en el Instituto Politécnico de Bragança (Portugal). La selección de esta arquitectura se realiza con el fin de permitir la implementación de un sistema de control de manufactura inteligente soportado en una configuración que ofrece un alto grado de flexibilidad, adaptabilidad y robustez cuando una perturbación o imprevisto aparece en el sistema, adaptándose fácilmente a un entorno estocástico caracterizado por la aparición frecuente de perturbaciones inesperadas [18].

Un CSAP con arquitectura ADACOR organiza la utilización de sus módulos / hólons, para sincronizar la utilización de los recursos, siendo dinámicamente reconfigurable y por lo tanto, capaz de producir un gran número de productos y/o familias de piezas con un mínimo esfuerzo en el cambio de sus componentes físicos (flexibilidad). Además esta arquitectura permite al sistema una integración fácil y rápida de cualquier dispositivo nuevo, así como la mejora de los hólons existentes, sin tener que reiniciar o reprogramar todo el proceso, reflejándose en una mayor flexibilidad y reconfigurabilidad del sistema diseñado [18], [13].

La arquitectura ADACOR adiciona a la arquitectura holónica general el hólón de supervisión y control (HS), junto con las características de auto-organización y capacidad de aprendizaje PROSA [19], [14] [17]. Este hólón de supervisión introduce al sistema la capacidad de coordinación, formación de grupos y optimización global. De esta manera se definen

cuatro clases dentro de la arquitectura ADACOR con el fin de crear objetos (hólons): Hólón de producto (HP), Hólón de Tarea (HT), Hólón Operacional (HO) y Hólón de Supervisión (HS).

Los Sistemas de control ADACOR no son completamente descentralizados ni jerárquicos, presentan un equilibrio dinámico entre la centralización y la distribución total. Estos sistemas pueden cambiar su estado entre estado estacionario y estado transitorio, dependiendo de la aparición de perturbaciones. En estado estacionario cada hólón operacional (HO) tiene una vista parcial del sistema, pero a su vez estos pueden trabajar cooperativamente entre sí al ser integrados a través de una interfaz de red, siendo controlados por el módulo de supervisión y comando. El HS junto con el HT gerencian las acciones de cada hólón con el fin de desarrollar un proceso completo dentro del sistema, alcanzando así los objetivos globales (funcionamiento centralizado sin perturbación). Cuando aparece una perturbación el sistema cambia hacia una arquitectura heterárquica (estado transiente) y desaparece el hólón de supervisión, creándose una conexión directa entre el hólón de tarea (HT) y los hólons operacionales (HO); en este caso se realiza un agendamiento con base en ofertas e recompensas, hasta volver a su estado estacionario.

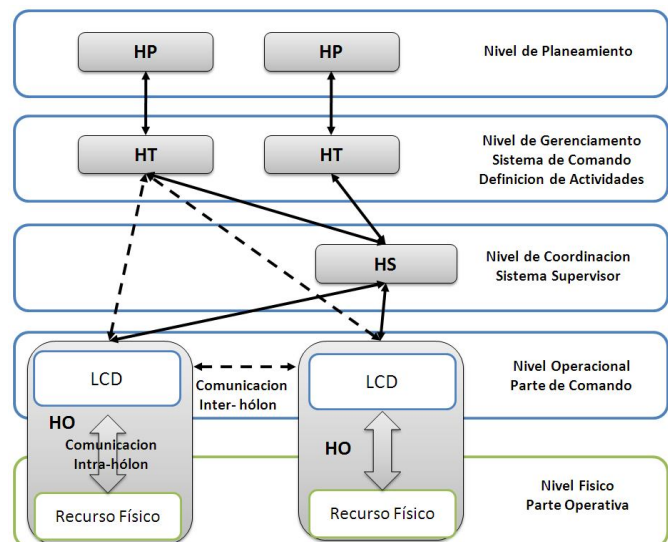


Figura 2. Niveles de la Arquitectura ADACOR utilizada De acuerdo a los conceptos de la arquitectura holónica ADACOR seleccionada en este trabajo, son considerados cuatro niveles:

- Nivel operacional - Hólón Operacional (HO);
- Nivel de coordinación - Hólón de Supervisión (HS);
- Nivel de Gerenciamiento - Hólón de Tarea (HT);
- Nivel de Planeamiento - Hólón de Producto (HP), (ver Figura 2).

B. Sistema de Control de Manufactura Inteligente e Distribuido

Este sistema Inteligente y Distribuido propuesto está fundamentado en la coordinación de los agentes utilizando una técnica de comunicación indirecta (fundamentada en la modificación del ambiente de operación) denominada *stigmergia*, con el fin de solucionar el problema de Agendamiento Dinámico de Manufactura (Job Shop Scheduling Problem – JSP). Este problema será abordado con dos propósitos:

- Desarrollar planes de manufactura optimizados para ser enviados al Hólón de Supervisión (HS);
- Generar nuevos planes de manufactura mientras el sistema está en su estado transiente después de una perturbación, de forma a enviar estos planes a los hólons operacionales una vez que acabe el tiempo de restablecimiento y el sistema vuelva a su modo normal de funcionamiento, en esta etapa se requiere una alta velocidad de respuesta.

1) Planeamiento de la Producción y asignación de Recursos

En esta etapa, realizada por el hólón de producto, en el nivel de planificación, las operaciones a ser realizadas con el fin de obtener el producto final son identificadas y colocadas en una matriz llamada Matriz de Incidencia PFA (Production Flow Analysis). En esta matriz las filas representan los robots, máquinas o recursos de manufacturas y las columnas representan las piezas a ser fabricadas. De esta forma, es posible aplicar un método de agrupamiento para "organizar" las operaciones dentro de la matriz de incidencia y por lo tanto identificar las posibles células de manufactura o grupos de agentes físicos en el piso de fábrica del sistema de producción. El algoritmo de agrupamiento o clustering utilizado en la estrategia propuesta es el algoritmo de ROC (Rank Order Clustering). La figura 3 presenta el procedimiento para la obtención de grupos de agentes (células de fabricación) a partir de la matriz de incidencia original y aplicando el algoritmo ROC para implementar el proceso de agrupación.

2) Agendamiento y Control de Manufactura

Después de la etapa de planificación y asignación de recursos es entonces necesario calcular la secuencia de operaciones necesarias dentro de cada una de los grupos de agentes o células para fabricar el producto, esto es, obtener el plan de manufactura. En el enfoque tradicional de control de manufactura estos planes se envían sin modificaciones al componente de agendamiento de tareas, pero la estrategia propuesta en este trabajo estos planes tienen que cambiar de manera dinámica cada vez que aparece una perturbación interna o externa en el sistema, que puede ser:

- Llegada o cancelamiento de tareas;
- Llegada y salida de recursos de manufactura;

- Surgimiento de eventos inesperados dentro o fuera del sistema;
- Incertidumbre en la duración de las tareas agendadas.

☐ Matriz de Incidencia PFA (Production Flow Analysis) original

☐ Solucion Obtenida con Algoritmo ROC - Rank Order Clustering

No es considerada la secuencia de las operaciones

Figura 3. Obtención de Células de Manufactura en el Proceso de Asignación de Recursos

De esta forma, los planes de manufactura tienen que ser modificados, por lo que las tareas inicialmente asignadas a los recursos de manufactura, tienen que ser entonces re-agendadas hacia otros recursos, aprovechando la característica de redundancia de hardware del sistema. Estos planes de manufactura alternativos buscan atribuir recursos y tiempos a las operaciones del plan, teniendo en cuenta la satisfacción de un conjunto de restricciones y minimizando o maximizando una función objetivo.

3) Coordinación y Reconfiguración para el Agendamiento de Tareas

La estrategia utilizada para el agendamiento ágil y dinámico de manufactura utiliza una técnica de inteligencia artificial distribuida (DAÍ) conocida como *stigmergia*, esta técnica disponibiliza de forma local el conocimiento global del sistema, por lo tanto se obtiene no solo coordinación sino también cooperación al interior de los hólons que componen el sistema ADACOR. La coordinación de los agentes basada en *Stigmergia* tiene como objetivo no sólo la asignación de recursos y tiempos a las actividades del plano de manufactura, sino también la coordinación de los recursos dentro de una misma célula para completar una determinada actividad. El modelo de *stigmergia* propuesto para ser utilizado con el fin de satisfacer estos requisitos está fundamentado en la comunicación entre los agentes utilizando mecanismos (señales) locales extra-tarea.

En este tipo de *stigmergia* los agentes fundamentan su comunicación y coordinación en señales no permanentes conocidas como feromonas, la combinación de estas

feromonas produce un campo disipativo en el entorno, disparando acciones en otros agentes sin la necesidad de comunicación directa (costo computacional). Así, los agentes no tienen que lidiar con la dinámica compleja del sistema y pueden combinar su poder de cómputo y conocimiento local de manera coordinada para alcanzar un comportamiento colectivo, ordenado y efectivo. La información global del sistema disponibilizada a través de feromonas podrá no solo ser tenida en consideración dentro de un funcionamiento reactivo, sino también permitirá a los hólons adaptar determinadas variables propias en una forma de adquisición automática de conocimientos.

C. Adquisición Automática de Conocimiento

Esta característica es la tercera parte de la estrategia de coordinación y control propuesta y busca que los agentes contenidos dentro de los hólons operacionales (HO) puedan no solo exhibir un comportamiento reactivo, sino también puedan adquirir conocimiento con el fin de mejorar su desempeño y velocidad de respuesta en el estado estacionario del sistema y principalmente en su estado transiente. Teniendo esto en consideración algunas variables responsables de este proceso podrán evolucionar a través de un algoritmo adaptativo. La adaptación continua de estas variables produce una mejora en el desempeño del mismo a través del tiempo, sin salir de una franja que perjudique su estabilidad.

La integración del componente adaptativo dentro de los agentes a ser considerados posibilitará que estos no presenten solamente un comportamiento reactivo sino también “aprendan” insertando en ellos una característica deliberativa, además disminuyendo la complejidad del algoritmo de coordinación. Los valores que serán adaptados continuamente dentro del sistema son:

Factor de Autonomía: Variable dentro del LCD (Dispositivo Lógico de Control) de los hólons operacionales (HO), la cual determina su autonomía para ejecutar las operaciones de manufactura agendadas por este mismo en los tiempos también por este mismo determinados. Este factor tiene que aumentar cuando aparece una perturbación en el sistema (de esta forma el HO no depende los planos agendados por el hólón de supervisión) y disminuye después que transcurre el tiempo de restablecimiento, después del cual este factor es adaptado nuevamente.

Tiempo de Restablecimiento: Este tiempo es determinado por el hólón operacional que detecta la falla en caso que este mismo no consiga soportar la perturbación. Luego de esto, los factores de autonomía dentro de los HOs son disminuidos y los tiempos de restablecimiento dentro de estos hólons son adaptados.

Feromonas: Es una variable dentro del HO que indica la influencia o impacto de una perturbación sobre el sistema, dependiendo del tipo de problema que la causó y de sus valores históricos. La feromona solamente será propagada por

el hólón operacional que detecta la falla, siendo mantenido durante el tiempo de restablecimiento.

Factor de rechazo: contiene información relacionada con la confiabilidad del HO para realizar una tarea agendada por el HS (durante el estado estacionario), su valor es adaptado dentro del Hólón de supervisión (HS) teniendo en cuenta el número de veces que el hólón operacional (HO) ha rechazado una tarea atribuida, con el fin de obtener mayor velocidad en el proceso de agendamiento de tareas.

IV. RESULTADOS ESPERADOS

La estrategia de coordinación y control utilizando stigmergia potencializada con la integración del componente adaptativo dentro de los agentes a ser coordinados (NIVELES OPERACIONAL Y COORDINACION), permite que estos no solamente presenten un comportamiento reactivo sino también “aprendan introduciendo en estos una característica deliberativa. Se pretenden obtener resultados que muestren que el costo (tiempo, cómputo) para alcanzar el estado estable después de una perturbación, utilizando la estrategia de coordinación descrita anteriormente es menor respecto a enfoques que utilizan una arquitectura tradicional y técnicas de agendamiento basadas en mercados.

El nivel de eficiencia de la reconfiguración del sistema en la estrategia propuesta depende del mecanismo de aprendizaje y del número de parámetros que modifican sus valores a través de ese aprendizaje [15].

Además, la estabilidad del sistema depende de las variables anteriormente descritas y del número de hólons proyectados para el sistema. El proceso de adaptación de cada uno de estos parámetros (Figura 4) es implementado teniendo en consideración un algoritmo de entrenamiento supervisado con redes neuronales MLP (Multi Layer Perceptron).

V. VALIDACIÓN DE LA ESTRATEGIA PROPUESTA

La estrategia de coordinación y control propuesta será a través de un modelamiento dinámico, análisis y simulación de los procesos al interior de los hólons sin tener en cuenta el sistema de coordinación y control acoplado, de forma que se pueda validar la estabilidad y el desempeño del sistema para luego comparar esos resultados con los obtenidos empleando otras estrategias tradicionales (estrategia basada en arquitectura jerárquica y estrategia basada en arquitectura heterárquica).

La estrategia de coordinación y comunicación propuesta será implementada en dos sistemas diferentes cada uno de ellos formado por múltiples agentes: un sistema de manufactura compuesto por robots (manipuladores, móviles), modulo de control de calidad y modulo de transporte de material; y un sistema formado por cinco robots humanoides para ser utilizado en actividades de exploración, recolección y transporte de elementos. Las actividades propuestas en este

proyecto buscan englobar tareas en las que se logren utilizar los dos sistemas colaborativos propuestos en diferentes configuraciones y distintos niveles de autonomía de los agentes [13], [14], [16] esto con el fin de lograr comportamientos de coordinación (bajo nivel de autonomía), cooperación (alto nivel de autonomía) o una combinación entre las dos (nivel de autonomía medio).

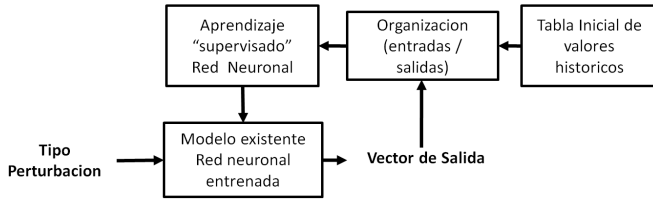


Figura 4. Adaptacion de Parametros – Algoritmo de Entrenamiento Supervisado

La importancia de implementar las actividades de recolección y transporte de elementos en el caso del sistema formado por cinco robots móviles, radica en que de la misma forma que la actividad de inspección, los resultados obtenidos con la implementación de estas tareas sobre la arquitectura real propuesta y didáctica pueden extrapolarse a un conjunto de robots que utilizando un factor de autonomía medio y bajo, puedan comunicarse y coordinarse entre sí, para detectar lugares con una alta presencia de elementos de interés, de forma que los robots pueden ser atraídos paulatinamente a estas posiciones (actividad de detección), para luego realizar el transporte de estos elementos que pueden tener diferentes formas y tamaños, ajustando de manera colaborativa la cantidad y la posición de los robots necesarios alrededor de las piezas para después trasladarlas de un lugar a otro. Estas dos actividades también son de vital importancia dentro del contexto militar y de defensa. Es posible así utilizar un conjunto de robots móviles para realizar un proceso de inspección de ambientes desconocidos para detectar minas antipersonales, de manera que estas puedan ser desactivadas o detonadas sin poner en riesgo la vida del personal de las fuerzas militares.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se propuso una estrategia de coordinación y comunicación basada en agentes para el comando de un sistema compuesto por múltiples entidades (hardware y/o software), que puede aplicarse tanto al área de manufactura como al trabajo cooperativo de robots móviles de características similares.

Se utilizó la concepción de agentes con el fin de modelar funciones y objetos de software y hólons con el fin de modelar entidades físicas como recursos de manufactura dentro de un sistema automatizado de producción o robots móviles en un sistema colaborativo.

Se encontró que una arquitectura ADACOR ofrece una configuración heterárquica adecuada para obtener una configuración distribuida en la cual es posible implementar un

sistema inteligente de coordinación y comunicación entre los agentes o hólons. Esto debido a su alto grado de reconfigurabilidad y flexibilidad tanto en la conexión entre los diferentes niveles de agentes como en la posibilidad de modificar su infraestructura tanto hardware como software.

Se propuso una técnica de coordinación y comunicación basada en inteligencia artificial distribuida la cual junto con un componente adaptativo al interior de los hólons, permite una mejora en la eficiencia del sistema tanto en su estado normal (estacionario) como también cuando se presenta una perturbación inesperada (estado transiente).

En la técnica de comunicación propuesta se tiene en cuenta una forma de comunicación indirecta entre los agentes de modo a disminuir el costo computacional necesario para establecer la comunicación entre el agente que detecta la perturbación y otras entidades en el sistema. De esta forma cada agente tendrá un conocimiento local que combinado de forma colaborativa propicia la consecución de los objetivos globales del sistema en cuestión.

REFERENCIAS

- [1] R. Kelly, R. Carelly y J. Ibarra, C. Monroy, "Control de una pandilla de robots móviles para el seguimiento de una constelación de puntos objetivo". In *VI Congreso Mexicano de Robótica*. Octubre, 2004.
- [2] H. Pereira, "Navegação Autônoma e percepção cooperativa entre robôs aéreos e terrestres". Tesis de Maestría, Universidade técnica de Lisboa. Octubre, 2009.
- [3] G. Rivera., R. Rivalda y J.A. Colas, "A generic software platform for controlling collaborative robotic system using XML-RPC". In *Proceedings of the 2005 IEEE/ASME*. California, USA. Julio, 2005.
- [4] N. Bano y T. Roppel, "Use of mobility models for communication in collaborative robotics". In *42nd South Eastern symposium on system theory*. Texas, USA. Marzo, 2010.
- [5] "Algoritmos de rastreo inspirados en colonias de hormigas". XXVII Jornadas de Automática (JAL), Almería (España). Septiembre 2006.
- [6] K. Easton y A. Martinoli, "Efficiency and optimization of explicit and implicit communication schemes in collaborative robotics experiments", In *Proceeding of the 2002 IEEE/RSJ, conference on Intelligent Robots and systems*. Lausanne, Switzerland. Octubre, 2002.
- [7] R. Cioarga e I. Nalatan, "Emergent exploration and resource gathering in collaborative robotics environments". In *IEEE international workshop on robotic and sensors environments*. Ottawa, Canada. Octubre, 2008.
- [8] J. Jimenez y D. Ovalle, "Comunicación en sistemas de múltiples robots desde la metodología MAD-SMART", Branch, Jonh. *Revista Ingenieria e Investigacion*, Vol. 28, N.2. Agosto, 2008.

- [9] D. Correa, F. Sanabria y W. Sandoval, "Cooperative Service Robots". *Revista Colombiana de tecnologías de Avanzada*. Vol.2, N.16. pp. 119-127, 2010.
- [10] A. Palacios, "Estrategias probabilísticas para la exploración colaborativa de robots de robots móviles". Tesis de Maestría, Octubre, 2007.
- [11] D. Almeida, T. Amaral y F. Rodriguez, "Uma arquitetura de hardware e software para competições em robótica móvel cooperativa". Latin American Robotics Competition (LARC 2010). Sao Bernardo do Campo. Brasil, Oct. 2010.
- [12] D. Ovalle *et al.*, "Arquitectura de un ambiente multiagente robótico para la navegación colaborativa". Quinta Conferencia Iberoamericana en Sistemas, Cibernética e Informática CISCI 2006. Florida, USA, July 2006.
- [13] A. Colombo *et al.*, "A Collaborative Automation Approach to Distributed Production Systems". In *Proceedings of 2nd IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN'04)*, vol.1, pp. 1-6, Jun. 2004.
- [14] L. Monostori, J. Váncza y Z. Kumara, "Agent-Based Systems for Manufacturing". In *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 55, n. 2, pp. 697-720, 2006.
- [15] P. Leitão, A. Colombo y F. Restivo, "A Formal Specification Approach for Holonic Control Systems. The ADACOR Case". *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, vol. 8, n. 3, pp. 37-57, 2006.
- [16] W. Shen, *et al.* "Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: An updated review". *Advanced Engineering Informatics*, vol. 20, n. 4, pp. 415-431, Oct. 2006.
- [17] P. Leitão, "Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 22, n. 7, pp. 979-991, Oct. 2009.
- [18] P. Leitão, A. Colombo y F. Restivo, "Formal Specification of ADACOR Holonic Control System: Coordination Models". In *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference*, 2005.
- [19] H. Van Brussel, *et al.*, "Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems: PROSA". *Computers In Industry*, special issue on intelligent manufacturing systems:, Elsevier Science Publishers B. V., vol.37, n.3, pp. 255-276, Dec. 1998.