

## Transporte multi-AGV de una carga: estado del arte y propuesta centralizada

Espinosa, F.<sup>a,\*</sup>, Santos, C.<sup>a</sup>, Sierra-García, J.E.<sup>b\*,c</sup>

<sup>a</sup> Dep. de Electrónica. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Alcalá. Campus Universitario s/n. 28805 Alcalá de Henares, 28805. Madrid. España.

<sup>b</sup> Departamento de Ingeniería Electromecánica, Área de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Burgos, Av. Cantabria, 09006, Burgos, España.

<sup>c</sup> ASTI Mobile Robotics, A-1 Km 213, 09390, Burgos, España.

**To cite this article:** Espinosa, F., Santos, C., Sierra-García, J.E. 2021. Multi-AGV transport of a load: state of art and centralized proposal. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 18, 82-91. <https://doi.org/10.4995/riai.2020.12846>

### Resumen

Un vehículo de guiado automático (Automatic Guided Vehicle –AGV-en inglés) es un sistema de transporte industrial completamente automatizado y alimentado por baterías. Estos vehículos son ampliamente utilizados en el sector industrial para sustituir a carretillas manuales y cintas transportadoras. El reto de la utilización de AGVs como agentes de transporte en entornos industriales pasa por dotarles de la inteligencia suficiente para desarrollar tareas colaborativas. Dentro de estas tareas colaborativas se diferencia el transporte multi-AGV de un objeto del transporte multi-AGV de múltiples objetos. Este trabajo presenta el estado del arte de las soluciones de transporte cooperativo de un objeto entre varios AGVs. Para ello, se revisan los fundamentos teóricos y se clasifican y describen varias propuestas para su resolución. Finalmente se propone una solución de control remoto centralizado para el transporte de una carga con AGVs omnidireccionales.

*Palabras clave:* AGVs, vehículo de guiado automático, unidad de transporte omnidireccional, transporte cooperativo, control industrial, sector industrial.

### Multi-AGV transport of a load: state of art and centralized proposal

#### Abstract

An automatic guided vehicle is a battery powered fully automated industrial transport system. These vehicles are widely used in the industrial sector to substitute manual forklifts and conveyors. The challenge of using AGVs as transport agents in industrial environments goes through providing them with enough intelligence to develop collaborative tasks. Among these collaborative tasks the multi-AGV transport of one object is differentiated from the multi-object multi-AGV transport. This work presents the state of art of cooperative transport solutions of one object between several AGVs. The theoretical fundamentals are revised and several proposals for its resolution are classified and described. Finally, an own proposal of one-object multi-AGV transport with omnidirectional AGVs based on centralized remote control is presented.

*Keywords:* AVGs, automatic guided vehicle, omnidirectional transport unit, cooperative transport, industrial control, industrial sector.

### 1. Introducción

La organización internacional de estandarización ISO define al robot como un mecanismo programado con dos o más grados de autonomía, moviéndose en un determinado entorno dentro del cual desarrolla las tareas previstas (Wang, 2018). Se dice que es inteligente si es capaz de percibir el entorno y tomar decisiones. Desde el punto de vista del entorno de aplicación

los robots inteligentes pueden clasificarse en robots industriales, de servicios y especializados.

La robótica industrial sigue experimentando un crecimiento sostenido en la última década como muestra la Figura 1 (Wang, 2018). Siendo el mercado asiático, el europeo y el americano los principales motores de este desarrollo. Este crecimiento es, a su vez, impulsor de nuevas líneas de investigación tanto en aspectos mecánicos y de materiales, como electrónicos,

\*Autor para correspondencia: [jesierra@ubu.es](mailto:jesierra@ubu.es)

sensoriales y de inteligencia artificial (big data, deep learning, cloud computing). La incorporación de realidad aumentada y dispositivos portables, la interacción hombre-máquina y el reconocimiento emocional para llevar a cabo tareas colaborativas son algunos de los retos de la robótica en el contexto de la Industria 4.0. La cooperación entre vehículos de guiado automático o AGVs (Automatic Guided Vehicle en inglés), al igual que con vehículos aéreos no tripulados o UAVs (del inglés Unmanned Aerial Vehicle), incrementa la capacidad de adaptarse mejor a entornos dinámicos y, con ello, el nivel de tolerancia a fallos.

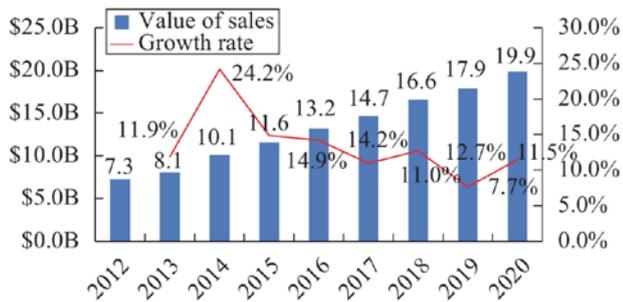


Figura 1: Volumen global de ventas y crecimiento de robots industriales en el periodo 2012-2020 [Wang, 2018].

Un vehículo de guiado automático es un sistema de transporte industrial completamente automatizado y alimentado por baterías. En (Liu, 2018) el AGV se asocia al concepto de sistema de fabricación flexible y reconfigurable (Flexible Manufacturing System –FMS-), al que contribuyen transportando cargas automáticamente y sustituyendo las tradicionales líneas de producción.

La aplicación más relevante de AGVs en el entorno industrial es la relacionada con el almacenamiento y la logística. La logística es la gestión del flujo de cosas que pueden ser físicas (materiales, productos, y otras existencias en el proceso productivo) o no como es el caso de flujo de información. Frente a la solución clásica del seguimiento automático de rutas establecidas con cinta magnética y el apoyo en sensores de seguridad para evitar colisiones, se está trabajando desde el punto sensorial, de comunicación y de control para conseguir planificación flexible de rutas, posicionamiento y guiado más preciso, así como toma de decisiones on-line ante situaciones no planificadas.

Los robots en logística contribuyen a automatizar el proceso de almacenamiento y desplazamiento de materiales y productos como parte del proceso de fabricación. En 2017 experimentaron un crecimiento del 162% con respecto a 2016, según el International Federation of Robotics 2018 Service Report (Ria, 2019), y entre 2019 y 2020 se estima que 485.000 nuevas unidades serán vendidas. En junio de 2018, Google invirtió \$500 millones en la automatización de JD (equivalente chino de Amazon) y a finales del mismo año Alibaba invirtió \$15 billones en robotizar su propia logística (Owen, 2018)..

El concepto de flexibilidad en la industria está íntimamente relacionado con el de versatilidad, según el cual un elemento puede ser utilizado en múltiples aplicaciones diferentes. En algunas industrias existe una alta variabilidad en los tipos, dimensiones y pesos a transportar por los AGVs, en este sentido se requiere que los AGVs sean versátiles y puedan adaptarse a las tipologías de flujos intralogísticos existentes.

El transporte de cargas pesadas incrementa el tamaño y el coste de los AGVs, además la reutilización de AGVs pesados para el transporte de cargas ligeras en industrias de alta variabilidad de flujos está muy limitada. Por otro lado, si los grandes AGVs solo se utilizan para transportar cargas pesadas probablemente su porcentaje de utilización sea bajo y no produzcan un rendimiento suficiente. Una solución a este problema es el transporte cooperativo de un objeto entre varios AGVs. De esta forma vehículos ligeros pueden utilizarse de forma óptima en el transporte de cargas pequeñas y/o ligeras, cooperando entre ellos cuando sea necesario transportar una carga grande y/o pesada.

No hay uniformidad en la definición formal de cooperación entre robots móviles. Para algunos autores la cooperación se traduce en compartir un objetivo común (Wang, 1994) (Quinn, 2004) incluso si no hay interacción entre ellos. Otros autores consideran cooperación solo si las actuaciones están coordinadas y complementan sus capacidades (Brown, 1995), (Yan, 2013). En cualquier caso, la cooperación entre vehículos para el transporte de un objeto se plantea cuando es demasiado pesado, voluminoso o con forma compleja para que pueda realizarse por una única unidad robotizada.

El creciente interés por la robótica cooperativa está motivado por las ventajas que las configuraciones multi-robot presentan frente a las de robots independientes [Parker, 2008], [Wang, 2013]: a) hay tareas demasiado complejas para ser abordadas por un único robot, b) hay tareas que son inherentemente distribuidas, c) contar con varios robots con recursos limitados suele ser más económico y ofrece una mayor flexibilidad que contar con un robot de muy altas prestaciones, d) el paralelismo de tareas facilita que soluciones multi-robot acometan ciertas tareas de forma más rápida, y e) disponer de varios robots (alternativos) incrementa la robustez de la solución.

La Figura 2 muestra una posible clasificación de las diferentes alternativas para el transporte de cargas mediante AGVs en entornos industriales.

La coordinación de una flota de AGVs realizando tareas industriales en un mismo entorno es fundamental para la efectividad de la aplicación y optimización de recursos. En sistemas multi-robot esta coordinación se lleva a cabo de forma centralizada o distribuida (Meissner, 2017). En el control centralizado una única unidad de cómputo, generalmente no embarcada, supervisa el funcionamiento de cada una de las unidades de transporte. Toda la información percibida por los AGVs o por el entorno es transmitida a la unidad central que se encarga de coordinar y tomar todas las decisiones. Esta arquitectura permite relajar de carga computacional a las unidades móviles lo que contribuye a abaratar costes hardware, a la vez que simplifica el control al disponer de toda la información en el nodo de decisión. Los principales inconvenientes de utilizar esta técnica son: la dependencia del canal de comunicación y su sobrecarga, así como el aumento de los tiempos de respuesta de las unidades robóticas. En (Chen, 2006), (Hichri, 2016) se describe el control centralizado para el transporte cooperativo de una carga.

En la solución distribuida o descentralizada, las tareas de cada AGV se controlan de forma local, sin necesidad de disponer de toda la información del conjunto de unidades robóticas. Esta arquitectura responde mejor a entornos desconocidos o cambiantes ofreciendo mayor flexibilidad, adaptabilidad y menor dependencia de la red de comunicación.

Los principales inconvenientes de esta solución son: el nivel de especialización requerido para cada una de las unidades móviles y la mayor complejidad de los controladores implementados para encontrar soluciones satisfactorias sin disponer de toda la información del resto de unidades.

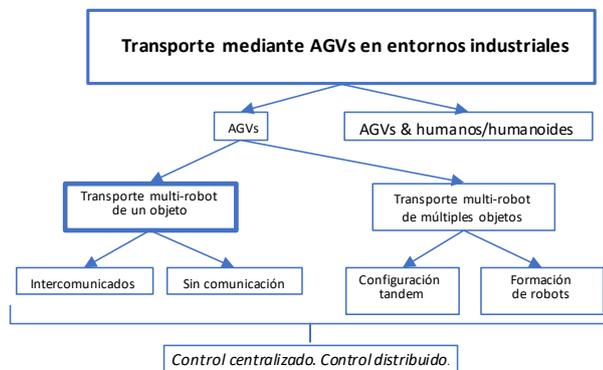


Figura 2: Alternativas de transporte industrial mediante AGVs.

En (Berman, 2002) and (Krnjak, 2015), se muestran ejemplos de control distribuido de múltiples AGV en tareas de transporte.

En este trabajo se aborda el transporte multi-AGV de un único objeto, se revisan los fundamentos teóricos y el estado del conocimiento como paso previo a la propuesta de una solución de control remoto y centralizado de AGVs omnidireccionales.

El resto del documento se ha organizado del siguiente modo. En la sección 2 se detallan los fundamentos teóricos del transporte cooperativo de un objeto entre varios AGVs, así como una revisión de trabajos previos. Posteriormente, en la sección 3 se describe una propuesta de solución de control multi-AGV remoto para el seguimiento no lineal de trayectorias del objeto transportado, incluyendo aspectos de trabajo futuro. El documento finaliza con las conclusiones.

## 2. Estado del arte y conceptos teóricos

En la bibliografía se pueden encontrar referencias de transporte de un objeto por vehículos autónomos en varios entornos: aéreos (Mellinger, 2010), acuáticos (Choi, 2001), (Esposito, 2008) y, fundamentalmente, terrestres.

En ciertas aplicaciones industriales como automoción, aeronáutica y construcción se requieren AGVs capaces de soportar extensas y pesadas cargas (Ullrich, 2015).

En (Tuci, 2018) la cooperación entre robots para el transporte de cargas únicas puede llevarse a cabo de diferentes formas: empujando el objeto, sujetándolo con los mecanismos adecuados o rodeándolo, siempre actuando en los puntos clave.

Como paso intermedio a la autonomía completa de robots transportando un objeto, se desarrollaron trabajos en los que el conjunto de robots estaba directamente gestionado por el hombre. En (Hirata, 2001) se describe el control distribuido de varios robots transportando un objeto en cooperación con una persona. Cada robot se comporta como si una rueda omnidireccional, libre de giro, se tratase. Dada la configuración de ruedas de los robots utilizados, en el desplazamiento se producen deslizamientos de alguna de las ruedas del propio AGV. En el mismo trabajo se detallan las ecuaciones que describen la dinámica y la fuerza aplicada a

cada robot para que emulen el comportamiento de una rueda libre.

Para el transporte de un objeto mediante un sistema multi-robot, un aspecto importante a determinar es el tipo de anclaje. En (Alonso-Mora, 2017) se muestran ejemplos de fijación, desde soluciones mecánicas sencillas hasta otras más sofisticadas en las que la unidad móvil incorpora manipuladores con varios grados de libertad.

La solución global de transporte cooperativo de una carga incluye aspectos sensoriales, de comunicación y de control (Cameron, 1994), (Bostel, 1996), (Andreasson, 2015). El control abarca diferentes niveles, desde la planificación de tareas y trayectorias (Qiu, 2010) hasta el control de los actuadores de movimiento de cada unidad de transporte.

El comportamiento dinámico de AGVs está ampliamente referenciado en la bibliografía (Saha, 1989), (Hirata, 2001), (Choi, 2001), (Tan, 2002). En la mayoría de los casos se recurre al modelo Lagrangiano para reflejar el efecto tanto de pares y fuerzas ( $T$ ) de los actuadores como de perturbaciones externas ( $F$ ) sobre la posición  $q(t)$ , velocidad  $\dot{q}(t)$  y aceleración  $\ddot{q}(t)$ :

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q}(t) = T + F \quad (1)$$

$$\varepsilon = V(q) - \dot{q} \quad (2)$$

Siendo  $M(q)$  la matriz de inercia, y  $C(q, \dot{q})$  el término que incluye la fuerza centrípeta y de Coriolis. La variable  $q$  en este trabajo contiene la posición y orientación de cada uno de los robots y del objeto a transportar. El objetivo básico de control es conseguir que el error de seguimiento de referencias de velocidad  $V(q)$  sea nulo: En definitiva, corregir los errores longitudinales y laterales (Tan, 2002).

En este trabajo asumimos que cada AGV incorpora los sistemas de control necesarios para compensar los aspectos de su propia dinámica y la impuesta por la carga a transportar. De esta forma, el problema a resolver se centra en la combinación de velocidades lineales y angulares a aplicar a cada AGV, modelado por su componente cinemática, para garantizar el seguimiento de trayectorias no lineales del conjunto sin deslizamientos (Butdee, 2009), (Amoozgar, 2012). Recuerde que RIAI está considerado como un “*Camera Ready Copy Journal*” (CRC). Esto implica que los autores son responsables de aplicar el formato correspondiente a sus contribuciones. Desde la secretaría de la revista no se ejecutará ninguna acción de formateo a los artículos. A continuación, vemos unas subsecciones.

### 2.1. Fundamentos cinemáticos

El problema cinemático asociado al transporte de objetos grandes y/o pesados mediante AGVs tiene su origen en el ya planteado por (Borenstein, 1995), (Borenstein, 2000) para una plataforma de transporte. En este trabajo se aborda el control de vehículos omnidireccionales (Wada, 1996), (Adăscăliței, 2011), con múltiples grados de libertad (MGDL). Los MGDL presentan importantes ventajas frente a los 2-GDL, especialmente cuando el espacio de trabajo es reducido y han de afrontar el reto asociado a las restricciones mecánicas impuestas por la estructura. Esta restricción puede provocar deslizamiento e inestabilidad (jerky) en el avance de las ruedas, lo que afecta negativamente al sistema sensorial y de control del AGV.

Las estructuras básicas de robots móviles son tipo triciclo con solo una rueda activa motriz y directriz y tipo tracción diferencial con dos ruedas activas motrices. Pero ninguna de estas estructuras permite el desplazamiento lateral del vehículo. Para avanzar en esta idea surge la actuación sincronizada (synchro-drive) de vehículos omnidireccionales.

Los vehículos omnidireccionales típicamente constan de ruedas que son, a la vez, motrices y directrices. Esta configuración permite a la plataforma moverse en todas las direcciones sin necesidad de cambiar la orientación del cuerpo de la misma. En [Peng, 2016] se describe el diseño mecánico y el control de un robot omnidireccional para transporte de material.

La Figura 3 muestra las variables fundamentales para describir la cinemática de un objeto transportado por dos AGVs omnidireccionales. Tanto la unidad líder L como la seguidora F están representadas por su punto de referencia con velocidad  $V$  y orientación  $\varphi$ . El punto de referencia del objeto a transportar O queda caracterizado por sus velocidades lineal  $V_O$  y angular  $W_O$ . El punto de referencia de los AGVs está ubicado en el eje longitudinal del objeto a distancias  $d_L$  y  $d_F$  del punto O. Un concepto importante en el desplazamiento del objeto sin deslizamiento de las unidades MGDL es el centro instantáneo de rotación CIR, punto imaginario sobre el cual gira, en todo instante, el cuerpo rígido bajo estudio. Las velocidades de cada AGV están condicionadas a las establecidas para que el objeto siga una determinada trayectoria.

En tramos rectos, los vectores de velocidad lineal son idénticos:  $V_O = V_L = V_F \neq 0$ , y los vectores de velocidad angular nulos:  $W_O = W_L = W_F = 0$ , es decir  $\varphi_L = \varphi_F$ . En tramos curvilíneos, los vectores de velocidad angular son idénticos:  $W_O = W_L = W_F \neq 0$ , y los vectores de velocidad lineal  $V_i$  son los necesarios para cumplir con las restricciones:

$$\frac{V_O}{W_O} = R_O, \quad \frac{V_L}{W_L} = R_L, \quad \frac{V_F}{W_F} = R_F \quad (3)$$

$$V_O = V_L \cos \varphi_L = V_F \cos \varphi_F \quad (4)$$

De donde se deducen las variables de actuación de la unidad líder:

$$V_L = \sqrt{V_O^2 + W_O^2 d_L^2}, \quad \varphi_L = \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{W_O d_L}{V_O}\right)^2}} \quad (5)$$

Del mismo modo, midiendo las variables de tracción  $V_L$  y dirección  $\varphi_L$  del AGV (por ejemplo a partir de encoders) se puede obtener la velocidad angular del punto de referencia  $W_L$ :

$$W_L = \frac{V_L}{d_L} \sin \varphi \quad (6)$$

Igualmente se opera para obtener  $V_F$ ,  $\varphi_F$ ,  $W_F$  de la unidad seguidora.

El cumplimiento de las relaciones anteriores, para las diferentes unidades de transporte, asegura que no hay deslizamiento (Borenstein, 1995). Sin embargo, esto queda condicionado por el tiempo de respuesta impuesto por la

dinámica del conjunto. En la práctica, las soluciones de control digital permiten superar esta restricción seleccionando convenientemente los periodos de muestreo de los diferentes controladores.

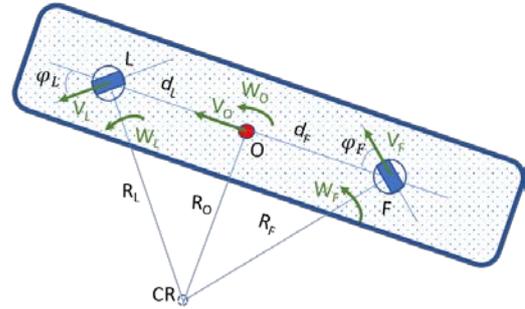


Figura 3: Relación entre las variables de control del objeto y las variables de control de los AGVs omnidireccionales L y F.

## 2.2. Revisión de propuestas de transporte de carga única mediante AGVs

Esta revisión se realiza desde un doble enfoque, de control y de anclaje mecánico del objeto a las unidades de transporte.

En (Hasimoto, 1993) se describe el control coordinado de varios robots no omnidireccionales para trasladar un objeto común. El enlace entre el robot y la carga se lleva a cabo mediante un eje de rotación pasivo y un enlace longitudinal activo como muestra la Figura 4. Para el control coordinado se tiene una unidad líder a la que se impone una trayectoria a seguir en función del recorrido previsto para el objeto. El líder comunica su posición al resto de unidades seguidoras y estas calculan tanto las actuaciones de movimiento de las ruedas como del enlace longitudinal activo para evitar deslizamientos. Si alguno de los robots seguidores llega al límite del enlace longitudinal, lo comunica a la unidad líder para que recalculé convenientemente la trayectoria. La propuesta se valida únicamente mediante simulación.

En (Kosuge, 1996) se diseña el control descentralizado de robots omnidireccionales para transportar un único objeto. Se propone una solución sin comunicación entre la unidad líder y las seguidoras. Se defiende esta solución porque la centralizada requiere una mayor comunicación entre las unidades de la formación. La referencia se aplica únicamente a la unidad líder y las seguidoras se encargan de estimar el movimiento del líder para replicarlo en su sistema de control. Los robots solo cuentan con un grado de libertad, por lo que la solución no es de aplicación a robots no omnidireccionales. El sensor de fuerza de las unidades seguidoras permite estimar la velocidad de la unidad líder. El trabajo incluye resultados experimentales con dos robots.

En (Kosuge, 1999) se amplía la solución de control descentralizado anterior al caso de robots no-omnidireccionales con dos ruedas activas. La principal novedad está en que cada robot está unido al objeto a transportar mediante una junta libre de giro, las unidades seguidoras cuentan además con un mecanismo pasivo deslizante en el eje que une ambas ruedas activas, como muestra la Figura 5. La validación experimental se realiza con una unidad líder y dos seguidoras.

El control de velocidad por campo pasivo (Passive Velocity Field Control -PVFC-) fue inicialmente desarrollado para

sistemas robóticos totalmente actuados que requerían coordinación e interacción con el entorno físico (Li, 1999). Esta metodología de diseño de controladores se caracteriza por utilizar referencias de velocidad (campos de velocidad) tangentes a la trayectoria en lugar de referencias espaciales sujetas a marcas de tiempo. Además, la solución de control garantiza que la energía del sistema decrece hasta llegar al estado de equilibrio. La teoría de PVFC fue desarrollada en (Li, 2001a, b). Siguiendo la metodología de control PVFC, en (Suh, 2005)]se diseña e implementa una solución de control descentralizado para el transporte de un único objeto mediante varios AGVs no omnidireccionales. La solución de control incorpora, además, un término de acoplamiento entre ambas.

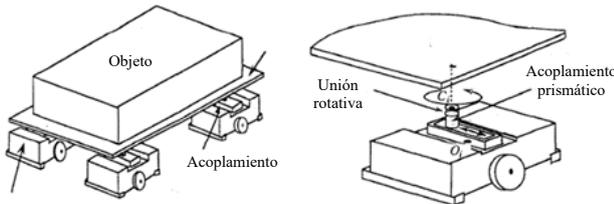


Figura 4: Esquema de solución de transporte de un objeto propuesto en (Hasimoto, 1993). Detalle del mecanismo de acoplamiento robot-objeto.

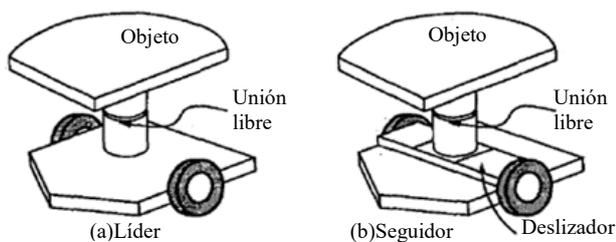


Figura 5: Configuración de enlace mecánico con el objeto a transportar de las unidades líder y seguidora (Kosuge, 1999).

En (Yang, 2003) se describe el control de dos robots no omnidireccionales para el transporte de una carga única. Los dos robots son idénticos desde el punto de vista mecánico y están sujetos a la carga mediante una junta de giro pasiva ubicada en el eje longitudinal del objeto y no requieren de comunicación alguna entre ambos, tal y como se muestra en la Figura 6. La unidad seguidora implementa un control PI para mantener la dirección prevista del objeto y un control borroso para evitar posibles obstáculos.

En (Neuman, 2014) se recurre también al control de fuerza de robots, en este caso no omnidireccionales, para transportar grandes objetos. El control de fuerza se combina con un control global de la formación de robots (cluster space control), en lugar de abordar el control individualizado de cada unidad móvil.

En (Wang, 2016) se diseña la algoritmia de control y resultados de simulación para el transporte de objetos mediante la cooperación de varios robots sin comunicación entre ellos. Se cuenta con un robot líder que establece la dirección y orientación del movimiento, el resto de los robots aplican sus acciones de forma descentralizada sensando el movimiento del propio objeto con detectores de fuerza.

En la mayoría de los trabajos de guiado cooperativo se utiliza comunicación explícita entre las unidades, tanto de mensajes de control como sensoriales. En (Pereira, 2002) se proponen soluciones de comunicación implícita entre los múltiples robots encargados del transporte de la carga única.

Se entiende por comunicación implícita la resultante de la interacción robot-entorno a través de sensores de fuerza, de sensores de proximidad, por las marcas del entorno, por la huella acústica de los robots subacuáticos, etc. El control del transporte de la carga única es liderado por una unidad que avanza siempre hacia adelante y está dotada de diferentes sensores exteroceptivos. El resto de las unidades utilizan sensores de fuerza para interpretar los movimientos impuestos por el líder al objeto a transportar.

En (Wada, 2013) se presenta un método basado en potenciales para el transporte cooperativo de un único objeto mediante múltiples robots omnidireccionales. La combinación de fuerzas de atracción hacia el objetivo (target) y repulsión de un obstáculo consiguen el movimiento estable de los robots manteniendo las restricciones físicas impuestas por el objeto a transportar. Se diseña un mecanismo de tracción y dirección para las ruedas activas facilitando el movimiento en cualquier dirección. El sistema de control es centralizado y cuenta con dos niveles. Nivel servidor, externo a la unidad de transporte, y nivel robot. El servidor dispone de un mapa del entorno, y en función de la información sensorial recibida, se encarga de generar las consignas de cada unidad de transporte. Todos constituyen nodos de una red wifi que permite su intercomunicación. Los autores recurren al método de potenciales basado en fuerzas de atracción hacia un objetivo y de repulsión de obstáculos.

En (Yufka, 2015) se utiliza la idea de un robot líder virtual ubicado en el centro de gravedad del objeto a transportar, al ser este la referencia ideal de movimiento de la formación. Los robots utilizados en esta estrategia son no-omnidireccionales. Las consignas para los robots seguidores se calculan por transformación de las resultantes generadas para el líder virtual, según indica la Figura 7. La configuración de la formación depende de la forma del objeto. Se utiliza un control cinemático basado en Lyapunov para las unidades seguidoras, admitiendo que no hay deslizamiento. La solución global de control incluye una componente feed-forward/feed-back y otra en control de modo deslizante (sliding-mode control). En este caso, la demostración se realiza con robots P3DX reales.

En (Solaque, 2015) se describe una solución similar a la anterior. Para el líder virtual se diseña un control basado en el clásico PID e implementado con la herramienta ROS (Robot Operating System). Para las unidades seguidoras el control se resuelve mediante un triple PID: orientación, velocidad lineal en el eje x, velocidad lineal en el eje y. El trabajo únicamente incluye resultados de simulación.

En (Habibi, 2015) se describe un sistema multirobot para el transporte de una carga. El algoritmo de estimación del centroide del objeto es la clave para conseguir un movimiento estable sin conocer la geometría del objeto. Los sistemas de control se encargan de la rotación de cada robot sobre su propio eje, de la rotación del objeto sobre el eje de su centroide y de la traslación del objeto. En la Figura 8 se muestra un esquema de la propuesta. Los robots disponen de un perfil que les permite adherirse al del objeto. La trayectoria a seguir se define mediante un conjunto de puntos (azules en la Figura 8).

En (Ohashi, 2016) para el desplazamiento de cargas pesadas y/o voluminosas se propone el uso de plataformas rodantes, libres y ligeras (handcarts), sobre las que se ubica el objeto a transportar. Uno o varios robots se encargan de empujar y dirigir el objeto embarcado, tal y como muestra la Figura 9.c.

Tabla 1: Clasificaciones de soluciones de transporte de carga única con AGVs.

Parámetro	Clasificación
Tipo de AGV	<p><b>Omnidireccionales:</b> Tienen la ventaja de tener una mayor maniobrabilidad, por lo que pueden adaptarse mejor a la presencia de obstáculos en el entorno. La desventaja es que normalmente las ruedas omnidireccionales o los sistemas motrices multidireccionales son más complejos y costosos. (Kosuge, 1996),(Wada, 2013), (Wada, 2016)</p> <p><b>No omnidireccionales:</b> Normalmente tienen un coste más reducido. Las limitaciones de movilidad imponen estrategias de control más avanzadas. (Hasimoto, 1993), (Kosuge, 1999), (Suh, 2005), (Yang, 2003), (Neuman, 2014), (Pereira, 2002), (Wada, 2013), (Yufka, 2015), (Solaque, 2015), (Habibi, 2015), (Ohashi, 2016)</p>
Tipo de control	<p><b>Centralizado:</b> El procesamiento centralizado permite reducir los recursos de cómputo necesarios para cada AGV. El sistema de control considera las variables de todos los AGVs simultáneamente y diseña un estrategia común de flota. Es sensible a problemas de sincronización y latencia en las comunicaciones. Los avances en las comunicaciones 4G-5G ayudan a reducir estos problemas. (Neuman, 2014), (Wada, 2013), (Solaque, 2015)</p> <p><b>Descentralizado:</b> Reduce los problemas de sincronización y latencia de las comunicaciones. Puede reaccionar más rápido ante cambios en el entorno. Sin embargo, el coste global es mayor y crece con el número de AGVs. (Hasimoto, 1993), (Kosuge, 1996), (Kosuge, 1999), (Suh, 2005), (Yang, 2003), (Wang, 2016), (Pereira, 2002), (Yufka, 2015), (Habibi, 2015), (Solaque, 2015)</p>
Comunicación entre AGVs	<p><b>1-N:</b> Un AGV, normalmente el líder, envía información unidireccional al resto. Al disponer de esta información puede reducir el coste de sensorización del resto de AGVs, pero es sensible a problemas de sincronización. (Hasimoto, 1993)</p> <p><b>N-M:</b> Se crea una red en forma de árbol y unos AGVs envían la información a los que están en el nivel de árbol más próximo, normalmente los más cercanos físicamente. El reenvío de información de unos AGVs a otros aumenta el retardo de la comunicación. (Habibi, 2015)</p> <p><b>N-N:</b> Todos los AGVs envían y reciben información del resto. Al conocer el estado del resto pueden plantearse estrategias de control descentralizado avanzadas, pero tiene el inconveniente de un mayor consumo de ancho de banda de la red de comunicación. (Yufka, 2015)</p> <p><b>Centro remoto-N:</b> Un centro remoto mantiene la comunicación bidireccional con todos los AGVs, pero no hay comunicación entre estos. (Neuman, 2014), (Wada, 2013), (Solaque, 2015)</p> <p><b>Sin comunicación entre AGVs:</b> Esta solución reduce los costes de los dispositivos de comunicación, pero necesita mayor inversión en sensorización (fuerza, presión, etc). (Kosuge, 1996),(Kosuge, 1999), (Suh, 2005), (Yang, 2003), (Wang, 2016), (Pereira, 2002)</p>
Reparto de tareas entre AGVs	<p><b>Líder-seguidor:</b> Un AGV líder se encarga de seguir la trayectoria deseada, mientras el resto de AGVs intentan no oponerse al movimiento del objeto a transportar. Menos sensible a problemas de comunicación. En general requiere de mayor sensorización de la carga. (Hasimoto, 1993), (Kosuge, 1996),(Kosuge, 1999), (Yang, 2003), (Wang, 2016), (Pereira, 2002)</p> <p><b>Colaborativo:</b> Todas las unidades contribuyen por igual al cumplimiento del objetivo común, es decir, al seguimiento de la trayectoria deseada. Requiere de buena sincronización entre AGVs. En general permite realizar maniobras más complejas, pero el control es más complejo. (Suh, 2005), (Neuman, 2014), (Wada, 2013), (Yufka, 2015), (Solaque, 2015), (Habibi, 2015)</p>
Tipo de anclaje	<p><b>Articulación rotativa:</b> Este tipo es el más simple y económico. Puede utilizarse para pesos elevados, pero puede provocar problemas de deslizamiento en los AGVs. (Suh, 2005), (Pereira, 2002), (Yufka, 2015)</p> <p><b>Articulación rotativa con deslizador pasivo:</b> Similar a la anterior, pero mejora el problema del deslizamiento al añadir un grado de libertad. Esto aumenta el coste y dificulta el anclaje/desanclaje automático. (Hasimoto, 1993), (Kosuge, 1999)</p> <p><b>Brazo articulado:</b> Permite modificar la configuración mecánica del anclaje del AGV. Esto mejora la maniobrabilidad de los AGVs y la capacidad para evitar obstáculos. (Yang, 2003)</p> <p><b>Pinza r-one:</b> Se trata de una pinza omnidireccional con rotación libre. Permite realizar el acoplamiento/desacoplamiento automático desde todas las direcciones. En cambio soporta menos fuerza de arrastre. (Habibi, 2015)</p> <p><b>Brazo y carretillas:</b> La principal ventaja es que permite elevar una pieza desde el suelo, así puede combinarse fácilmente con otras soluciones de transporte manuales o automáticas. El inconveniente es el coste elevado que requiere. (Ohashi, 2016)</p>

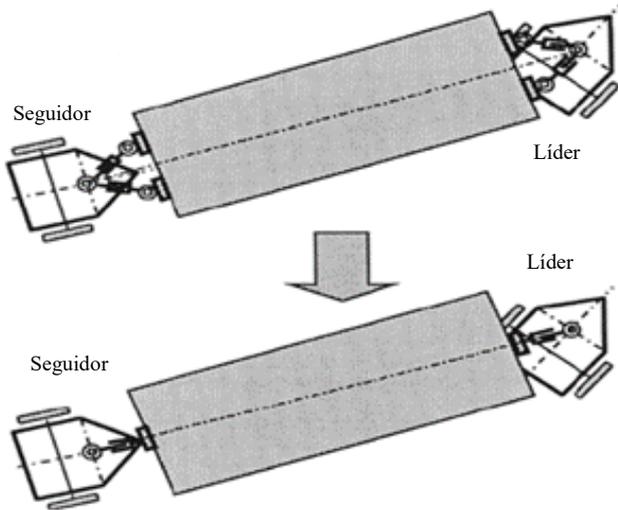


Figura 6: Esquema de la configuración líder-seguidor para el transporte de un objeto (Yang, 2003).

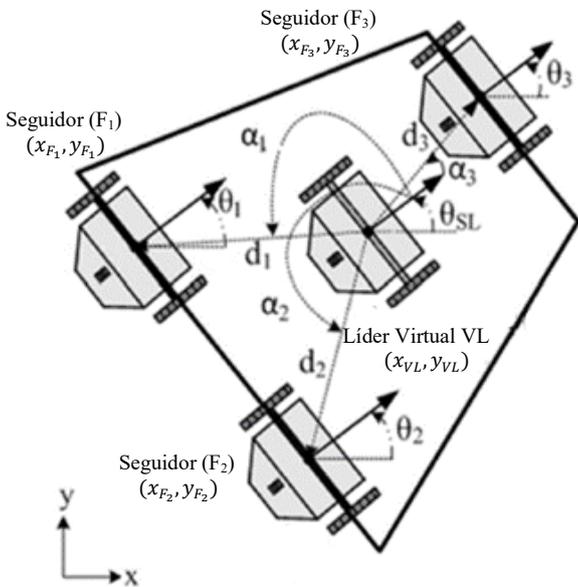


Figura 7: Ejemplo de aplicación de la solución propuesta por (Yufka, 2015) para el transporte de único objeto mediante varios AGVs tomando como referencia el comportamiento de la unidad virtual.

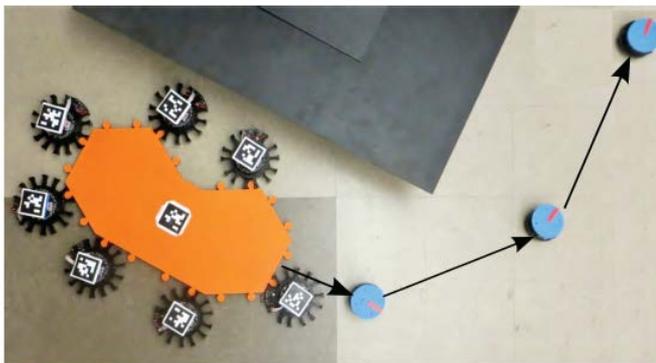


Figura 8: Solución propuesta por (Habibi, 2015) para enlace con el objeto a transportar y planificación de la trayectoria a seguir.

### 3. Propuesta centralizada de transporte de un objeto mediante AGVs omnidireccionales

La flexibilidad de movimiento y adaptabilidad al entorno propios del transporte multi-AGV de múltiples cargas ha hecho que, en este contexto, primen las soluciones de control descentralizado o distribuido, todo ello favorecido por el notable avance de las comunicaciones. Sin embargo, la rigidez mecánica que caracteriza al transporte multi-AGV de una única carga limita el interés de estas propuestas en favor de un control centralizado permitiendo reducir los recursos de computación de cada AGV y favoreciendo la coordinación.

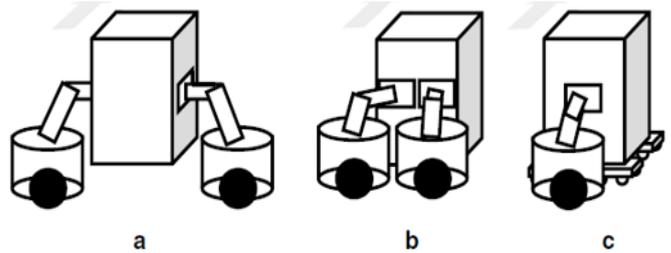


Figura 9: Soluciones al transporte de una carga mediante AGVs (Ohashi, 2016): (a) sujeción, (b) empuje, y (c) plataformas de soporte rodantes y libres maniobradas por AGVs.

El punto de partida de este trabajo es el de un conjunto de AGVs omnidireccionales, en número y ubicación adecuados para el peso, tamaño y forma de la carga a transportar. El problema se aborda como si de un único móvil virtual se tratase, con dimensiones conocidas y con una marca de referencia que permita realizar el seguimiento de trayectorias, tal y como se muestra en la Figura 10. Por simplicidad, el objeto es transportado por dos AGVs idénticos controlados de forma remota, unidad líder L y unidad seguidora F. El objeto cuenta con una marca central O que sirve para referenciar su posición y orientación.

El sistema sensorial del entorno (Bahillo, 2019), generalmente una red de sensores inalámbricos, ha de permitir la monitorización de la posición y orientación de la marca de referencia. Los AGVs incorporan nodos de comunicación bidireccional con el centro remoto de control, para lo cual se ha de contar con una red de área local (WLAN) con alguna de las alternativas tecnológicas existentes: wifi, zigbee, bluetooth, etc (Zhan, 2018), (ON5G, 2020). Con esta infraestructura, y conocidas las restricciones tanto del espacio libre del entorno como de las dimensiones del objeto a transportar, las tareas a realizar por el centro remoto son:

- Generación de la trayectoria de referencia a seguir por el objeto transportado. La trayectoria se almacena en el array de datos  $[x \ y \ \theta]'_{ref}$  a aplicar periódicamente al lazo de control del objeto. Este periodo se fija en función de la dinámica del conjunto, garantizando que se han estabilizado los lazos de control local de cada AGV.
- Con el mismo periodo se registra la posición y orientación de la marca  $[x \ y \ \theta]'_{obj}$  proporcionada por la red de sensores inalámbricos del espacio de trabajo. El error de seguimiento de posición y orientación se procesa por el bloque de control no lineal, a partir del modelo cinemático del objeto. Para ello existen diferentes

estrategias como las basadas en Lyapunov (Amoorzgar, 2012), (Santos, 2019) o en control borroso (Karim, 2016).

- El control no lineal de seguimiento de trayectoria proporciona las velocidades lineal y angular  $[V \ W]'_{obj}$  de entrada a la cinemática de la marca. Conocida la ubicación de cada AGV con respecto a la marca de referencia del objeto, el vector de velocidad anterior se procesa para obtener las velocidades de referencia local  $[V \ W]_{AGV}$  de cada AGV.
- Cada unidad de transporte implementa en modo local el control lineal de seguimiento de velocidades, generalmente PIDs mejorados o soluciones de control predictivo basado en modelo (Model Predictive Control –MPC-) que permiten incorporar restricciones físicas en la ley de control y anticiparse a los cambios de referencia suavizando la respuesta del AGV, siempre contando con la información  $[V \ W]'_o$  aportada por los correspondientes sensores embarcados y generando las señales de actuación  $[v \ \varphi]'_i$  tracción y dirección según se muestra en la Figura 11.

La propuesta cuenta con importantes ventajas como son la simplicidad del algoritmo de control embarcado en cada AGV y la restricción de comunicaciones, solo entre centro remoto y AGVs sin requerir intercambio de información entre las unidades de transporte. El seguimiento de trayectorias es único para la marca O del objeto, en lugar de las soluciones descentralizadas en las que cada AGV implementa de forma local el seguimiento de propia trayectoria con las restricciones de sincronización y sensorización que ello conlleva.

La principal limitación está asociada a los efectos secundarios del canal de comunicación (retardos y pérdidas de paquetes) en el lazo de control no lineal implementado en el centro remoto a partir de la información de la red sensorial.

Entre los aspectos de mejora que pueden contribuir a una optimización de la propuesta cabe citar:

- Innovación mecánica al anclaje de los AGVs al objeto a transportar.
- Dotación de unidades sensoriales al objeto transportado de forma que permita mejorar la localización y el mapeado dinámico a la vez que se desplaza.
- Incorporación de técnicas de sensado basado en eventos en la red de sensores inalámbricos con el objetivo de aumentar su autonomía energética y reducir los efectos negativos derivados de la sobrecarga del canal.
- Integración del lazo de control remoto de seguimiento de trayectorias con los niveles superiores de control: planificación de tareas y trayectorias.
- Dotar a los AGVs de mayor capacidad sensorial y de toma de decisiones que favorezca la seguridad y reacción ante situaciones imprevistas.
- Aprovechamiento de los avances en comunicaciones (5G) y en gestión de la información (Industria 4.0) aplicados a la propuesta de los autores.
- Extensión de la propuesta a entornos exteriores y extensos.

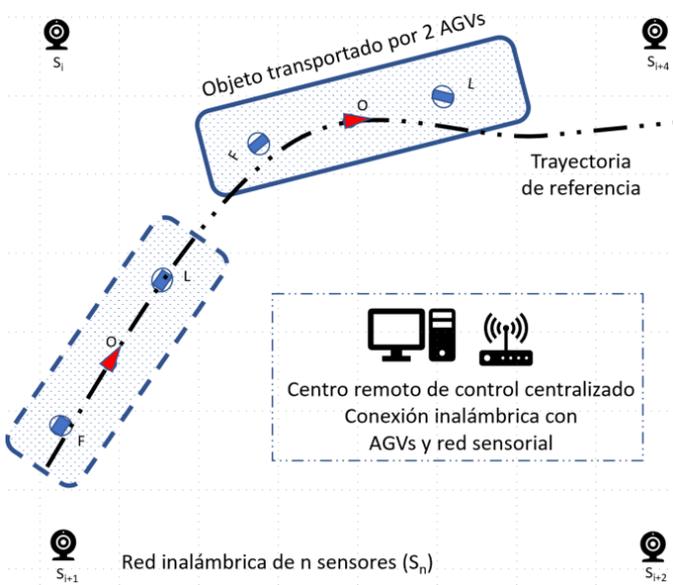


Figura 10: Seguimiento de trayectoria no lineal de un objeto, con marca de referencia O, transportado por 2 AGVs (L y F). Red inalámbrica de sensores y centro remoto de control centralizado.

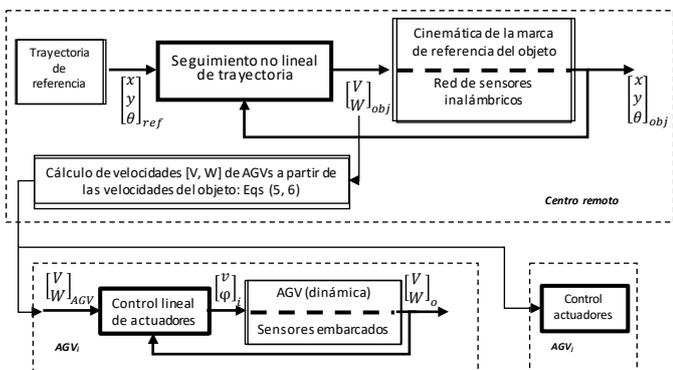


Figura 11: Estructura del control remoto centralizado de varias unidades AGVs transportando una carga.

#### 4. Conclusiones

Un problema común en logística industrial es el transporte de cargas que por su peso, tamaño o forma no puede ser abordado por un único AGV. El reto global es complejo y multidisciplinar integrando sistemas sensoriales, de comunicación y control; entendiendo por control el conjunto de tareas desde la planificación de tareas y trayectorias hasta el control de las ruedas activas de cada AGV. En este trabajo se han revisado y clasificado alternativas de transporte coordinado entre varias unidades de un único objeto, generalmente centradas en resolver los retos de anclaje y cinemáticos que esto plantea para un movimiento sin deslizamiento. Sin duda, disponer de unidades de transporte omnidireccionales, con un anclaje al objeto sin restricciones mecánicas facilita la implementación de soluciones de control.

En aras de minimizar tanto los recursos computacionales como los sensoriales y de sincronización de los AGVs, los autores apuestan por una solución de control centralizada implementada en un centro remoto. Independientemente del número de unidades omnidireccionales de transporte requerido, el control cinemático no lineal de trayectorias ha de

corregir el error de seguimiento de la única marca que identifica al objeto y que ha de ser captada por la red de sensores inalámbricos del entorno de trabajo. En el centro remoto se calculan las actuaciones de velocidad lineal y angular de la unidad virtual centrada en la marca y, a partir de ahí las correspondientes a cada uno de los AGVs. El control local de estos se encarga del seguimiento de estas referencias de velocidad.

La principal restricción de la propuesta es la propia de los sistemas realimentados en los que el canal de comunicación forma parte del lazo de control, restricción que se minimiza con la incorporación de tecnologías tanto de comunicación (soporte de la Industria 4.0) como de procesamiento (senso y control basado en eventos).

Con todo, el éxito de la propuesta pasa por analizar aspectos relacionados con la infraestructura, con la interacción con otras unidades de transporte trabajando en modo individual o cooperativo y, fundamentalmente, con las particularidades del caso de aplicación: AGVs y carga a transportar.

Los autores están trabajando en la implementación de la propuesta con AGVs comerciales en entornos industriales reales, por lo que es de esperar la obtención de resultados experimentales en un futuro próximo.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido apoyado parcialmente por la Junta de Castilla y León bajo el proyecto 10/16/BU/0014 y la empresa ASTI Mobile Robotics.

## Referencias

- Adăscăliței, F., and Doroftei, I. 2011. Practical Applications for Mobile Robots based on Mecanum Wheels - A Systematic Survey. The Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics, nº 40.
- Alonso-Mora, J., Barker, S. and Rus, D. 2017. Multi-robot formation control and object transport in dynamic environments via constrained optimization. The International Journal of Robotics Research. August 10. <https://doi.org/10.1177/0278364917719333>
- Adreasson, H., Bourguerra, A., Driankov, D. and Karlsson, L. 2015. Autonomous Transport Vehicles: Where We Are and What Is Missing. IEEE Robotics & Automation Magazine · March 2015. DOI: 10.1109/MRA.2014.2381357.
- Amoozgar, M. and Zhang, Y. 2012. Trajectory tracking of wheeled mobile robots: A kinematic approach. Mechatronics and Embedded Systems and Applications (MESA), 2012 IEEE/ASME International Conference on, 2012, pp. 275–280.
- Bahillo, A. y otros, 2019. Libro blanco sobre espacios inteligentes y tecnologías de posicionamiento y navegación en entornos de interior. Editorial: Universidad de Alcalá. ISBN: 978-84-17729-47-9.
- Berman, S. and Edan Y. 2002. Decentralized autonomous AGV system for material handling. International Journal of Production Research 40(15):3995-4006 ·DOI: 10.1080/00207540210146990.
- Borenstein, J., 1995. Control and Kinematic Design of Multi-Degree-of-Freedom Mobile Robots with Compliant Linkage. IEEE Trans. On Robotics and Automation. Vol. 11, nº 1.
- Borenstein, J., 2000. The OmniMate: a guidewire and beacon-free AGV for highly reconfigurable applications. Int. Journal of Production Research. Vol. 38, nº 9, June 15, 2000.
- Bostel, A.J. and Sagar, V.K. 1996. Dynamic control systems for AGVs. Engineering. DOI: 10.1049/cee:19960403.
- Brown, R., and Jennings, J., 1995. A pusher/steerer model for strongly cooperative mobile robot manipulation. In Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots 3, 562–568
- Butdee, S., Vignat, F., Suebsomran, A. and Yarlagadda, P.K. 2009. Estimation and control of an automated guided vehicle. International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems 2(3).
- Cameron, S. and Probert, P. 1994. Advanced Guided Vehicles: Aspects of the Oxford AGV Project. ISBN: 981-02-1393-X.
- Chen, X. and Li, Y., 2006. “Cooperative Transportation by Multiple Mobile Manipulators Using Adaptive NN Control”. In 2006 International Joint Conference on Neural Networks.
- Chiacchio P. and Chiaverini S., 1997. Complex Robotic Systems. Springer.
- Choi, S.K., Easterday, O.T. 2001. An Underwater Vehicle Monitoring System and Its Sensors. Lecture Notes in Control and Information Sciences. Experimental robotics. Springer-Verlag. Pp551-560. ISBN 3-540-42104-1
- Digani, V., Sabattini, L., Secchi, C., Fantuzzi, C., 2014. Hierarchical Traffic Control for Partially De-centralized Coordination of Multi AGV Systems in Industrial Environments. IEEE Inter-national Conference on Robotics & Automation (ICRA). DOI:10.1109/ICRA.2014.6907764
- Espósito, J. M., Feemster, M. G., Smith, E., 2008. Cooperative manipulation on the water using a swarm of autonomous tugboats. in Proc. 2008 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1501-1506
- Habibi, G., Kingston, Z., Xie, W., Jellins, M., McLurkin, J., 2015. Distributed Centroid Estimation and Motion Controllers for Collective Transport by Multi-Robot Systems. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Seattle, Washington
- Hasimoto, M. and Oba, F., 1993. Dynamic control approach for motion coordination of multiple wheeled mobile robots transporting a single object. Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Yokohama, Japan July 26-30, 1993
- Hichri, B., Aduane, L., Fauroux, J.C., Mezouar, Y. and Doroftei, I. Cooperative Mobile Robot Control Architecture for Lifting and Transportation of Any Shape Payload. Chapter book of Distributed Autonomous Robotic Systems pp 177-191. ISBN 978-4-431-55877-4.
- Hirata, Y., Kosuge, K., 2001. Motion Control of Distributed Robot Helpers Transporting a Single Object in Cooperation with a Human. Lecture Notes in Control and Information Sciences. Experimental robotics. Springer-Verlag. Pp. 313-322. ISBN 3-540-42104-1
- Karim, N.A. and Ardestani, M.A. 2016. Takagi-Sugeno Fuzzy formation control of non-holonomic robots. 4th International Conference on Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA), Qazvin, 2016, pp. 178-183.doi: 10.1109/ICCIAutom.2016.7483157
- Kosuge, K., Oosumi, T., 1996. Decentralized Control of Multiple Robots Handling an Object. Proc. Of 1996 IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.318-323.
- Kosuge, K., Sato, M., 1999. Transportation of a Single Object by Multiple Decentralized- Controlled Nonholonomic Mobile Robots. Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.
- Krnjak, A., and others. 2015. Decentralized control of free ranging AGVs in warehouse environments. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139465
- Li, P.Y., 1999. Adaptive Passive Velocity Field Control. American Control Conference. June, 1999. DOI: 10.1109/ACC.1999.783145
- Li, P.Y., Horowitz, R., 2001. Passive Velocity Field Control (PVFC): Part I, Geometry and Robustness. IEEE Trans on Automatic Control. Vol 46, no 9. DOI: 10.1109/9.948463
- Li, P.Y., Horowitz, R., 2001. Passive Velocity Field Control (PVFC): Part II, Application to contour following. IEEE Trans on Automatic Control. Vol 46, no 9, 2001. DOI: 10.1109/9.948464
- Liu, Z., Hou, L., Shi, Y., Zheng X., Teng, H., 2018. A co-evolutionary design methodology for complex AGV system. Neural Computing and Applications 29:959–974. Springer. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2495-1>
- Meissner, H., Ilsen, R. and Aurich, J.C. 2017. Analysis of control architectures in the context of Industry 4.0. Proc CIRP 2017; 62:165-9.
- Mellinger, D., Shomin, M., Michael, N., Kumar, V., 2010. Cooperative grasping and transport using multiple quadrotors. in Proc. Distributed Autonomous Robotic Systems, Lusanne, pp 545-558
- Neumann, M.A., Chin, M.H., Kitts, C.A., 2014. Object Manipulation through Explicit Force Control Using Cooperative Mobile Multi-Robot Systems” Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2014 Vol I WCECS 2014, 22-24 October, 2014, San Francisco, USA
- Ohashi, F., Kaminishi, K., Figueroa, J.D., Kato, H., Ogata, T., Hara T., Ota, J., 2016. Realization of heavy object transportation by mobile robots using handcarts and outrigger. Robomech Journal. DOI 10.1186/s40648-016-0066-y.
- ON5G, 2020. 5G e industria 4.0: retos y oportunidades de la cuarta revolución industrial. Observatorio Nacional 5G.

- <https://on5g.es/wp-content/uploads/2020/01/INFORME-ON5G-INDUSTRIA-4.0-DIGITAL.pdf>. Accesible el 31/03/2020.
- Owen-Hill, A., 2018. Why we're entering the age of robotic logistics. *Robotiq*. <https://blog.robotiq.com/why-were-entering-the-age-of-robotic-logistics>
- Parker, L. E., 2008. Multiple mobile robot systems. *Springer Handbook of Robotics*.
- Peng, T., Qian, J., Zi, B., Liu, J., Wang, X., 2016. Mechanical Design and Control System of an Omnidirectional Mobile Robot for Material Conveying. *International Conference on Digital Enterprise Technology DET-2016*. DOI: 10.1016/j.procir.2016.10.068. Springer. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2495-1>
- Pereira, G.A.S., Pimentel, B.S., Chaimowicz, L., Campos, M.F.M., 2002. Coordination of multiple mobile robots in an object carrying task using implicit communication. *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation* May 2002. DOI: 10.1109/ROBOT.2002.1013374
- Quinn, M., 2004. The evolutionary design of controllers for minimally-equipped homogeneous multi-robot systems. Ph.D. thesis. Brighton: University of Sussex
- Reister, D. B., 1991. A New Wheel Control System for the Omnidirectional HERMIES-III Robot. *Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation Sacramento, California, April 7-12*, pp. 2322-2327.
- Ria, 2019. *Robotic Industries Association*. "Logistic Robots" <https://www.robotics.org/service-robots/logistics-robots>, available on June 7th, 2019.
- Saha, S.K. and Angeles, J. 1989. Kinematics and dynamics of a three-wheeled 2-DOF AGV. *ICRA 1989*. DOI: 10.1109/ROBOT.1989.100202.
- Santos, C., Espinosa, F., Martínez-Rey, M., Gualda, D. and Losada, C. 2019. Self-Triggered Formation Control of Nonholonomic Robots. *Sensors* 2019, 19(12), 2689; <https://doi.org/10.3390/s19122689>
- Solaque, L.E., Avendaño, D.R., Molina, M.A., Pulido, C.A. 2015. Sistema de transporte cooperativo desarrollado para un grupo de robots móviles no-holónicos usando el método Líder Virtual. *Congreso internacional 264 de ingeniería mecatrónica y automatización – CIIMA 2015*
- Suh, J.H., Lee, Y.J., Lee, K.S., 2005. Object-transportation control of cooperative AGV systems based on virtual-passivity decentralized control algorithm. *Journal of Mechanical Science and Technology*. Vol 19 n09, pp. 1720-1735.
- Tan, W. 2002. Modeling and Control Design of an AGV. *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*. 2002. DOI: 10.1109/CDC.2002.1184623.
- Tuci, E., Alkilabi, M. H., & Akanyeti, O., 2018. Cooperative Object Transport in Multi-robot Systems: A Review of the State-of-the-Art. *Frontiers in Robotics and AI*. <https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00059>
- Ullrich, G., 2015. *Automated Guided Vehicle Systems. A Primer with Practical Applications*. Springer. ISBN 978-3-662-44813-7 DOI 10.1007/978-3-662-44814-4
- Wada, M. 1996. Holonomic and omnidirectional vehicle with conventional tires. *IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*. May, 1996.
- Wada, M., Torii, R., 2013. Cooperative transportation of a single object by omnidirectional robots using potential method. *16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*. DOI: 10.1109/ICAR.2013.6766543
- Wang, Z., Nakano, E., and Matsukawa, T., 1994. Cooperating multiple behaviorbased robots for object manipulation. in *Proc. of the IEEE/RSJ/GI Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. Vol. 3 1524–1531
- Wang, 2016 Z. Wang and M. Schwager. Chapter book: "Multi-robot manipulation without communication". Book: *Distributed autonomous robotic systems*. Editors: N.Y. Chong and Y.J. ISBN 978-4-431-55877-4 DOI 10.1007/978-4-431-55879-8
- Wang, T.M., Tao, Y., Liu, H., 2018. Current researches and future development trend of intelligent robot: a review. *International Journal of Automation & Computing*. Vol 15, no 5, pp. 525-548. DOI: 10.1007/s11633-018-1115-1
- Yan, Z., Jouandeau, N., and Cherif, A. A., 2013. A Survey and Analysis of Multi-Robot Coordination. *Int. Journal of Advanced Robotic Systems* 10 (12), 399. doi: 10.5772/57313
- Yang, X., Watanabe, K., Kiguchi, K., Izumi, K., 2003. Coordinated transportation of a single object by two nonholonomic mobile robots. *Artif Life Robotics*. ISAROB 2003. DOI 10.1007/s10015-003-0236-x/s
- Yufka, A., Ozkan, M., 2015. Formation-based Control Scheme for Cooperative Transportation by Multiple Mobile Robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2015. DOI: 10.5772/60972
- Zhan, M. and Yu, K. 2018. *Wireless Communication Technologies in Automated Guided Vehicles: Survey and Analysis*. *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. DOI: 10.1109/IECON.2018.8592782