



2019 10 al 13 de septiembre - Cartagena de Indias, Colombia

RETOS EN LA FORMACIÓN DE INGENIEROS EN LA ERA DIGITAL

SISTEMA DE TOMA DE DECISIONES PARA UNA PERCEPCIÓN HETEROGÉNEA Y ACTIVA

Johana Flórez, Carlos Parra

**Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá, Colombia**

Resumen

Nuestra propuesta doctoral entrega como resultado la creación de un sistema de múltiples agentes que consiste en un mecanismo hardware novedoso que integra múltiples sensores en una sola estructura y una estrategia de toma de decisiones distribuida y cooperativa para detectar objetos debajo del suelo. Este sistema tiene la capacidad de ser autónomo en la toma de decisiones respecto a la siguiente posición espacial y la naturaleza del objeto enterrado. La primera decisión contribuye en el desempeño de la segunda reduciendo la incertidumbre acerca del dispositivo en el suelo, es decir, el sistema realiza percepción activa con el fin de recolectar información de la región de interés.

El sistema de múltiples agentes es heterogéneo por los sensores embarcados, su capacidad de procesamiento se encuentra distribuida entre los agentes, dispone de un canal exclusivo de comunicaciones entre ellos y opera asincrónicamente. Además, cada agente realiza de manera independiente los procesos de captura de datos, toma de decisiones, comunicaciones y cambio de punto de vista del sensor para la siguiente adquisición. Este último proceso es realizado por el agente mediante un actuador conectado directamente a este.

El contexto de aplicación del sistema propuesto es el desminado humanitario en Colombia, dado que los objetos de interés se encuentran bajo tierra y presentan dificultades en su detección, debido a las características de los dispositivos enterrados. Estos elementos difieren de los empleados en la mayoría del estado del arte, dado que las minas en Colombia no son de construcción industrial, sino son artesanales. Estos objetos están hechos con materiales de fácil adquisición como botellas y jeringas. Además, se localizan en diferentes tipos de terrenos en el país. Lo que implica que el sistema encargado de la detección del dispositivo improvisado, debe buscar adquirir la mayor información posible para lograr discriminar el objeto que se encuentra bajo tierra.

Palabras clave: sistemas multi-agente; sistemas distribuidos; desminado humanitario; sistemas multi-sensoriales

Abstract

Our doctoral propose gives, as a result, the creation of a multi-agent system. This system has a novel hardware mechanism that integrates multiple sensors in a single structure. Besides, the system has a decision-making strategy distributed and cooperative to detect buried/concealed objects in the ground. Our proposal executes the decision-making process autonomously about the next acquisition position and the uncertainty measure of the nature of the hidden object. The first decision contributes to the performance of the second one, reducing the uncertainty about the device in the ground; it means that the system performs active perception to the aim of collecting information of the region of interest.

The multi-agent system is heterogeneous since there is a different sensor per agent. Besides, its compute capacity is distributed among the agents; it has an independent communication canal and works asynchronously. Each agent executes its processes. They are capture data, decision-making, communication task, and adjusting of the next point of view of the sensor. The last process can control a particular actuator connected to each agent.

The case study of the proposed system is humanitarian demining in Colombia. The demining task requires the detection of buried/ concealed hazardous objects. Besides, the devices in the ground to be detected present particular characteristics. These elements are improvised explosives devises (IEDs). They differ with the industrially created landmines. The IEDs have accessible acquisition materials like plastic bottles and syringes. Besides, the IEDs are present in different types of soils in the country. This fact implies that the system to detect the IED must collect the most information possible to distinguish the object underground.

Keywords: multi-agent systems; distributed systems; humanitarian demining; multi-sensor systems

1. Introducción

El problema de los explosivos enterrados o minas anti-personales artesanales es una problemática que afecta a casi la totalidad de las poblaciones civiles en Colombia, debido a las guerras internas que ha sufrido el país. Estos dispositivos son armas muy efectivas, económicas, de fácil construcción y fáciles de esconder (Habib, 2007), en general se emplean para afectar el desempeño de las tropas contrarias y proteger zonas consideradas de importancia como posibles cultivos ilícitos y campamentos de grupos armados. Y aunque, estos dispositivos son empleados como elementos de guerra, son los civiles los más afectados por este tipo de elementos peligrosos.

El problema de desminado es a nivel mundial, dado que estos artefactos y otros explosivos fueron utilizados durante la guerra para proteger los diferentes países. Sin embargo, varios de ellos

quedaron dispersos en los diferentes territorios haciendo que en la actualidad perjudiquen a personas inocentes, de manera física, económica y psicológica. El año de 1994 se considera decisivo para que se detuviera el uso de las minas y se concentraron los esfuerzos en removerlas (Prestes et al., 2016), lo cual se hace explícito en 1999 con la firma por alrededor de 161 países, entre ellos Colombia, del tratado de OTTAWA o conocida formalmente como la convención sobre la prohibición del empleo, almacenamiento, producción y transferencia de minas anti-personales y sobre su destrucción. Por esta necesidad de retirar los dispositivos y los compromisos adquiridos por el tratado, es que se han estudiado diferentes métodos y tecnologías para la detección y remoción de escombros de guerra.

Entre los objetos bajo tierra considerados peligrosos se encuentran las minas terrestres que tienen en términos generales dos clases, las antitanque MAT y las anti-personales MAP. Además, estas últimas, que es el caso de mayor interés, tienen dos clases, las industriales y las artesanales. La mayoría de las minas terrestres industriales están construidas de metal, plástico, madera y TNT. Sin embargo, en Colombia se tienen las denominadas minas populares o artefactos explosivos improvisados AEI, los cuales cumplen con el objetivo de las minas anti-personales y están construidas con elementos caseros como botellas plásticas y compuestos volátiles de fácil adquisición. Los químicos empleados como explosivo de mayor uso en estos artefactos son la pentolita y ANFO, que es una mezcla de nitrato de amonio, químico empleado como fertilizante, y un combustible derivado del petróleo como el ACPM, compuesto al que le son incorporados otros elementos, como partes metálicas o componentes orgánicos, con el propósito de generar el mayor daño posible a la víctima.

Para la detección de las MAP el estado del arte presenta diversas tecnologías, entre ellas estrategias biológicas como perros (Prada & Rodríguez, 2016), abejas y cultivos sensibles a los materiales explosivos (Cumming et al., 2001); mecánicas como podadoras y mediante el uso de sensores (Bhope & Bhalchandra, 2015; Castanedo, 2013; Varshney & Arora, 2004). Se ha comprobado que el uso de sensores de manera individual no es suficiente para lograr una baja tasa de error en la identificación de las minas terrestres (Cremer, Schutte, Schavemaker, & den Breejen, 2001; Prada & Rodríguez, 2016; Prado, Cabrita, & Marques, 2013). Por lo que se encuentra en la literatura la integración de varios sensores, lo que permite reducir la incertidumbre sobre el objeto bajo tierra (Choi, Lee, Baek, & Oh, 2009; Luo, Chang, & Lai, 2011). En las siguientes secciones se tratan los principales aspectos desarrollados en la tesis.

2. Sistema de sensores

En una primera parte de esta investigación doctoral se debió realizar el proceso de selección de los sensores para la aplicación de desminado humanitario. Para esto se requirió realizar una clasificación de los sensores para la detección de los objetos que se encuentran bajo tierra, en donde se establecieran las características relevantes para la detección, tales como sus aspectos físicos y las limitaciones propias e inherentes al sensor. En la Figura 1 se presentan los diferentes tipos de sensores que se han empleado para la detección de minas terrestres (anti-persona y/o antitanques) y la sigla con la que se les identifica en el estado del arte.



Figura 1. Siglas de los sensores empleados en el estado del arte para la detección de MAP

En general, el empleo de estos sensores permite identificar y localizar el dispositivo mediante las características propias de los artefactos. Los de mayor uso al ser de fácil adaptación en dispositivos de mano para operadores de desminado (Prado et al., 2013) y con resultados favorables ante las minas construidas industrialmente en el estado del arte, son el detector de metales MD y el radar de penetración de tierra o denominado GPR por sus siglas en inglés (Bolton, Gader, & Frigui, 2013; Takahashi, Preetz, & Igel, 2011).

Sin embargo, para el caso de los AEI de construcción colombiana, el detector de metales no es de gran utilidad, debido a que la mayoría de estas minas están construidas con materiales plásticos, con compuestos orgánicos y detonadores en su mayoría eléctricos, lo que hace que se requiera complementar la información adquirida con otro tipo de sensores. Además de que las AEI en Colombia presentan características físicas diferentes a las existentes por la industria, como la variedad en los diseños y materiales de construcción. Por otra parte, debido a la guerra civil interna de más de 50 años en el país, los objetos se han enterrado en diferentes tipos de suelos los cuales pueden llegar a ser productivos para la población.

Luego de tener en cuenta estas consideraciones tomadas del estado del arte, en esta tesis doctoral se concibió un sistema que utiliza cinco sensores para adquirir información del terreno. El sistema contiene una cámara color, una cámara IR, una cámara UV, un sensor térmico y un radar de penetración de tierra o GPR. Cada uno tiene diferentes características para la generación de datos que deben ser procesados. La siguiente etapa debe por ello realizar un análisis inteligente, con el objetivo de la toma de decisión que permita determinar la presencia de un objeto diferente a la naturaleza que lo rodea. Con el objeto de incorporar en una sola estructura los 5 sensores citados, que permita la captura de la misma región del terreno de manera colaborativa, se analizaron los sensores y se tomaron decisiones con respecto al pre procesamiento de la información. En particular para los sensores de imagen se debieron implementar algoritmos de corrección que permitieran garantizar el mismo plano de adquisición de información. En la Figura 2 se presenta la estructura actual que incorpora los sensores y que permite el barrido de una zona particular del terreno adquiriendo muestras cada cierta distancia

tanto en X como en Y, la distancia la define el usuario del sistema dada en milímetros. Esta puede ir desde un cm hasta varios cm en cada uno de los dos ejes.



Figura 2. Estructura para realizar el barrido en una región específica, en los círculos amarillos se tienen los IED de prueba.

3. Sistema multi-agente (MAS)

El sistema propuesto para la toma de decisiones tuvo como base un conjunto de consideraciones que se presentan a continuación. Estas van desde los datos generados hasta la propuesta de la estructura de análisis para la toma de decisión en desminado humanitario.

En primer lugar, para integrar la información de múltiples sensores se consideraron 3 escenarios posibles (Cremer et al., 2001): integración de los datos en bruto, integración por características e integración de decisiones. En cuanto a la integración de los datos, al tener información de diferentes tipos de sensores denominada información heterogénea, se tiene que las diferencias en la información obtenida y el significado de ella, no tienen un sentido estadístico, ni se logra aportar conocimiento de la escena al realizar una unión de los datos. En el caso de la integración por características, se tiene que solo es recomendable en los casos en los que se logra asociar los diferentes sensores y el último caso, nivel de integración por decisiones, resultó ser el más adecuado dado que los sensores son muy diferentes. La elección del nivel de integración del sistema de percepción final, dependió de los sensores definitivos del sistema y de la información capturada para que esta fuera asociable. Un ejemplo de este tipo de fusión de información no coincidente para desminado humanitario se presenta en (Gunatilaka & Baertlein, 2001), en este artículo se compara los niveles de integración por características y decisiones para los sensores de inducción electromagnética EMI, GPR e IR.

Adicionalmente, para la tesis doctoral se consideró implementar un esquema de cooperación para hacer el mejor uso de la información disponible, dentro de una arquitectura de

procesamiento que podía tener diferentes topologías. Entre las que se destacan las arquitecturas: centralizada, descentralizada, distribuida y jerárquica.

En la arquitectura centralizada se tienen diferentes fuentes de información pre-procesadas, que son enviadas a un control central en el cual se realiza la integración de la información. En una arquitectura descentralizada cada nodo de fuente de información está encargado de realizar la integración de la captura del sensor o sensores, es decir que hay diferentes puntos en los que se realiza la unión de la información y cada uno puede llegar a tener la capacidad de tomar sus propias decisiones. En la arquitectura distribuida se presentan nodos independientes que procesan la información del sensor, lo envían a un nodo central que realiza una integración de las fuentes y toma una decisión central. Para finalizar, la arquitectura jerárquica consiste en emplear la arquitectura distribuida en varios niveles de unión, realizando una integración de datos en diferentes niveles de jerarquía, lo que implica la distribución de la toma de decisiones. En (Castanedo, Garcia, Patricio, & Molina, 2008; Castanedo et al., 2011) se presenta el caso de aplicación de estas arquitecturas para un sistema que realiza la fusión de sensores visuales empleando el enfoque de multi-agentes, de forma semejante en (Rone & Ben-Tzvi, 2013) se mencionan estas estructuras como parte de las posibles configuraciones que pueden tomar múltiples agentes en diferentes tareas como el mapeo de una región, localización y planeación de movimiento.

En las arquitecturas presentadas se tiene que las estructuras con procesamiento en nodos centrales (arquitectura centralizada, distribuida y jerárquica) requieren de un sistema con tiempos de adquisición y procesamiento controlados para poder ejecutar los procesos de fusión como los presentados en (Durrant-Whyte & Henderson, 2008), es decir un sistema sincronizado, dado que solo es posible tomar una decisión a partir de toda la información requerida a la entrada de estos nodos. En contraste, la arquitectura descentralizada puede realizar la toma de decisión con la información disponible, es decir se emplea para sistemas asíncronos.

Dado que el sistema propuesto en la tesis doctoral debe manejar diferentes tipos de sensores con captura de información en cada una de las fuentes, se requieren de tiempos de adquisición por muestra y de procesamiento específicos por nodo. Se requiere de la implementación de un sistema de tipo asíncrono para hacer que el sistema ejecute diferentes procesos en simultáneo como: captura, integración, decisión y desplazamiento del sistema.

Para el diseño de la arquitectura se tomaron como base los sistemas de múltiples agentes que permite al mismo tiempo tener la toma de decisión. La metodología en la toma de decisiones en un sistema con múltiples agentes es diferente en comparación a la de un sistema de decisión de un solo agente, ya que no solo se tiene la incertidumbre asociada con los efectos de una acción específica, sino que además se presenta la variación dinámica en el entorno como resultado de la acción de otros agentes. Se implementaron diferentes técnicas de aprendizaje de máquina como redes neuronales y lógica difusa que tenían por objeto la toma de decisiones definitiva con respecto al terreno. En la Figura 3 se presenta la arquitectura desarrollada, en la cual se detalla en la imagen de la derecha los elementos esperados por cada nodo o agente del sistema multi-agente presentado en la imagen de la izquierda.

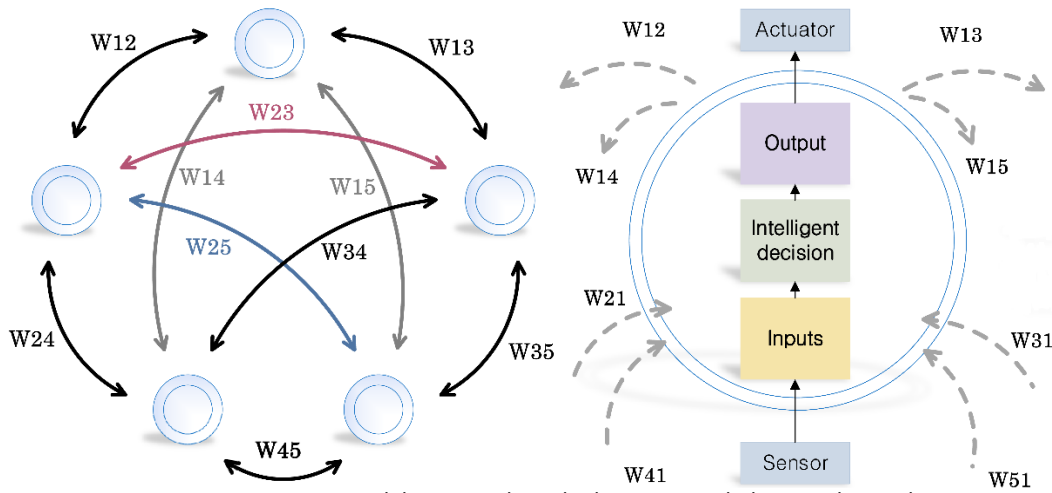


Figura 3. Arquitectura del sistema de múltiples agentes de la tesis doctoral.

4. Resultados

El resultado de esta tesis doctoral se denominó CoD2M-MAPS y este permite la solución de problemas complejos del mundo basados en un sistema multi-agente. Este sistema contiene cinco agentes, cada agente con sus procesos de decisión. Por agente, se estableció de manera local un valor de incertidumbre de la naturaleza del objeto enterrado y como estructura de procesamiento en el agente se utilizaron redes neuronales entrenadas. Adicionalmente, se analizaron diferentes combinaciones entre un conjunto de posibles métodos de decisión para elegir el de mejor desempeño en el proceso de decisión cooperativo.

Los resultados indicaron que los métodos de decisión inteligente tienen mejor desempeño en la detección que los métodos estadísticos (media, mediana, valor máximo y votación). Además, los métodos inteligentes conservan su desempeño ante el cambio de datos de prueba y entregan mejores resultados de clasificación. De igual forma el proceso de cooperación produce un incremento en la precisión de la clasificación y con la información disponible se consigue aumentar las detecciones, así las muestras estén afectadas por factores externos que generan ruido, como la humedad, la luz solar y el viento, entre otros. Algunos resultados del sistema son presentados en la Tabla 1. En la primera fila se indica un ejemplo de resultado de decisión en la incertidumbre del sensor térmico y los demás corresponden con los mejores resultados de cooperación por cada uno de los nodos. Las métricas usadas son la precisión en las decisiones (IED o no IED), la raíz del valor medio del error RMSE por sus siglas en inglés y el área bajo la curva de la gráfica ROC.

Sensor	Precisión	RMSE	AUC
Local TM	0.3750	0.5571	0.4974
Cámara color	0.6388	0.4589	0.7550
IR	0.7777	0.4269	0.8093
UV	0.6250	0.4375	0.8152
Térmico (TM)	0.7361	0.5136	0.6780
GPR	0.6388	0.4098	0.8227

Tabla 1. Muestra de resultados obtenidos con el sistema cooperativo para la detección.

5. Conclusiones

Para problemas en el mundo real y complejos como el desminado humanitario se hace indispensable proponer estructuras de adquisición de información que permitan el uso de múltiples sensores. Luego de tener datos desde múltiples fuentes se debe identificar una arquitectura que permita la toma de decisiones para determinar la presencia de una mina antipersonal. En esta tesis doctoral se concibió, diseñó, implementó y evaluó el sistema de adquisición de múltiples agentes para la toma de decisiones que permite conseguir mejores resultados que los métodos basados en análisis estadístico. El sistema de adquisición está compuesto por cinco sensores heterogéneos y la toma de decisiones por agente está soportada en técnicas de decisión inteligente.

6. Referencias

Libros

- Durrant-Whyte, H., & Henderson, T. C. (2008). Multisensor Data Fusion. In *Springer Handbook of Robotics* (pp. 585–610). https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_26
- Varshney, P. K., & Arora, M. K. (2004). *Advanced Image Processing Techniques for Remotely Sensed Hyperspectral Data*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05605-9>

Artículos de revista

- Bhope, P. C., & Bhalchandra, A. S. (2015). Various Landmine Detection Techniques: A Review. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 771–775.
- Bolton, J., Gader, P., & Frigui, H. (2013). *Embedding the multiple instance problem: applications to landmine detection with ground penetrating radar*. 8709, 87091Q.
- Castanedo, F. (2013). A Review of Data Fusion Techniques. *The Scientific World Journal*, 2013, 1–19. <https://doi.org/10.1155/2013/704504>
- Castanedo, F., Garcia, J., Patricio, M. A., Molina, J. M., García, J., Patricio, M. A., & Molina, J. M. (2011). A Multi-agent Architecture Based on the BDI Model for Data Fusion in Visual Sensor Networks. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 62(3–4), 299–328. <https://doi.org/10.1007/s10846-010-9448-1>
- Choi, Y., Lee, T., Baek, S., & Oh, S. (2009). Online Complete Coverage Path Planning for Mobile Robots. *October*, 5788–5793.
- Cremer, F., Schutte, K., Schavemaker, J. G. M., & den Breejen, E. (2001). A comparison of decision-level sensor-fusion methods for anti-personnel landmine detection. *Information Fusion*, 2(3), 187–208. [https://doi.org/10.1016/S1566-2535\(01\)00034-3](https://doi.org/10.1016/S1566-2535(01)00034-3)
- Cumming, C. J., Aker, C., Fisher, M., Fox, M., La Grone, M. J., Reust, D., ... Williams, V. (2001). Using novel fluorescent polymers as sensory materials for above-ground sensing of chemical signature compounds emanating from buried landmines. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(6), 1119–1128. <https://doi.org/10.1109/36.927423>

- Gunatilaka, A. H., & Baertlein, B. A. (2001). Feature-level and decision-level fusion of noncoincidently sampled sensors for land mine detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 23(6), 577–589. <https://doi.org/10.1109/34.927459>
- Habib, M. K. (2007). Humanitarian Demining : Reality and the Challenge of Technology - The State of the Arts. *Advanced Robotic*, 4(2), 151–172. Retrieved from
- Luo, R. C., Chang, C. C., & Lai, C. C. (2011). Multisensor fusion and integration: Theories, applications, and its perspectives. *IEEE Sensors Journal*, 11(12), 3122–3138. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2166383>
- Prada, P. A., & Rodriguez, M. C. (2016). Demining Dogs in Colombia - A Review of Operational Challenges, Chemical Perspectives, and Practical Implications. *Science and Justice*, 56(4), 269–277. <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2016.03.002>
- Rone, W., & Ben-Tzvi, P. (2013). Mapping, localization and motion planning in mobile multi-robotic systems. *Robotica*, 31(1), 1–23. <https://doi.org/10.1017/S0263574712000021>
- Takahashi, K., Preetz, H., & Igel, J. (2011). Soil properties and performance of landmine detection by metal detector and ground-penetrating radar - Soil characterisation and its verification by a field test. *Journal of Applied Geophysics*, 73(4), 368–377. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.02.008>
- Tilak, O., & Mukhopadhyay, S. (2011). Partially decentralized reinforcement learning in finite, multi-agent Markov decision processes. *AI Communications*, 24(4), 293–309. <https://doi.org/10.3233/AIC-2011-0505>

Memorias de congreso

- Castanedo, F., Garcia, J., Patricio, M. A., & Molina, J. M. (2008). Analysis of distributed fusion alternatives in coordinated vision agents. *Proceedings of the 11th International Conference on Information Fusion, FUSION 2008*, 1279–1284.
- Prado, J., Cabrita, G., & Marques, L. (2013). Bayesian sensor fusion for land-mine detection using a dual-sensor hand-held device. *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 3887–3892. <https://doi.org/10.1109/IECON.2013.6699756>
- Prestes, E., Marques, L., Neuland, R., Mantelli, M., Maffei, R., Dogru, S., ... Madhavan, R. (2016). Automation of Humanitarian Demining. *International Conference on Robotics and Automation for Humanitarian Applications (RAHA)*, 23(3), 23–24.

Sobre los Autores

- **Johana Flórez:** Ingeniera Electrónica, Magistra en Ingeniería Electrónica, Candidata a Doctora en Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana. Profesora de Cátedra de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana johana.florez@javeriana.edu.co
- **Carlos Parra:** Ingeniero Electrónico, Magister en Ingeniería Eléctrica, Ph.D. de la Universidad de Toulouse. Profesor titular del Departamento de Electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana. Y tutor principal de la tesis doctoral carlos.parra@javeriana.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2019 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)