

Arquitecturas de Percepción y de Actuación para la Automatización de Vehículos Rodantes de Grandes Dimensiones

Héctor Montes-Franceschi

Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Panamá / Centro de Automática y Robótica - CAR (CSIC-UPM), España
hector.montes1@utp.ac.pa, hector.montes@csic.es

Carlota Salinas

Centro de Automática y Robótica - CAR (CSIC-UPM), España
carlota.salinas@car.upm-csic.es

Javier Sarria

Centro de Automática y Robótica - CAR (CSIC-UPM), España
j.sarria@csic.es

Manuel Armada

Centro de Automática y Robótica - CAR (CSIC-UPM), España
manuel.armada@csic.es

Resumen - Este trabajo presenta los conceptos más importantes de la arquitectura de percepción y de actuación implementada sobre un vehículo rodante de grandes dimensiones, en este caso un autobús articulado Volvo B10M de 18.75m de longitud. Además se presentan algunos resultados experimentales de la automatización de este vehículo con rodadura neumática siguiendo un carril guía por medio de una caja mecatrónica de guiado. La automatización de este autobús articulado proporciona una combinación de ventajas intrínsecas que poseen los autobuses y los trenes convencionales, ya que pueden subir pendientes de un poco más de 15% y realizar giros con radios de curvatura pequeños, además, pueden llevar una gran cantidad de pasajeros, y más si se utilizan en la particularidad de convoy de autobuses. Esta modalidad de transporte resulta en una interesante opción amigable y de bajo costo. En este artículo, se presenta una arquitectura experimental de percepción, de actuación y de control para el desarrollo del control lateral y longitudinal de un autobús articulado. Esta arquitectura está compuesta por una plataforma experimental (autobuses articulados) instrumentada completamente y una pista de pruebas construida dentro de las instalaciones del CAR (CSIC-UPM), Madrid, España.

Palabras Claves— Control lateral, control longitudinal, LIDAR, sistema de actuación, Sistema de Autobuses de Tránsito Rápido (BRT), sistema de percepción, Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS).

Abstract – This paper presents the most important concepts of the architecture for perception and actuation implemented on a large vehicle with pneumatics wheels, in this case an articulated bus Volvo B10M of 18.75m in length. In addition, some experimental results of the vehicle automation to track a guide rail by means of a mechatronics box of guidance (Rolling Box System) are presented. The automation of this articulated bus provides a combination of intrinsic advantages possessed by buses and conventional trains. This is because it can go up slopes of over 15% and to carry out turns with small radii of curvature, also it can carry a lot of passengers, especially if the new vehicle is used in convoy mode. This mode of transportation is an interesting friendly option and of low cost. This manuscript presents an experimental architecture for perception, actuation and control for the development of lateral and longitudinal control of an articulated bus. This architecture consists of an experimental platform fully instrumented (articulated bus), and a test track built within the premises of the CAR (CSIC-UPM), Madrid, Spain.

Keywords – Actuation system, Bus Rapid Transit System (BRT), Intelligent Transportation Systems (ITS), lateral control, longitudinal control, LIDAR, perception system.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 27 de agosto de 2012

Fecha de Aceptación: 12 de enero de 2013

1. Introducción

El desarrollo de vehículos automatizados ha sido objeto de importantes actividades de investigación, donde los sistemas de control juegan un papel relevante [1]. Por otro lado, existe un interés, cada vez mayor, para desarrollar sistemas de transporte masivo novedosos, más seguros, más fiables y con el confort adecuado para los usuarios dentro del campo de los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS, del inglés IntelligentTransportationSystems) [2-3]. Por su parte, para el desarrollo de este tipo de transporte, se han realizado diversos estudios del control de la dinámica de diversos vehículos, los cuales han sido investigados y documentados durante los últimos 20 años [4-7]. Adicionalmente, varios diseños y resultados experimentales de estrategias de control

lateral y longitudinal están documentados en la literatura [8-11]. Por otro lado, los sistemas de autobuses de tránsito rápido (BRT, del inglés Bus Rapid Transit) son sistemas de transporte utilizados en algunas ciudades tendiendo a ser un sistema de transporte prometedor, que está siendo muy popular y, en la cual, su automatización es de gran relevancia [2, 12].

En este manuscrito se presentan las arquitecturas de percepción y de actuación para la automatización de un autobús articulado Volvo B10M de 18.75 m de longitud. El objetivo principal es evaluar experimentalmente los diferentes algoritmos y estrategias de control diseñados para la conducción automática de este autobús emulando, del alguna manera, la conducción de un tren, pero con mejores prestaciones.

Se cuenta con un área dedicada en donde se ha construido una pista de prueba experimental, que contiene un carril guía empotrado en la pista, en las instalaciones del Centro de Automática y Robótica – CAR (CSIC-UPM) en Arganda del Rey, Madrid, España [13]. El autobús articulado utilizado como plataforma experimental posee una masa de ~15000 kg., la cual es variable dependiendo de la cantidad de ocupantes que transporta, cuya capacidad máxima técnica es de ~29000 kg. Esta variabilidad de la masa del vehículo se debe tener en consideración para la realización de las estrategias de control implementadas.

El sistema de transporte presentado en este escrito es de altas prestaciones y de menor costo e impacto medioambiental que los trenes convencionales. Está basado en el seguimiento de un carril guía por medio de una caja de guiado central y un sistema de medición láser, de altas prestaciones, para la anticipación del carril. El guiado central permite la formación de convoy, promoviendo la gran capacidad de carga del vehículo. Este sistema consta de rodadura neumática lo cual proporciona confort a sus ocupantes. Será un sistema versátil que, además, podrá funcionar sin sistema de guiado como un autobús normal. Por lo tanto, aporta muchas de las principales ventajas tanto del autobús como del tren convencional, eliminando muchos de sus inconvenientes.

Este artículo está dividido en cinco secciones, la primera de ellas es la introducción en donde se hace una pequeña incursión al estado del arte en el área los Sistemas Inteligentes de Transporte, concretamente en la automatización de vehículos con ruedas. En el apartado dos se describen las arquitecturas de percepción y de actuación que están implementadas en el autobús articulado, así como algunos detalles de la pista de prueba utilizada para realizar los experimentos. La sección tres del manuscrito expone los dos sistemas de control principales que actúan sobre el vehículo, el primer de ellos controla el avance del mismo y el segundo realiza la tarea de controlar los desplazamientos laterales del autobús. Finalmente, los resultados experimentales y las conclusiones son presentados en las secciones cuatro y cinco de este documento. Cabe destacar que han sido realizadas múltiples experimentaciones con este sistema que no han podido ser plasmadas en este escrito por razones evidentes.

2. Descripción de las arquitecturas de percepción y de actuación

El propósito de la plataforma experimental es la de proporcionar un punto de partida fiable para realizar el desarrollo de investigaciones sobre el control automático de autobuses articulados. La Figura 1 presenta los principales elementos de la arquitectura general de percepción y de actuación implementada sobre el vehículo. Este es un proyecto de investigación aplicada, con participación de varias empresas industriales españolas dedicadas al tema de transporte y el CAR (CSIC-UPM).

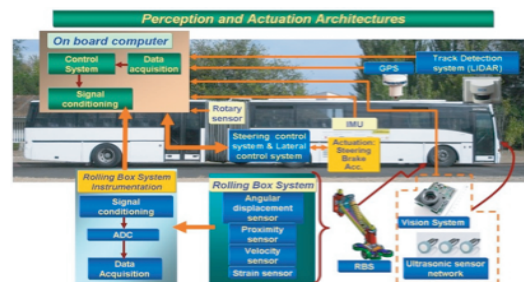


Figura 1. Arquitectura del sistema de percepción y de actuación para la automatización de un autobús articulado.

En este manuscrito se describe, principalmente, las arquitecturas de percepción y de actuación implementadas sobre el vehículo, el sistema de control lateral y longitudinal para la automatización del autobús, utilizando una caja mecatrónica para el guiado del vehículo (RBS), con diseño especial y sobre ruedas instaladas sobre el eje de las ruedas delanteras del autobús. Además, se introduce la percepción del carril guía por medio del sistema de medición láser. En la Figura 2 se muestra el esquema general del sistema de control que ha sido aplicado al vehículo.

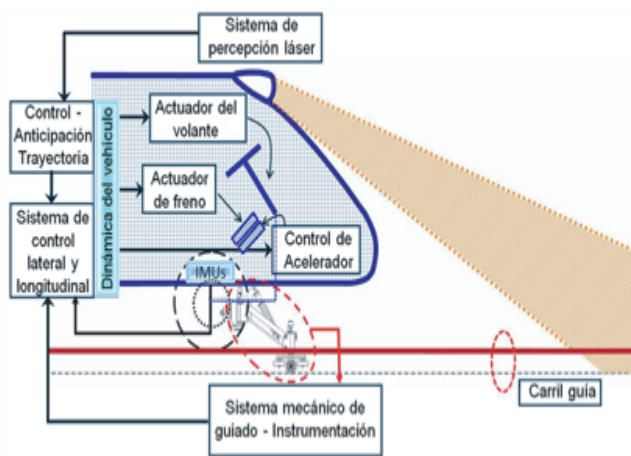


Figura 2. Diagrama del sistema general de control.

El sistema de control utiliza dos tipos de detección del carril guía para cerrar el lazo de control. El primero de ellos es a través de la caja mecatrónica de guiado, el cual detecta el carril guía 0.5 m por delante del eje delantero de las ruedas del autobús. El segundo sistema de realimentación o de percepción del carril es a través del sistema de medición láser (LIDAR), el cual proporciona la posición anticipada del carril de pruebas al sistema del control. La detección de la trayectoria es variable y puede ser ajustada entre 3 a 8 metros para la detección precisa y con alta exactitud del carril guía [14].

La plataforma experimental, también consta de una pista de prueba construida dentro de las instalaciones del CAR (CSIC-UPM) en Arganda del Rey. Se ha reconstruido totalmente la carretera de asfalto con la rigidez adecuada para soportar el vehículo de grandes dimensiones y de alta capacidad de carga. Además, se ha empotrado un

carril guía en la pista de asfalto para que la caja mecatrónica de guiado pueda transitar dentro de ella. En la Figura 3 se presentan algunas vistas de la pista de pruebas con el carril guía sobre ella.



Figura 3. Vistas de la pista de prueba y el carril guía.

La plataforma experimental, también consta de una pista de prueba construida dentro de las instalaciones del CAR (CSIC-UPM) en Arganda del Rey. Se ha reconstruido totalmente la carretera de asfalto con la rigidez adecuada para soportar el vehículo de grandes dimensiones y de alta capacidad de carga. Además, se ha empotrado un carril guía en la pista de asfalto para que la caja mecatrónica de guiado pueda transitar dentro de ella. En la Figura 3 se presentan algunas vistas de la pista de pruebas con el carril guía sobre ella.

2.1 Descripción del sistema de percepción

El primer sistema de percepción utilizado para realimentar al sistema de control de la posición del

autobús, tomando como referencia el carril guía, fue la caja mecatrónica de guiado (RBS), debido a que esta caja guía está instrumentada completamente para este fin. Además, la caja es construida en acero con la finalidad de proporcionar alta fijación del autobús al carril guía para evitar el descarrilamiento del mismo, en caso fortuito, lo cual proporciona un valor añadido de seguridad al sistema. En la Figura 4 se presenta la caja mecatrónica de guiado con todo el sistema mecánico para su sujeción con el eje delantero del vehículo.

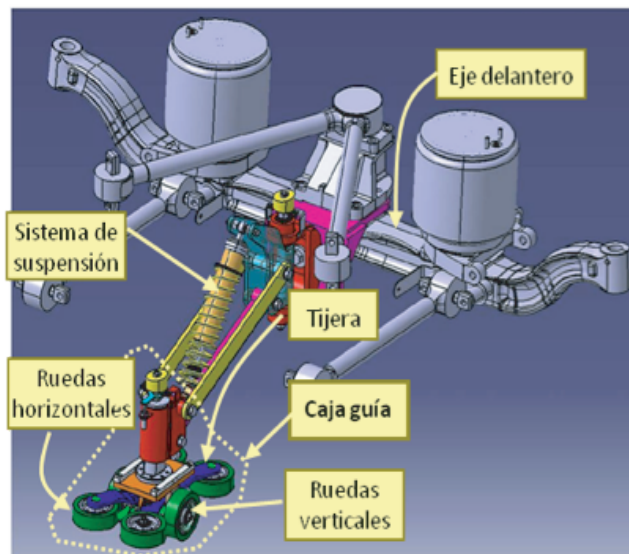


Figura 4. Caja mecatrónica de guiado.

La caja central de guiado está instrumentada completamente (véase Figura 5) para que proporcione la información necesaria al sistema de control, de tal manera que se guíe el autobús, de manera adecuada, sobre la pista de prueba. Los codificadores ópticos incrementales (encoders) superior e inferior proporcionan el desplazamiento angular sobre el plano horizontal de la pista con respecto al eje de avance del autobús, los sensores de proximidad inductivos son utilizados para la inicialización del proceso, colocando la caja guía “alineada” con el eje de avance del autobús. Las galgas extensiométricas proporcionan información de esfuerzos relacionados con atascamientos del sistema en la vía o posibles descarrilamientos. La medición de la velocidad se realiza con un encoder instalado sobre una rueda en la caja guía.

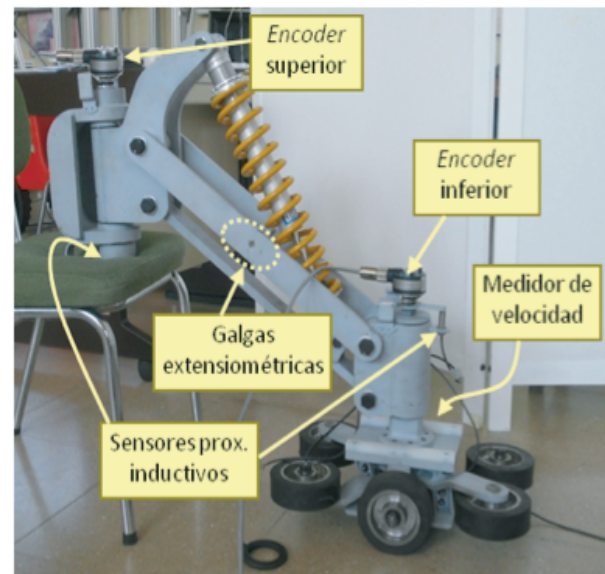


Figura 5. Foto de la caja de guiado e instrumentación instalada.

Otro sistema de percepción son los sistemas de medición láser denominados por su acrónimo LIDAR (Light Detection and Ranging), los cuales son sistemas de escaneos por láser, o de detección de rango según se quiera. Con este sistema de percepción se puede “observar” el carril guía de manera anticipada con respecto a la posición actual del vehículo.

Este sensor óptico proporciona la información necesaria y anticipada, al sistema de control, para que la dirección del autobús se vaya acomodando a la trayectoria, teniendo siempre en consideración los datos enviados por la instrumentación instalada en la caja mecatrónica de guiado.

El visor electrónico utilizado para este fin es un Sistema de Medición Láser para Exteriores LMS-221. Éstos son sistemas de medición no invasivo que realizan un barrido del entorno (2D) a donde están dirigidos. Por otro lado, se utiliza otro sistema de medición láser, el LMS291, utilizado para observar posibles obstáculos, ya sean fijos o en movimiento, en la trayectoria del autobús. La Figura 6 presenta el sistema láser instalado en la parte frontal del autobús. La estructura que soporta a ambos dispositivos es ajustable mecánicamente, con la finalidad de regular el alcance de sus rayos.

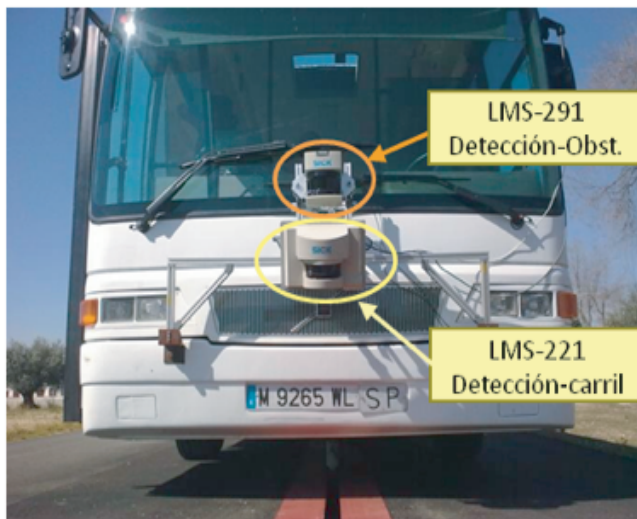


Figura 6. Sistema de medición láser, para detección anticipada del carril y detección de obstáculos.

El sensor láser es capaz de detectar la abertura del carril guía con bastante exactitud y repetitividad a diversas distancias. Asimismo, el sensor láser es capaz de detectar la curvatura de la vía, por lo que resulta posible enviar esta información al sistema de control para que adecue el sistema de guiado al tramo subsiguiente, en conjunto con la instrumentación instalada en la caja mecatrónica de guiado. Igualmente, el sensor láser puede detectar, si no precisamente, la inclinación aproximada de la carretera, es decir, puede enriquecer la información del sistema anunciando si está sobre una rampa de subida o de bajada y con los grados de inclinación aproximados.

2.2 Descripción del sistema de actuación

La dirección del autobús está actuada por medio de un conjunto motor de CC, caja reductora, codificador óptico incremental, y ruedas de engranes módulo 4. El motor de CC tiene una potencia de 150 W a 24 VCC y su caja reductora es de 75:1, seleccionados para manejar el par de la dirección del eje del volante del vehículo, aun cuando éste está estático. El accionamiento de la dirección del autobús se presenta en la Figura 7.

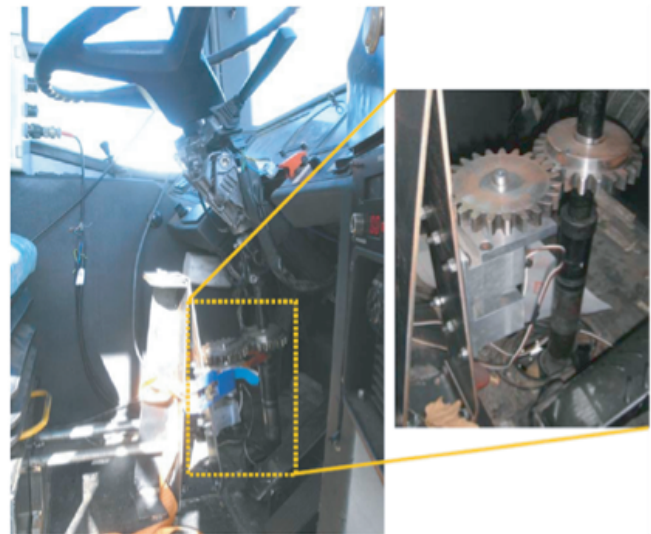


Figura 7. Accionamiento montado sobre la columna de dirección del autobús.

El accionamiento de la dirección del vehículo es comandado a través del sistema de control, previa recepción de los datos enviados por los encoders instalados en la caja mecatrónica, que describen la trayectoria del carril guía.

Para el control de la velocidad del autobús se ha actuado eléctricamente sobre el PotBox del vehículo, el cual es accionado por el pedal de aceleración en lugar de actuar electromecánicamente sobre el propio pedal. Esto hace que se tenga un mejor control de la velocidad de avance de la máquina móvil. Las señales eléctricas comandadas al PotBox son enviadas desde uno de los computadores a bordo a través del convertidor digital/analógico y el bloque acondicionador de señal.

Para el control de la velocidad hay que considerar el sistema de freno, que está compuesto por el conjunto motor de CC, caja reductora y codificador óptico incremental, el cual realiza una regulación fina de la posición del pedal de freno (por medio de una conexión directa del actuador y el pedal), y por ende, se consigue una alta capacidad del gradiente de frenado del autobús. En la Figura 8 se muestra el sistema de actuación de frenado implementado.

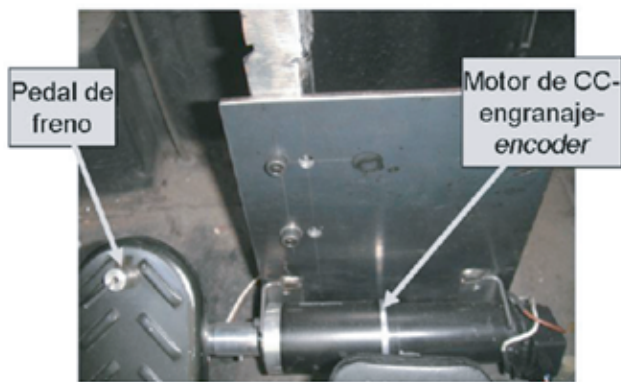


Figura 8. Implementación del accionamiento de freno.

3. Sistema de control del vehículo

El control longitudinal del autobús articulado Volvo B10M es llevado a cabo para que el vehículo siga el carril de prueba a una velocidad de consigna, ajustada previamente. Esta velocidad es relativamente baja debido a la sinuosidad de la trayectoria. La velocidad media para la mayoría del circuito compuesto por las curvas y pequeños tramos rectos es de ~ 2.5 m/s. Sin embargo, en el trayecto rectilíneo mayor (véase Figura 3) la velocidad que puede alcanzar el vehículo es de ~ 6 m/s.

La Figura 9 muestra un esquema de control longitudinal implementado para controlar la velocidad de avance del autobús. La velocidad deseada es relativamente baja para que el autobús pueda seguir la pista correctamente. El sistema de control actúa sobre el control de aceleración del vehículo (PotBox), el cual tiene un rango de acción de 0 a 5 VCC, en lugar de actuar sobre el propio pedal del acelerador. El rango de aceleración está limitado con el fin de proteger el dispositivo de aceleración del vehículo, y al mismo tiempo, para no exceder la velocidad utilizada por encima de límites que no pueden ser controlados hasta este momento.

Cuando la velocidad de marcha del autobús supera a la velocidad deseada, entonces el controlador de la aceleración se detiene y le pasa el mando al controlador de frenado. El regulador de freno tiene límites mínimo y máximo, que determinan el espacio de trabajo de este controlador. Dentro de estos límites, el controlador genera una señal de diente de sierra para actuar

sobre el conjunto servo-actuador del pedal de freno. Esto hace que el subsistema de freno desarrolle una desaceleración paulatina del autobús (dependiendo de las condiciones del momento) y de manera confortable. Cuando la velocidad decrece a un umbral pre-establecido, el subsistema de freno deja de actuar, y se inicia el subsistema de aceleración. La velocidad utilizada en el lazo de realimentación es obtenida del sistema de medición de velocidad instalada en la caja mecatrónica de guiado, cuya resolución es mucho mayor que la proporcionada por el vehículo.

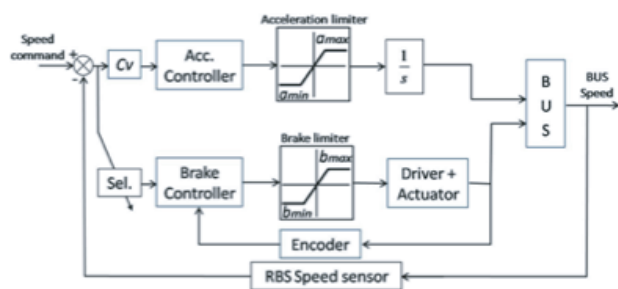


Figura 9. Esquema de control longitudinal.

La Figura 10 muestra el esquema de control lateral implementado en el autobús. En este sistema de control hay que tener en consideración los límites físicos de rotación de la dirección, el cual es de $\pm 90^\circ$, aproximadamente. Este giro de la dirección hace que las ruedas delanteras realicen un desplazamiento angular entre $\pm 45^\circ$, aproximadamente.

La realimentación del sistema de control lateral se realiza por medio de sensores de posición angular localizados en el sistema mecatrónico de guiado (véase Figuras 4 y 5). Este sistema tiene dos grados de libertad que son medidos, uno de ellos localizado entre el eje delantero del autobús y los brazos de sujeción de la caja rodante (gdl superior), y el otro situado sobre la propia caja guía, localizada dentro del carril, y los brazos de sujeción (gdl inferior). Ambos grados de libertad están sobre el plano horizontal del autobús.

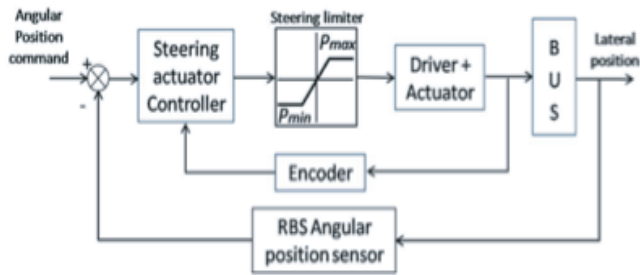


Figura 10. Esquema del control lateral.

La suma de los desplazamientos de los dos grados de libertad proporciona los datos necesarios para conocer la posición del carril con respecto al eje longitudinal del autobús. Adicionalmente, el sistema de control “observa”, con detalle, la excursión del gdl superior, el cual no debe exceder de $\pm 45^\circ$ con respecto al eje de avance del autobús (longitudinal), para evitar forzar los resortes de torsión que se encuentran instalados allí. Adicionalmente, se controla el desplazamiento del gdl superior para que esté dentro de estos límites, lo cual hace que se reduzca el movimiento lateral brusco del autobús, se evita el proceso de descarrilamiento y obstrucciones no deseadas del sistema. La longitud máxima, en el eje de avance, del sistema mecatrónico de guiado (0.5 m), y la colocación del mismo sobre el eje delantero del autobús, hacen que las pruebas experimentales se lleven a cabo a bajas velocidades.

4. Resultados experimentales

Se han realizado múltiples pruebas experimentales para la validación del control automático de autobuses articulados, obteniéndose prometedores resultados. Durante estos ensayos, se han evaluados diversos sistemas sensoriales, sistemas de actuación y estrategias de control lateral y longitudinal, implementadas en la máquina rodante de grandes dimensiones. Para ello esta plataforma móvil se complementa con la pista de pruebas construida en las instalaciones del CSIC.

Los resultados experimentales relacionados con el control longitudinal del autobús se muestran en la Figura 11. En estas gráficas se compara la velocidad del vehículo, la posición del freno y la aceleración en el eje de avance del bus, obtenido de

una unidad de medición inercial IMU440CA, instalada sobre el eje delantero del autobús.

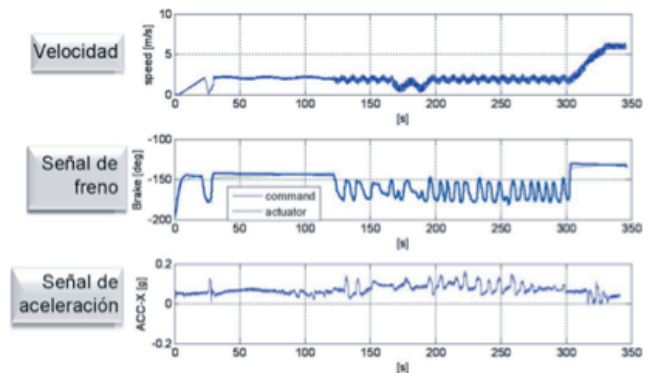


Figura 11. Comparación entre la velocidad del bus, la posición de freno y la aceleración de avance durante el recorrido en la pista.

Durante la mayor parte de la trayectoria, la velocidad utilizada como consigna fue de ~ 2.5 m/s, esto es debido a que el carril de pruebas contiene curvas con pequeños radios de curvatura, y una pendiente, en alguno de los tramos, que debe ser considerada. Sin embargo, en el segmento rectilíneo mayor de la pista de prueba, la velocidad se pudo incrementar hasta ~ 6 m/s. El sistema de frenado, es utilizado para mantener la velocidad comandada cuando el autobús recorre la trayectoria con pendiente de bajada. Este sistema actúa entre los tiempos de 125 s y 300 s, aproximadamente. La señal oscilatoria de frenado produce una sensación de velocidad constante, aunque el sistema se esté desacelerando para disminuir la consecuencia de aumento de velocidad del vehículo por el efecto gravitatorio.

La Figura 12 muestra los resultados experimentales obtenidos mediante la aplicación de la estrategia de control lateral del autobús durante el seguimiento de la trayectoria del monorraíl. En esta figura se presentan las gráficas de la señal ejecutada en la dirección, la aceleración lateral del autobús, y la velocidad angular en el eje Z. El sensor de velocidad angular sigue las curvas de la trayectoria comandadas a la dirección del autobús. La señal de la aceleración lateral se implementará en un lazo cerrado del sistema de control lateral para el mejoramiento en el seguimiento de la trayectoria. Usando esta señal en

el sistema de control, los pequeños movimientos laterales se verán disminuidos, haciendo más confortable la conducción.

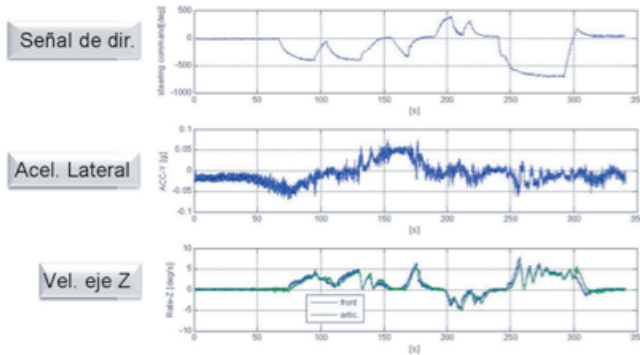


Figura 12. Comparación entre la señal de dirección, aceleración lateral y velocidad angular en el eje Z durante el recorrido de la pista.

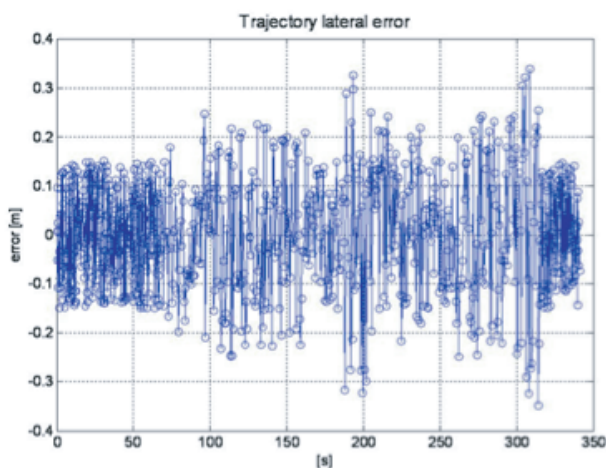


Figura 13. Error lateral durante el seguimiento de la pista de pruebas.

El error lateral durante el seguimiento del carril de prueba instalado en la pista es relativamente pequeño. La Figura 13 muestra que el error lateral máximo fue de, aproximadamente, 0.35 m, durante una prueba experimental. Esto hace que el desplazamiento angular máximo con respecto al eje longitudinal del autobús sea de 44° (refiérase al gdl superior). Este valor se encuentra dentro de los márgenes de seguridad establecidos en la estrategia de control. Durante otros ensayos el máximo error lateral fue menor al mostrado en la Figura 13.

La Figura 14 muestra un resultado

experimental del control lateral y longitudinal aplicado en el autobús articulado Volvo B10M, en una secuencia fotográfica obtenida de un vídeo durante el seguimiento de una trayectoria. El recorrido inicia en el tramo recto mayor de la pista de pruebas y, posteriormente, va transitando por los tramos curvos. En la secuencia fotográfica se puede apreciar el carril guía y el volante en varias posiciones.



Figura 14. Detalles del volante y el carril de guiado durante una de las pruebas experimentales.

5. Conclusiones

En este trabajo han sido presentadas las arquitecturas de percepción y de actuación sobre una plataforma experimental para la investigación sobre estrategias de control automático para autobuses articulados, la cual consta de un autobús Volvo B10M de 18.75 m de longitud, una caja mecatrónica de guiado, un sistema de medición láser para la anticipación del carril, y una pista de prueba diseñada especialmente para la realización de las pruebas.

Se han presentado excelentes resultados experimentales relacionados con las estrategias de control lateral y longitudinal implementadas sobre el autobús. El control lateral será mejorado introduciendo nuevas estrategias de control, utilizando, además, señales inerciales obtenidas del sistema. La velocidad de avance será

umentada con la realimentación, en el sistema de control longitudinal, de señales provenientes del sensor de medición láser, que representa la anticipación del carril.

Otros trabajos futuros están relacionados con la introducción de señales inerciales y de los sensores de rango en los lazos de realimentación de los sistemas de control lateral y longitudinal del autobús. Las señales inerciales y su procesamiento respectivo serán obtenidas de Unidades de Medición Inercial (IMU) ubicadas en diferentes partes del autobús. El resultado del procesamiento de las señales de rango (sensor láser) establecerá el recorrido de la vía, de manera anticipada, en un lazo externo del sistema de control longitudinal. Todas estas pruebas se realizarán en las pistas de pruebas descritas en este artículo. Adicionalmente, se está concretando la realización de estos experimentos en otras vías libres que existen en España, las cuales tienen un recorrido mucho mayor.

6. Agradecimiento

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por El Instituto Madrileño para el Desarrollo - IMADE PIE/62/2008 (Comunidad de Madrid, ALDESA CONSTRUCCIONES SA, MAXIMASDE), y la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) en el marco del proyecto FORTUNA D/030531/10. El Dr. Héctor Montes Franceschi agradece el apoyo recibido de la Universidad Tecnológica de Panamá y del CSIC bajo el Programa de Postdoctorado JAE-Doc.

Este trabajo fue aceptado como conferencia magistral en el Workshop de Automatización y Control Industrial – WACI-2011, celebrado en Panamá del 29 al 31 de agosto de 2011. Este artículo presenta una extensión de dicha exposición y redacción formal del trabajo de investigación.

7. Referencias Bibliográficas

- [1] R. Fenton, G. Melocik, and K. Olson, "On the steering of automated vehicles: Theory and experiment", *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 21(3), pp. 306-315, 1976.
- [2] S. Shladover, C. Desoer, J. Hedrick, M. Tomizuka, J. Walrand, W. Zhang, D. McMahon, H. Deng, S. Sheikholeslam, and N. McKeown, "Automatic vehicle control developments in the path program", *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, vol. 40(1), pp. 114 - 130, 1991.
- [3] W.C. Collier, and R.J. Weiland, "Smart cars - smart highways", *IEEE SPECTRUM*, vol. 31(4), pp. 27-33, 1994.
- [4] J. Ackermann, "Robust control prevents car skidding", *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 17(3), pp. 23-31, 1997.
- [5] U. Kiencke, and A. Daiß, "Observation of lateral vehicle dynamics", *Control Eng. Practice*, vol. 5(8), pp. 1145-1150, 1997.
- [6] J.C. Gerdes, and E.J. Rossetter, "A unified approach to driver assistance systems based on artificial potential fields", *Journal Dyn. Sys., Meas., Control*, vol. 123(3), pp. 431-438, 2001.
- [7] S. Mammar, S. Glaser, and M. Netto, "Vehicle Lateral Dynamics Estimation using Unknown Input Proportional - Integral Observers", In *Proc. 2006 American Control Conference*, Minneapolis, Minnesota, USA, pp. 14-16, 2006.
- [8] R.H. Byrne, C.T. Abdallah, and P. Dorato, "Experimental results in robust lateral control of highway vehicles", *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 18(2), pp. 70-76, 1998.
- [9] M. Sotelo, "Lateral control strategy for autonomous steering of Ackerman - like vehicles", *Robotics and Autonomous Systems* vol. 45, pp. 223-233, 2003.
- [10] P. Falcone, F. Borrelli, J. Asgari, H. Tseng, and D. Hrovat, "Predictive Active Steering Control for Autonomous Vehicle Systems", *IEEE Trans. Contr. Syst. Tech.*, vol. 15(3), pp. 566-580, 2007.
- [11] H. Montes, C. Salinas, J. Sarria, and M. Armada, "An experimental platform for research on automatic control of articulated bus", In *Proc. 2009 IARP Workshop on Service Robotics and Nanorobotics*, Beijing, China, 2009.
- [12] L.D. Galicia, R.L. Cheu, R.B. Machemehl, and H. Liu, "Bus Rapid Transit Features and

- Deployment Phases for U.S. Cities”,
Journal of Public Transportation, vol. 12(2),
pp. 23-38, 2009.
- [13] H. Montes, C. Salinas, J. Sarria, and M.
Armada, “Lateral and Longitudinal Control
System for the Automation of an Articulated
Bus”, In Proc. Emerging Trends in Mobile
Robotics, CLAWAR 2010, Nagoya, Japan,
pp. 793-800, 2010.
- [14] C. Salinas, H. Montes, and M. Armada, “A
perception system for accurate automatic
control of an articulated bus”, In Proc.
Emerging Trends in Mobile Robotics,
CLAWAR 2010, Nagoya, Japan, pp. 1021-
1028, 2010.