

Proyecto ALCOR: Contribuciones a la Optimización del Guiado Remoto de Robots en Espacios Inteligentes

F. Espinosa ^{a,*}, J.L. Lázaro ^{a,1}, J. Olivares ^{b,2}

^a Departamento de Electrónica. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Alcalá. Campus Universitario s/n. 28805 Alcalá de Henares, Madrid, España

^b Departamento de Arquitectura de Computadores, Electrónica y Tecnología Electrónica, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, 14071, Córdoba, España.

Resumen

El trabajo muestra las soluciones sensoriales, de comunicaciones y control para el guiado remoto de robots en entornos inteligentes derivadas del proyecto ALCOR. En este tipo de aplicaciones la optimización de los recursos compartidos, especialmente los relacionados con la autonomía energética y con la utilización del canal inalámbrico, sigue siendo un reto. Las principales aportaciones del proyecto son: a) desarrollo de unidades sensoriales basadas en infrarrojos con precisión centimétrica en la localización de la fuente emisora y tiempos de respuesta de milisegundos; b) soluciones de comunicación inalámbrica que mejoran el enrutamiento de información y la homogeneización en el tráfico de red; y c) soluciones de control y estimación basadas en eventos con mecanismos independientes de actuación sobre la unidad móvil y de petición de medidas al módulo sensorial. Para las pruebas experimentales se ha utilizado el robot comercial P3-DX.

Palabras Clave:

Red inalámbrica de sensores, posicionamiento en interiores, sensores de infrarrojo, sistemas de control en red, control basado en eventos, estimación basada en eventos, enrutamiento basado en reglas, analizador multicanal, tele-robótica, comunicaciones y redes de comunicaciones.

ALCOR Project: Contributions to Optimizing Remote Robot Guidance in Intelligent Spaces

Abstract

The work shows the sensory, communication and control solutions for the remote guidance of robots in intelligent environments, as derived activity from the ALCOR project. In this type of applications, optimizing shared resources, especially those related to energy autonomy and the use of the wireless channel, remains a challenge. The main contributions of the project are: a) development of sensorial units based on infrared with centimeter accuracy in the location of the source and response times of milliseconds; b) wireless communication solutions that improve the information routing and homogenization in network traffic; and c) event-based control and estimation solutions with independent mechanisms of action on the mobile unit and request for measurements to the sensor module. The commercial robot P3-DX has been used for experimental tests.

Keywords:

Wireless sensor network, indoor positioning, infrared sensors, network control systems, event-based control, event-based estimation, rule-based routing, multichannel sniffer, tele-robotics, communication and communication network.

*Autor para la correspondencia: Felipe Espinosa. felipe.espinosa@uah.es

J.L. Lázaro, en representación del grupo GEINTRA: C. Santos, D. Rodríguez, M. Martínez, R. Nieto, Á. de la Llana, P. del Portillo, J. Iglesias, E. Santiso, A. Gardel, I. Bravo. J. Olivares, en representación del grupo PRINIA: F. León, A. Cubero, J.M. Castillo, F. Alcaraz, M. Sánchez, J.M. Palomares

To cite this article: J.L. Lázaro, F. Espinosa, J. Olivares. 2018. ALCOR Project: Contributions to Optimizing Remote Robot Guidance in Intelligent Spaces. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 15, 416-426. <https://doi.org/10.4995/riai.2018.9199>
Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0)

1. Introducción

El planteamiento clásico de guiado remoto de unidades robóticas en un espacio inteligente es el de ejecución doblemente periódica, para la actuación del centro remoto sobre la unidad móvil y para la aportación de la posición y orientación (pose) por parte del sistema sensorial del entorno. En el primer caso el periodo de muestreo queda determinado por la dinámica del robot y el comportamiento del canal, diseñando a partir de ahí las correspondientes leyes de control que garantizan el seguimiento estable de trayectorias. En el segundo caso la técnica de sensado y el comportamiento del canal marcan la capacidad de refresco de la pose del robot. Esta propuesta conservadora presenta varias restricciones: uso poco eficiente del canal de comunicación favoreciendo el incremento de retardos, la aparición de pérdida de paquetes y fluctuación (*jitter*) de comunicación [Miskowicz, 15]. Además, el sensado periódico exige una dedicación constante del módulo sensorial, con un consumo energético y utilización del canal generalmente excesivo.

Con estas premisas se planteó el proyecto ALCOR, aportando soluciones en los tres campos de investigación implicados: sensorial, comunicación y control, tal y como se muestra en la Figura 1.

El proyecto coordinado ALCOR: Optimización de red de sensores inalámbricos y sistemas de control en red para cooperación de unidades móviles en entornos inteligentes, está financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España, en la convocatoria de ayudas a Proyectos de I+D+i “Retos Investigación 2013”, y está siendo desarrollado por los grupos de investigación GEINTRA de Alcalá y PRINIA de la Universidad de Córdoba. Se presentan aquí los resultados de la primera fase centrada en el guiado remoto de una única unidad móvil sensada por un único módulo, ambos conectados en red con un miniPC con funciones de control remoto.

Las principales contribuciones del proyecto ALCOR son: obtención de una solución sensorial de precisión centimétrica, con tiempo de procesamiento de milisegundos y reducido tamaño; desarrollo de algoritmos de comunicación que mejoran la sincronización y el uso eficiente de los canales disponibles; y aplicación de técnicas de control y estimación basada en eventos para optimizar los recursos compartidos (energéticos y de uso de canal) con un índice de comportamiento aceptable en las tareas de guiado.

En este trabajo se muestran también algunos de los resultados obtenidos en el demostrador global diseñado al efecto.

1.1. Antecedentes

ALCOR está orientado a la optimización de recursos fundamentales en un entorno inteligente: red de comunicación, sensores en la infraestructura y elementos móviles robotizados.

En [Cook, 09] se califica como inteligente a una infraestructura si su dotación tecnológica es capaz de percibir características del entorno y de los usuarios, razonar con la información acumulada y finalmente seleccionar las actuaciones a llevar a cabo, aportando servicios para que los usuarios se desenvuelvan en el entorno.

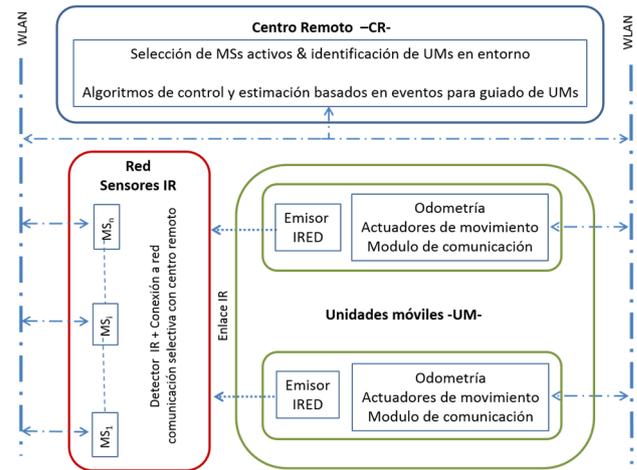


Figura 1: Estructura global del proyecto ALCOR. Interacción entre módulos sensoriales, centro remoto y unidades móviles conectadas en red inalámbrica.

En la actualidad los espacios inteligentes se desarrollan con diferentes propuestas tecnológicas, pero comparten la idea de red de sensores distribuidos, con la posibilidad de dotar a los mismos de inteligencia. En cuanto al sistema de posicionamiento, es habitual hablar de LPS (Local Positioning System), conocidos como indoor-GPS. En [Martín-Gorostiza 11] se muestra cómo es posible alcanzar precisión de centímetros en el posicionamiento en un entorno inteligente, manteniendo un ángulo de cobertura válido en el LPS, con la incorporación al sistema de medida de dispositivos emisores y detectores de reciente aparición. Esto sitúa a los sistemas de IR a la cabeza en cuanto a precisión en la posición, por delante de soluciones basadas en ultrasonidos [Pérez, 12], o cámaras [Heißmeyer 13]. Por otra parte, tal y como se muestra en la exhaustiva revisión de los sistemas de localización, tanto en el ámbito industrial como de investigación, proporcionada por R. Mautz [Mautz 11], los modernos sistemas de radiofrecuencia para localización en interiores, aún presentan precisiones peores que los mencionados anteriormente (ultrasonidos, cámaras e infrarrojos).

En cuanto a soluciones de control para unidades móviles en entornos inteligentes se han desarrollado múltiples trabajos que abordan el diseño y la implementación de soluciones de automatización y control, con periodos de muestreo constantes (*time-scheduled*). Sin embargo la idea de muestrear solo cuando es necesario (*event-based sampling or event-scheduled*) conlleva una reducción del número de ejecuciones de la acción de control con el correspondiente ahorro de energía y de dedicación del procesador digital. Pero es en el campo de sistemas de control en red, donde estas novedosas técnicas adquieren un mayor protagonismo por su contribución a reducir el tráfico de datos entre nodos y con ello mejorar la calidad del servicio. Recientemente ha surgido una línea de investigación en control orientada a la implementación digital de soluciones con muestreo basado en eventos [Mazo 09], concretamente control por auto-disparo (*self-triggering*) y control disparado por eventos (*event-triggering*).

Un problema común en los sistemas de comunicaciones inalámbricos es que, al compartir el medio de transmisión, el espacio radioeléctrico se satura y puede provocar interferencias en los mensajes transmitidos. Todos estos

problemas llevan a que los sistemas de comunicación inalámbrica presenten graves inconvenientes de accesos al medio no determinísticos ni acotados en el tiempo. En este sentido la Radio Cognitiva (*Cognitive Radio*) [Mitola, 06] es una propuesta innovadora en la que se realiza un análisis constante de los diferentes canales, permitiendo seleccionar dinámicamente y de manera transparente aquellos canales que se encuentren menos saturados, haciendo un uso más efectivo de la banda de comunicaciones inalámbricas. Ligado a este concepto, es posible habilitar mecanismos de reserva de recursos, principalmente de canal, que permita acceder en periodos de tiempo concretos a la red con garantía de que no se produzcan choques de mensajes. Esto permite escalar las redes inalámbricas de comunicación, ya que el sistema central, actuando como coordinador de red, posibilita que se arbitren mecanismos inteligentes de control de acceso temporizado al medio. Para ello, es imprescindible que todos los nodos manejen un mismo reloj de sistema sincronizado. Dicho reloj se ve altamente influenciado por los efectos de variaciones en la temperatura ambiente. Además, existe un problema en la centralización de la toma de decisiones cuando existen redes de comunicación amplias, es decir el colapso debido al volumen de mensajes que dicho nodo central debe manejar para controlar cada uno de los nodos finales de la red.

2. Principales resultados del módulo sensorial de infrarrojos

El objetivo de esta parte del proyecto es dotar a la infraestructura de mayor capacidad sensorial, precisión en la medida, tiempo de respuesta e interacción con el centro remoto. La propuesta está basada en la ubicación de un único emisor IRED embarcado y sensores de infrarrojo (IR) distribuidos por el entorno de trabajo. Para ello se han desarrollado diferentes alternativas de sistemas de posicionamiento local (LPS) de unidades móviles en entorno extensos.

En este trabajo destacamos la solución basada en ángulo de llegada (*Angle of Arrival -AoA-*) que consiste en medir el ángulo de incidencia y la distancia al receptor, tal y como muestra la Figura 2. En dicha figura la vertical en color negro (S) representa el eje de referencia para el cálculo de ángulos de llegada, y la línea roja representa la trayectoria de la señal desde el emisor al receptor mediante la que se calcula el ángulo de llegada al receptor θ . Dicho ángulo presenta dos componentes respecto de los ejes cartesianos de referencia θ_x θ_y representados y acotados por las líneas verde y morada respectivamente (solo con el valor del ángulo θ no se podría resolver la posición porque podría corresponder a todos los puntos de una circunferencia). El plano del punto emisor, sobre la unidad móvil, queda ubicado a una altura h del suelo.

A partir de las corrientes obtenidas de los diferentes electrodos de un sensor PSD (convenientemente amplificadas) se puede deducir la posición X-Y del impacto de un haz luminoso en su superficie sensora. Con la posición precisa del punto de impacto y la focal del sistema óptico se puede determinar el ángulo de incidencia θ .

Para poder alcanzar este objetivo se han de superar dos retos. En primer lugar el sensor PSD y el sistema óptico no son ideales y el acople de ambos tampoco, por lo que no se dispone de valores precisos de los parámetros intrínsecos del sistema

que permitan medir geoméricamente. Esto significa que se debe desarrollar un método geométrico de calibración para este sensor continuo. El segundo problema es debido a los desbalances en los canales de amplificación de los electrodos debidos a tolerancias de los componentes externos y de los amplificadores, temperatura, ruido de sensado y ruido de procesamiento. Por tanto, se deben abordar dos tareas antes de poder posicionar con un PSD: calibración eléctrica y calibración geométrica del sistema.

2.1. Calibración eléctrica

El análisis de los efectos eléctricos implicados en la detección de la señal infrarroja concluye que existen dos tipos de errores: aleatorios y sistemáticos. En el caso de los ruidos sistemáticos, a pesar de ser una fuente de error considerable, puede ser eliminada mediante un proceso de calibración que corrija estas desviaciones. En cambio, los errores aleatorios no pueden ser calibrados, pero su efecto puede ser asumido eligiendo los componentes y sus características con criterio. Una explicación exhaustiva del estudio de efectos y propuesta de calibración puede verse en [Rodríguez 16], y del comportamiento de multicaminos en señales IR en [De la Llana 17].

Los detectores PSD bidimensionales (como el de tipo *pincushion* utilizado en el desarrollo del sistema sensor) poseen 4 electrodos en su terminal de ánodo y cada uno de los mismos entrega una corriente extraordinariamente pequeña (orden de nA) que debe ser acondicionada. Debido a esto, se introducen amplificadores de transimpedancia que convierten a tensión la señal amplificada. Dado que los componentes pueden tener tolerancias, e incluso los canales el PSD un comportamiento no exactamente igual, se debe calibrar y corregir el comportamiento de todos los canales respecto de uno de ellos para que la relación de ganancias sea 1 y poder utilizar las expresiones de posicionamiento proporcionadas por el fabricante (esta corrección se realiza en el procesamiento software).

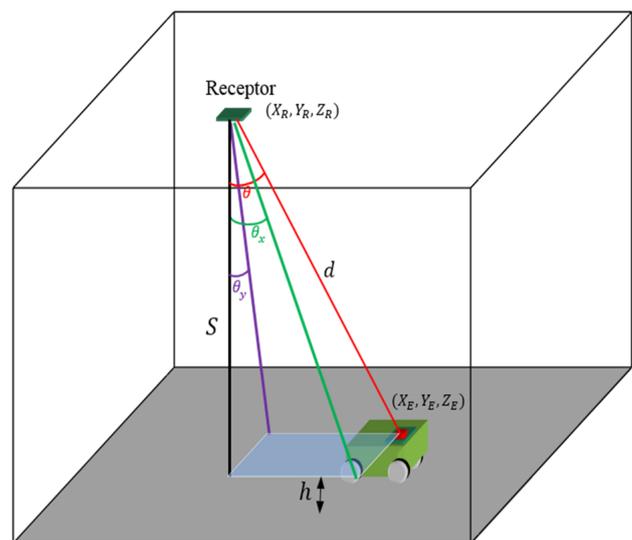


Figura 2: Posicionamiento de móvil con emisor IRED, midiendo en el receptor tanto el ángulo de incidencia θ como la distancia d al emisor.

Las ecuaciones finales para el cálculo del punto de impacto (x,y), vienen dadas por (1) y (2)

$$x = \frac{L_x}{2} \left(\frac{(V_{x2} + V_{y1}) - (V_{x1} + V_{y2})}{V_{x1} + V_{x2} + V_{y1} + V_{y2}} \right) \quad (1)$$

$$y = \frac{L_y}{2} \left(\frac{(V_{x2} + V_{y2}) - (V_{x1} + V_{y1})}{V_{x1} + V_{x2} + V_{y1} + V_{y2}} \right) \quad (2)$$

donde $V_{\{xi,yi\}}$ son los valores de las señales a la salida de las etapas de amplificación, corregidos respecto de un canal referencia (V_{x1}) para compensar todos los efectos que hacen variar las ganancias, y L_x y L_y son los lados (tamaño) del sensor PSD.

2.2. Calibración geométrica

Para obtener un modelo geométrico del sistema se ha utilizado como base del modelo *pin-hole*. Este es un modelo lineal que relaciona los puntos del entorno con el impacto en el sensor, afectando además los parámetros intrínsecos lineales del sistema óptico. Al modelo *pin-hole* continuo se le añaden los parámetros correspondientes a los efectos producidos por la lente que acoplemos, como son las distorsiones radiales y tangenciales, y también los parámetros correspondientes de distorsión que presenta el propio sensor PSD. El sistema matricial que representa este modelo, según [Rodríguez 16] es el mostrado en (3), donde X_w, Y_w y Z_w son las coordenadas de un punto según el sistema de coordenadas del entorno; C_x, C_y el centro óptico en el PSD; f la distancia focal; r_{ij} son los parámetros de la matriz de rotación y $T_{\{x,y,z\}}$ son los parámetros del vector de traslación entre los sistemas de referencia del PSD y del entorno; y D_x y D_y son la suma de las distorsiones radiales y tangenciales.

$$\begin{pmatrix} s \cdot x \\ s \cdot y \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & \gamma & C_x - D_x \\ 0 & f & C_y - D_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & T_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & T_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & T_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Una vez obtenido el modelo matemático no lineal que se propone para el sistema, hay que desarrollar un método para la obtención de los diferentes parámetros, para lo que se usa una adaptación del método de Zhang [Zhang 00]. El método y resultados completos pueden comprobarse en [Rodríguez 16].

2.3. Medidas y resultados

Para probar los resultados del sensor propuesto y de los procedimientos de calibración del mismo, se han simulado y ensayado diferentes experimentos [Rodríguez 17].

A continuación, se justifican y muestran los resultados obtenidos de posicionamiento 3D a partir de la determinación del plano por el que se mueve el agente móvil. La estrategia consiste en calibrar el plano de movimiento y, una vez conocido, intersectar con este la recta obtenida del ángulo de incidencia.

Calibración del plano de movimiento

La ecuación del plano en forma paramétrica responde a

$$AX + BY + CZ + D = 0 \quad (4)$$

y la ecuación de la recta que une el emisor con el punto de impacto es

$$X_i = \tan \theta_{xi} Z_i \quad (5)$$

$$Y_i = \tan \theta_{yi} Z_i \quad (6)$$

donde i representa las diferentes posiciones en que se coloca el emisor, (θ_x, θ_y) los ángulos de incidencia y (X,Y,Z) las coordenadas 3D con referencia en el receptor.

Sustituyendo, las ecuaciones (5) y (6) en (4) y despejando Z tenemos (7) lo que permite calcular las coordenadas 3-D de la posición:

$$Z = -\frac{D}{A \tan \theta_x + B \tan \theta_y + C} \quad (7)$$

Para obtener los parámetros de la ecuación del plano se han captado 5 puntos luminosos desde una plantilla de calibración que se ha colocado sobre el plano inclinado de movimiento, según se muestra en la Figura 3.

Posicionamiento mediante AoA y movimiento en un plano

Una vez calculada la ecuación del plano se han realizado varias pruebas. La primera de ellas, ya que se tienen las posiciones 3D de los puntos de calibración, ha consistido en calcular por medio de AoA y la intersección recta-plano esas mismas posiciones, determinando así el error que se podría esperar con esta técnica.

En la Figura 3 se muestran los puntos de calibración del plano (PCP) y los obtenidos mediante intersección (PIPR). Los errores de distancia de los puntos de la figura con el receptor se muestran en la Tabla 1.

Otra prueba ha consistido en colocar el emisor en varias posiciones de una circunferencia de medio metro de radio. En la Figura 4 (superior) se muestran los puntos en el plano imagen obtenidos de la circunferencia trazada y su proyección sobre el plano (Figura 4, inferior). Mediante métodos iterativos

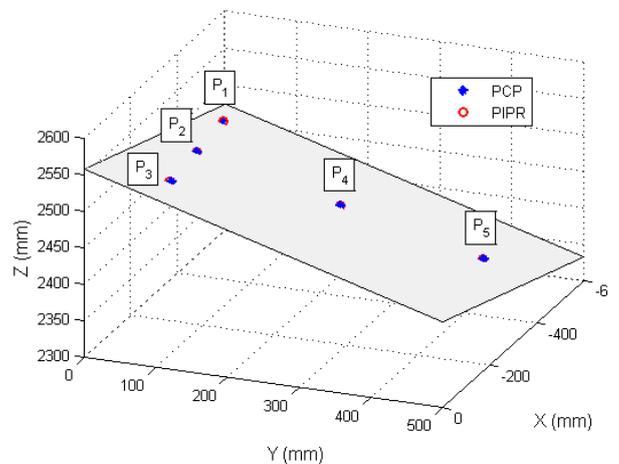


Figura 3: Comparativa de los puntos 3D utilizados para la determinación del plano inclinado y los puntos calculados a partir de la intersección del plano y las rectas formadas por los ángulos de incidencia.

Tabla 1: Errores de los puntos calculados (ver Fig. 2.2).

	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
RMSE (mm)	0.3403	1.7459	0.5619	0.8522	0.7915

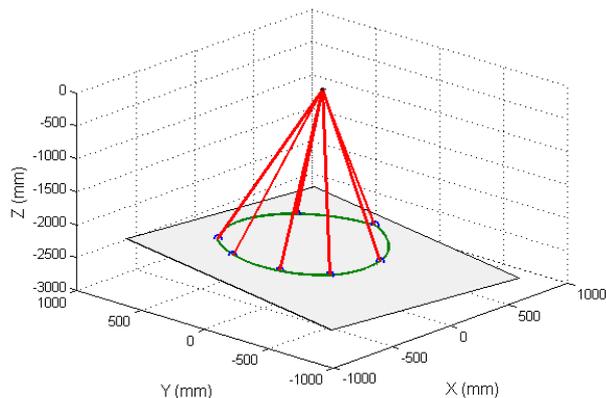
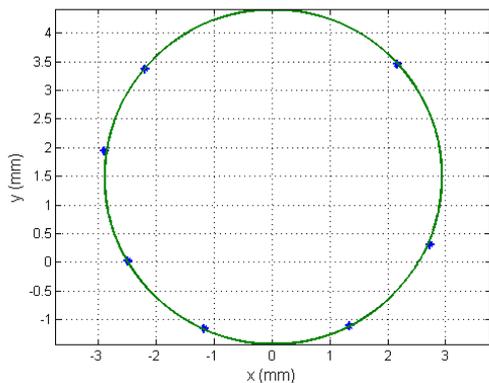


Figura 4: Puntos en el plano imagen de emisiones desde varios puntos de una circunferencia. Puntos en el plano sensor (superior). Proyección sobre el entorno inclinado (inferior).

se ha obtenido el radio de la circunferencia a partir de los puntos, resultando de 496.644mm, y oscilando el error cuadrático medio de la distancia de los puntos a la circunferencia entre 2.2089mm y 3.4272mm.

Posicionamiento mediante AoA y RSS

En otra prueba se complementó la medida de ángulo con distancia utilizando RSS (Received Signal Strength). Aquí los resultados obtenidos, calibrando la potencia emitida mediante un sistema estéreo de 2 PSDs, también han sido relevantes; en la Tabla 2 se muestran los errores obtenido para el posicionamiento en 4 posiciones (puntos P1 a P4 de la Figura 3), mediante la combinación de AoA y RSS.

Ensayos dinámicos

Finalmente se procedió a realizar pruebas dinámicas y a comparar el sistema de posicionamiento basado en IR con otros sistemas mucho más costosos y de tiempo de proceso de cálculo elevado.

En la prueba se instaló el sensor de infrarrojo desarrollado en ALCOR a partir de un PSD S5991-01 de 9mmx9mm, junto

Tabla 2: Errores de 4 puntos calculados mediante AoA y RSS.

	P1	P2	P3	P4
Coordenadas (X,Y,Z) en el plano (mm)	(0,0,0)	(200,0,0)	(400,0,0)	(200,200,0)
Error en el eje x (mm)	-0,5342	-0,8233	3,4138	4,1343
Error en el eje y (mm)	-0,2647	-1,7723	0,2398	1,2995
Error en el eje Z (mm)	-4,9908	-3,2176	-0,2799	12,8168
Error distancia euclídea (mm)	5,0205	3,7646	3,4337	13,5297

a una cámara Kinect 2, detectando cada uno de ellos una marca a bordo de un robot que realiza una trayectoria en espiral. Simultáneamente otro robot realizó un movimiento lineal. En la Figura 5 (superior) se muestra una imagen de los robots mediante la prueba y en la Figura 5 (inferior) los resultados obtenidos. Como puede verse el sensor (puntos en azul) proporciona resultados similares a la Kinect 2 (puntos en verde). Dado que el patrón a detectar por la Kinect no se puede solapar con el emisor IRED a detectar por el PSD, los resultados reflejan esa desviación entre el posicionamiento debido a un sensor y a otro. También puede verse, en rojo, cómo simultáneamente el sensor basado en IR detecta el movimiento lineal del otro robot, que se escapa del campo de visión de la cámara. Es de destacar que con ambos sistemas se obtuvo una precisión centimétrica; sin embargo, nuestro sensor

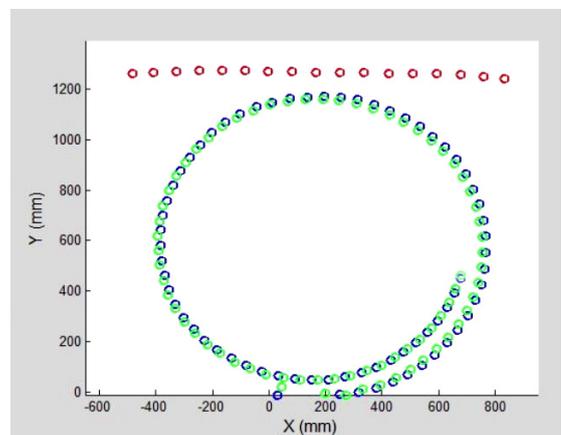


Figura 5: Imagen del experimento de detección de emisor embarcado, en movimiento (superior). Resultados de las pruebas dinámicas (inferior).

es capaz de realizar más de 1000 medidas por segundo, frente a las 4 capturas por segundo de la Kinect 2.

Otros trabajos llevados a cabo en ALCOR están relacionados con la ubicación óptima de receptores en un entorno extenso [Domingo, 16] y con la mitigación de multicaminos [Salido, 16].

3. Principales resultados del subsistema de comunicaciones inalámbricas

El alto dinamismo del sistema de comunicaciones, así como la gran variabilidad de los factores involucrados en la gestión del medio radioeléctrico requieren mecanismos con una elevada adaptabilidad y flexibilidad. En dicho sentido y para resolver los objetivos fundamentales de la red de comunicaciones, en este trabajo se destacan tres contribuciones realizadas dentro del proyecto ALCOR: el desarrollo de mecanismos de sincronización en redes inalámbricas, la inclusión de un sistema distribuido basado en reglas y la utilización de dispositivos con capacidad de estimar la ocupación del canal. Con ello se dota al sistema de los recursos necesarios para hacer frente a desafíos tecnológicos como la saturación del medio, optimización del flujo de información, aspectos ligados a la seguridad (integridad, privacidad, intrusos, etc.), consumo energético eficiente, cambios topológicos dinámicos, etc.

3.1. Mecanismos de sincronización en redes inalámbricas

Las comunicaciones se pueden realizar de manera síncrona o asíncrona entre los diferentes nodos que componen una red. El mecanismo síncrono permite un ajuste de comunicaciones más efectivo, en términos de latencias conocidas y de rendimiento garantizado. Sin embargo, este tipo de redes son muy sensibles a los desajustes de los relojes que rigen cada dispositivo. Por ello, al realizar despliegues de redes inalámbricas con múltiples dispositivos en entornos reales es necesario establecer mecanismos que permitan una buena sincronización de los relojes de ejecución de los nodos. Se ha podido observar que las variaciones de temperatura que afectan a los osciladores de los dispositivos provocan desfases de sincronización.

Por lo tanto, esta parte del trabajo se dedica a mejorar la sincronización en Redes Inalámbricas de Sensores. En particular, se propone un mecanismo de mejora a partir de los gradientes de temperatura existentes en el entorno de trabajo. Fruto del mismo, se presentan dos aportaciones científicas principales. La primera de ellas es la creación de un modelo matemático dependiente de la temperatura, el cual permite ajustar los diferentes desfases producidos en el oscilador del sistema como consecuencia de las variaciones de temperatura [Castillo, 15]. Este modelo se basa en el mecanismo de sincronización por baliza, ajustando los desfases mediante una regresión lineal por mínimos cuadrados. Dicha regresión proporciona una recta de ajuste $t_2 = m \cdot t_1 + n$. Donde t_2 es el tiempo ajustado, t_1 es el tiempo original sin ajuste; m y n son los parámetros determinados por regresión, correspondientes al desfase multiplicativo (denominado clock skew) y al desfase aditivo (denominado offset) de los relojes comparados entre sí,

respectivamente. Para dos osciladores similares, el clock skew tiende a ser cercano a 1. Sin embargo, defectos en el proceso de fabricación y sobre todo, la temperatura, tienen un efecto muy importante en la variación del clock skew, que, a su vez, provoca grandes desfases conforme pasa el tiempo. Se ha podido establecer un factor de corrección del clock skew que viene determinado por la siguiente ecuación:

$$sk_{temp} = sk \cdot (1 + \beta_n \cdot (\Delta T_n)^2) \quad (8)$$

donde sk_{temp} es el *clock skew* ajustado por temperatura, sk es el *clock skew* original (sin ajuste por temperatura), β_n representa el coeficiente de temperatura del oscilador de los nodos (obtenido a partir del datasheet del mismo y asumiendo que ambos nodos tienen el mismo modelo de oscilador) y ΔT_n representa la diferencia de temperatura de un nodo con respecto a la temperatura nominal de funcionamiento (usualmente, 25°C).

La segunda aportación consiste en la creación de un protocolo de sincronización basado en el modelo matemático previamente citado. Este protocolo de sincronización no sólo es capaz de mejorar el comportamiento del error de sincronización frente a cambios de temperatura, sino que además, mejora el error de sincronización con respecto a los protocolos de sincronización propuestos en la literatura científica [Castillo, 17]. Este protocolo incorpora la ecuación (8) al procedimiento de cálculo del nuevo tiempo ajustado, proporcionándose errores de ajuste menores a 3 μs , con variaciones de temperatura superiores a 15°C, frente a errores de ajuste de 20 μs cuando se compara con protocolos que no incorporan ajustes por temperatura.

De manera totalmente novedosa en el ámbito de las WSN (Wireless Sensor Network), se propone la obtención del *clock skew* a través de un filtrado de señales. Gracias a ello, nacen HF-FTSP y HF2-FTSP. Haciendo uso de estos dos nuevos protocolos, es posible clasificar la influencia debido al corte del cristal como una señal de baja frecuencia. Por el contrario, la variación de temperatura puede provocar grandes desfases en cortos periodos de tiempo considerándose una señal de alta frecuencia. Al igual que en el punto anterior, pueden ser utilizados conociendo la temperatura de la mota encargada de gestionar el reloj global (HF2-FTSP) como sin tener información acerca de la misma (HF-FTSP). Para estos protocolos, los experimentos demuestran que el error de ajuste es mucho menor, manteniéndose cercano a 1 μs en todos los casos.

3.2. Mecanismos de enrutamiento y manejo inteligente de red

Para poder establecer un funcionamiento inteligente de la gestión de la red de comunicaciones se ha desarrollado un sistema distribuido basado en reglas que permite dinámicamente determinar el grado de saturación de cada canal de comunicaciones y seleccionar de manera distribuida otros canales que tengan un menor uso.

Los modelos de inteligencia basados en reglas obedecen la lógica reactiva clásica: acción-reacción, antecedente-consecuente, condición-disparo [Cubero, 13]. Teniendo en cuenta que se pretenden controlar aspectos de la propia red, las condiciones van a estar sujetas a datos de naturaleza distribuida, aspecto que plantea importantes decisiones de

diseño. La utilización de recursos de red para evaluar reglas con el objetivo de mejorar el desempeño de la propia red obedece a una lógica que puede resultar en conflicto. Un método de estas características requiere soluciones de compromiso que partan de análisis previos para no obtener un resultado opuesto al pretendido. En esta línea, se ha desarrollado una infraestructura con sistemas de disparo de reglas distribuidas basada en una solución *cross-layer*. Esta infraestructura da soporte al modelo de prioridad y proporciona a la red adaptabilidad a las necesidades de QoS (*Quality of Service*). Así, la gestión dinámica de la red se basa en criterios a diferentes niveles: el contexto de la información y el estado de la propia red. Para obtener información de la red se integran nodos analizadores del medio radioeléctrico y se incorpora esta información a la inteligencia del sistema. Dicho sistema distribuido basado en reglas presenta una estructura en la que la red es autoconfigurada como un árbol, cuyo nodo raíz será un punto de entrada (no necesariamente el único). Cada nodo de la red consta de una base de reglas y un motor de reglas que las procesa. El concepto de regla es simple: una regla se compone de un antecedente y un consecuente, la ocurrencia del antecedente debe dar lugar a la ejecución del consecuente a menos que exista un motivo de fuerza mayor que lo impida. Las reglas involucran aspectos de todo el espectro de abstracción que conlleva el despliegue de la red, y se organizan en una estructura paralela al modelo de capas de red OSI. [Cubero, 17]

En esta línea se ha desarrollado un modelo para la evaluación de condiciones basadas en flujos de datos distribuidos [Leon, 17]. En este trabajo se proponen dos métricas para evaluar la calidad y el coste de la evaluación de los datos booleanos, abriendo la puerta al reajuste dinámico de los recursos destinados al sistema.

El modelo se basa en interpretaciones del dominio de los datos Φ mediante parámetros modificadores Δ , dando lugar a un dominio reducido mediante una familia de funciones de reinterpretación $R: \Phi \times \Delta \rightarrow \Phi' \mid \Phi' \subseteq \Phi$. Aplicando la norma de no enviar dos veces el mismo dato, este mecanismo hace las veces de filtro controlable ajustando los modificadores, lo que introduce una reducción de notificaciones, así como un error en el cálculo de los antecedentes.

Para un conjunto de m muestras de n señales conocidas: $\varphi \in Mm \times n(\Phi)$ donde $Mm \times n$ representa una matriz de m filas y n columnas; particularizando la función de reinterpretación de dominio y sus argumentos: $r \in R, \delta \in \Delta r$; conociendo la función de cálculo del hecho: $s: \Phi n \rightarrow B$; introduciendo la función de condición de cambio $c(\varphi_1, \varphi_2) = 0$, si $\varphi_1 = \varphi_2$; 1, en caso contrario; para $\varphi_1, \varphi_2 \in \Phi$; y evaluando la reinterpretación del conjunto de entrada: $\varphi'_{xy} = r(\varphi_{xy}, \delta)$, $\varphi \in Mm \times n(\Phi)$; podemos calcular la proporción de errores (PoE) y de cambios (PoC):

$$PoE_{s\varphi}^{r\delta} = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} [s(\varphi_{i,0}, \dots, \varphi_{i,n-1}) \oplus s(\varphi'_{i,0}, \dots, \varphi'_{i,n-1})]}{m} \tag{9}$$

$$PoC_{\varphi}^{r\delta} = \frac{\sum_{i=1}^{m-2} [1 + \sum_{j=0}^{n-1} c(\varphi'_{i-1,j}, \varphi'_{i,j})]}{\sum_{i=1}^{m-2} [1 + \sum_{j=0}^{n-1} c(\varphi_{i-1,j}, \varphi_{i,j})]}$$

El cálculo de las variables booleanas que representan hechos en la red es susceptible de ser analizado en términos de coste y beneficio gracias a estas métricas, como se ilustra en la Figura 6 para un caso de estudio particular en la que se realizan numerosas ejecuciones del modelo variando las señales de entrada escogiéndolas aleatoriamente de un dataset real.

Ligado a este concepto, se ha desarrollado un algoritmo adaptativo para maximizar la relación coste/beneficio mediante el análisis de los resultados del modelo antes descrito. Este algoritmo adapta los parámetros de reinterpretación de los dominios de entradas en tiempo de ejecución, consiguiendo reducir notablemente el tráfico de paquetes de red sin cometer errores. La Figura 7 muestra el efecto de la aplicación del algoritmo sobre una señal de entrada, en comparación con la señal sin reducir. En la figura se representa un fragmento de los resultados de un experimento, en el cual se evalúa la condición de que una señal de entrada supere un umbral fijo (representado por la línea horizontal). Como puede observarse, la señal reducida tiende a coincidir con la original en los instantes de cruce con el umbral, que son críticos para no cometer errores en el cálculo de la condición, mientras se ve simplificada a medida que se distancia del umbral. Este mecanismo consigue maximizar el ahorro de tráfico y minimizar los errores al mismo tiempo.

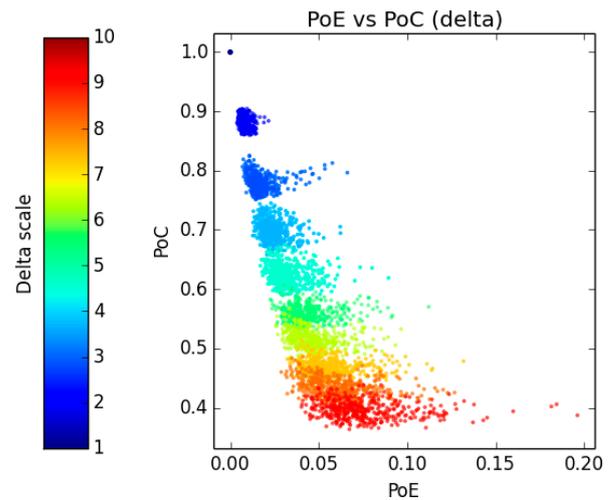


Figura 6: Proporción de errores frente a proporción de cambios (tráfico) obtenida con el modelo de evaluación de hechos para diferentes parámetros de reinterpretación.

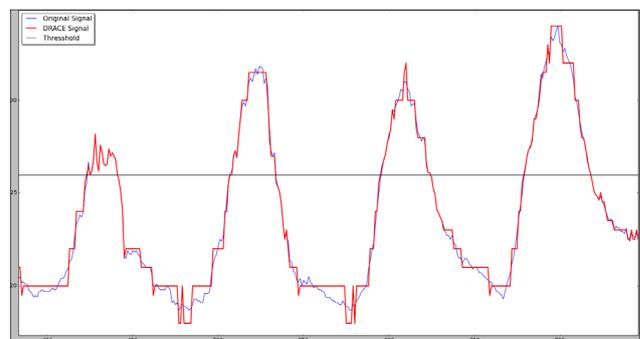


Figura 7: Señal de entrada original (azul) y señal reducida (rojo) obtenida con el algoritmo de adaptación de reducción de dominios de entrada.

3.3. Monitorización de tráfico de red

Una de las aplicaciones más prometedoras del sistema inteligente sobre la red es la selección conveniente del canal de comunicación. Evaluar la conveniencia de trasladar la red a otro canal conlleva, por una parte, manejar información actualizada sobre las necesidades de la red, y por otra parte conocer el estado de los canales disponibles a fin de optar por la opción más prometedora. Para la segunda parte de este desarrollo, se ha avanzado en la construcción de un prototipo asequible de analizador (sniffer) multicanal, que sintetiza el grado de ocupación de los canales en paquetes de información útil para el sistema de toma de decisiones [Sánchez, 17].

El soporte hardware de apoyo para esta estrategia es la aplicación de la plataforma Telos-B a cada nodo de la red inalámbrica: módulos sensoriales, unidades móviles y centro remoto. La Figura 8 muestra un ejemplo de estos dispositivos cuya principal aportación es: permitir el análisis de tráfico de red, detección de ocupación de canal por colisiones, y estimar la probabilidad de ocupación.

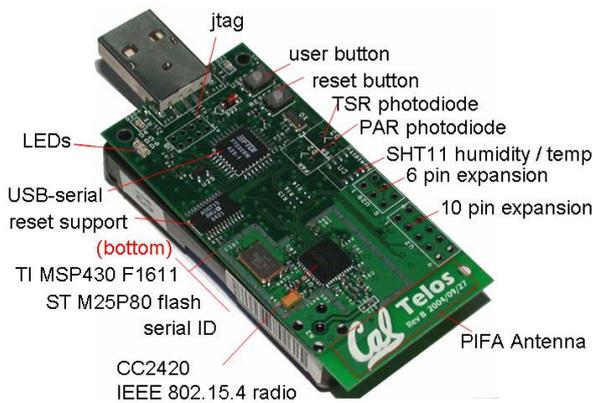


Figura 8: Plataforma hardware TELOS-B que permite analizar la ocupación de canales para comunicación inalámbrica entre nodos.

Para la aplicación de los resultados de estos trabajos, se ha propuesto un algoritmo multi-radio de enrutamiento que maximiza el rendimiento de la red detectando y utilizando canales no ocupados [Estevez, 17], reduciendo así el número de mensajes de control, tiempo de convergencia y consumo.

3.4. Seguridad e integridad de las comunicaciones de red

Las comunicaciones en red son susceptibles de sufrir alteraciones, ya sean de manera intencionada o no. En un entorno con múltiples dispositivos activos es imprescindible incluir elementos que permitan garantizar la integridad de los datos enviados y la ofuscación de los mismos que impidan o dificulten la comprensión de otros receptores no autorizados. Existen diversos mecanismos complejos que permiten encriptar la información o añadirles elementos de codificación que permiten la detección de modificaciones e incluso la corrección de dichos errores. Sin embargo, estos procedimientos son muy exigentes a nivel computacional y no son recomendables para los dispositivos de red de baja capacidad que se incluyen en los despliegues.

Por ello, se han propuesto diversos mecanismos basados en el cálculo del CRC16 (que está implementado como operador directamente en el hardware de la mayoría de microcontroladores de las plataformas de motas inalámbricas en la actualidad) junto con diversas alteraciones posicionales de bloques [Alcaraz, 17]. Estos procedimientos tan sencillos permiten, con un overhead bajo (en torno al 15%) garantizar una detección de errores más elevados (dependiente del número de alteraciones posicionales que se apliquen en el bloque de datos). Además, dichas alteraciones hacen que una captura de un mensaje no permita determinar el contenido real de los datos, salvo que se conozca las permutaciones realizadas sobre los datos dentro de los bloques.

4. Principales resultados del subsistema de control y estimación basados en eventos

Como muestra la Figura 1, en relación con las tareas de control y estimación basados en eventos de ALCOR, la premisa es que desde un único centro remoto se realice el guiado automático, enviando consignas de control a las unidades móviles y demandando información de los sensores de forma eficiente. La estrategia de control basada en eventos permite la actuación aperiódica del robot, reduciendo el número de accesos al canal de forma que no se degrade significativamente las dos tareas contempladas: aproximación a un punto y seguimiento de trayectorias. La solución de estimación basada en eventos con petición de medidas a partir de la evaluación de la matriz de covarianza del error de estimación ofrece una doble ventaja: reducir el tráfico entre nodo de control y estimación (centro remoto) y el nodo sensor, además de evitar la actividad continua de este.

4.1. Control basado en eventos de una unidad móvil

De entre las diferentes soluciones de control aperiódico [Heemels, 12], en el proyecto ALCOR se ha apostado por la técnica de auto-disparo (self-triggered control -STC-), caracterizada por actualizar la ley de control cada instante de disparo y predecir el instante del siguiente disparo, reduciendo así el intercambio de información con la unidad controlada y sin necesidad de un sensado continuo de la misma. La principal contribución del proyecto, en este ámbito, es la de conseguir una solución auto-disparo adaptativo utilizando como planta bajo estudio un robot P3DX controlado de forma remota.

Dado un sistema lineal $\dot{x} = Ax$, con estado $x \in \mathbb{R}^n$, se dice que es globalmente y exponencialmente estable si existen las matrices definidas positivas P y Q tal que $A^T P + PA \leq -Q$. Donde P forma parte de la función de Lyapunov del sistema: $V(t) = x(t)^T P x(t)$. En [Mazo, 09] se plantea una solución con auto-disparo en la que los instantes de disparo se obtienen cuando la función $V(t)$ alcanza otra de referencia $S(t) = x_s(t)^T P x_s(t)$ que limita superiormente a la anterior: $V(t, x_{t_0}) \leq S(t, x_{t_0})$, $t \geq t_0$. El sistema lineal de referencia atiende a la expresión $\dot{x}_s(t) = A_s x_s(t)$, $t \in [t_k, t_{k+1}]$ con $x_s(t_k) = x(t_k)$. La matriz A_s satisface la ecuación de Lyapunov $A_s^T P + P A_s = -R$, con $0 < R < Q$ lo que garantiza $\dot{V}(t_k) < \dot{S}(t_k)$.

Nuestra solución de control con auto-disparo adaptativo [Santos, 14] introduce el parámetro de ajuste σ en la relación:

$R = \sigma Q$, $\sigma \in]0,1]$. La elección de σ proporciona una solución de compromiso entre el número de actualizaciones y los requisitos de estabilidad. Si describimos la estrategia implementada de forma cualitativa, cuando $\sigma \rightarrow 0$ se logra una reducción significativa en el número de actualizaciones del controlador con la correspondiente degradación del índice de comportamiento. Por otro lado, cuando $\sigma \rightarrow 1$ se obtiene un mejor comportamiento del sistema a costa de incrementar el número de actualizaciones.

Tras la simulación de múltiples casos utilizando la herramienta TrueTime, se ha llevado a cabo la implementación en laboratorio con las condiciones de ensayo indicadas en la Figura 9, en el que un mini PC intel NUC realiza las tareas de centro remoto, para un recorrido de 100s con cambios de velocidad lineal y angular [Santos, 14] se han obtenido los resultados experimentales de la Tabla 3. En dicha tabla se comparan diferentes valores del parámetro σ , fijo y adaptativo, con la solución periódica, utilizando como variables de comportamiento el número de actualizaciones, el tiempo entre disparos y el valor del índice integral del cuadrado del error (Integral Square Error –ISE-). La solución adaptativa consigue una importante mejora con respecto a valores fijos del parámetro σ , próximos a 0 o a 1.

Con ello se ha conseguido reducir en un factor de 80 el número de accesos al canal Wifi, con respecto al caso periódico, de un robot realizando una trayectoria no lineal durante 100s; mientras que el índice de comportamiento ISE se degrada solo en un factor de 1.3.

Una mejora de la propuesta anterior, consiste en una solución de control remoto con mecanismo de disparo aperiódico ajustado al retardo real del canal de comunicación [Santos, 15]. Trabajar con el retardo actualizado en lugar de con el retardo máximo permite abandonar esta solución conservadora y adaptarse a las condiciones específicas de la red en cada momento. De esta forma el controlador gestiona el uso del canal inalámbrico mejorando la disponibilidad del mismo para otras tareas. La idea básica es dividir el rango de retardos en L zonas, a partir del registro de retardos reales y de la correspondiente distribución gamma. El controlador remoto self-triggered calcula y envía la solución de control para cada una de las L zonas. La unidad móvil recibe las L señales de control pero aplica solo la que corresponda en función del retardo real relativo experimentado. El canal de comunicación compartido se ajusta al estándar de comunicaciones IEEE 802.11g (Wifi) cuyo retardo de canal suele ser desconocido y variable. Las pruebas experimentales realizadas con 4 unidades robóticas P3-DX, han proporcionado los resultados de la Tabla 4, en la que se compara la solución de auto-disparo (STC) adaptativa con la solución conservadora propuesta en

Tabla 3: Comparación de diferentes soluciones de disparo, aplicadas al control remoto de un robot P3-DX [Santos, 14].

	$\sigma=0.1$	$\sigma=0.9$	σ adaptativo	Periódico 10ms
Actualizaciones (Wifi Tx)	66	1289	127	10000
Tiempo (ms) medio entre actualizaciones	1515	78	787	10
Índice de comportamiento ISE	1.697	0.410	0.308	0.271

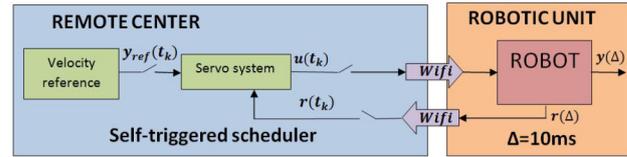


Figura 9: Estructura del servosistema de velocidad implementado para ensayo de controladores self-triggered adaptativo aplicado al guiado remoto de un robot P3-DX.

[Santos, 14] teniendo en cuenta solo el retardo máximo del canal.

4.2. Estimación basada en eventos para control de una unidad móvil

En un espacio inteligente es habitual disponer de un conjunto de sensores para proveer tanto a personas como a unidades móviles algún servicio o facilidad, tales como identificación, localización, reconocimiento de voz o gestos, etc. Los elementos inteligentes de este espacio en muchos casos están conectados mediante tecnologías inalámbricas y se alimentan de baterías. En este contexto es fundamental economizar el uso de dichos sensores con el fin de prolongar su autonomía y asegurar un aprovechamiento adecuado del canal de comunicaciones. Para ello, una alternativa consiste en adquirir y enviar la información de los sensores solo en los instantes realmente necesarios. En contraposición a lo que sucede en los sistemas tradicionales basados en tiempo que son gobernados por una señal de reloj, este nuevo paradigma se denomina estimación basada en eventos (Event-based State Estimation –EBSE-). El mecanismo de disparo puede implementarse bien en el sensor [Martinez-Rey, 16] o bien en el elemento de control con el correspondiente estimador de estados [Martinez-Rey, 15]. Esta última es la implementada en el proyecto ALCOR.

La variable evaluada por el estimador para determinar los instantes en los que se solicita información al módulo sensorial es la matriz de covarianza P del error de estimación. De esta manera, cuando la incertidumbre de estimación es suficientemente grande, se genera una petición de medida y la información aportada por el módulo sensorial contribuye a reducir la matriz P . En sistemas lineales invariantes en el tiempo, establecido el umbral de incertidumbre de disparo el proceso converge a una solución periódica que es función de la matriz R de covarianza del ruido de medida. Sin embargo,

Tabla 4: Comparación experimental de STC adaptativo con compensación de retardo de canal [Santos, 15] frente a la propuesta [Santos 14] basada en retardo máximo, aplicado al guiado autónomo de 4 unidades P3-DX.

	Solución adaptativa		Solución con retardo máximo	
	Actualizaciones (Wifi Tx)	216 264	143 167	126 119
Índice de comportamiento ISE	0.7212 0.8066	0.6893 0.6916	5.3715 5.2490	5.2637 5.2694

en sistemas no lineales, o cuando la precisión del sensor es variante, no se da tal convergencia a un disparo periódico. El nuevo instante de disparo depende del estado del sistema y de las condiciones de trabajo. Una vez recibida la información actualizada del sensor, se puede calcular el nuevo instante de disparo de forma anticipada, lo que permite llevar al módulo sensorial a una situación de reposo (bajo consumo).

En [Martinez-Rey, 16] se plantea el guiado de una unidad móvil, de forma que el control y estimación de estados se realiza de forma remota. Para la estimación de la pose se ha elegido la solución UKF (Unscented Kalman Filter). La principal contribución está en la combinación de la incertidumbre en distancia y la incertidumbre en orientación, para determinar los instantes de disparo. Teniendo en cuenta que la matriz de covarianza $P \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ es diagonal con autovalores: $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_\theta^2$; y que los umbrales de disparo son D_{thr} y θ_{thr} , se solicitará una nueva medida siempre que

$$(P_{11} + P_{22} < D_{thr}^2) \vee (P_{33} < \theta_{thr}^2). \quad (10)$$

En el problema de guiado en robótica hay que contemplar dos fases: la de aproximación a un destino y la de seguimiento de una determinada trayectoria. En la primera fase el algoritmo de control no requiere una localización tan precisa como en la segunda. Con esta idea se ha planteado una solución de EBSE en [Martinez-Rey, 15] en la que el umbral D_{thr} se adapta con la distancia a la trayectoria a seguir según la expresión:

$$D_{thr} = \sqrt{D_{trk}^2 + D_{appr}^2} = \sqrt{D_{trk}^2 + (\hat{L}K_D)^2}, \quad (11)$$

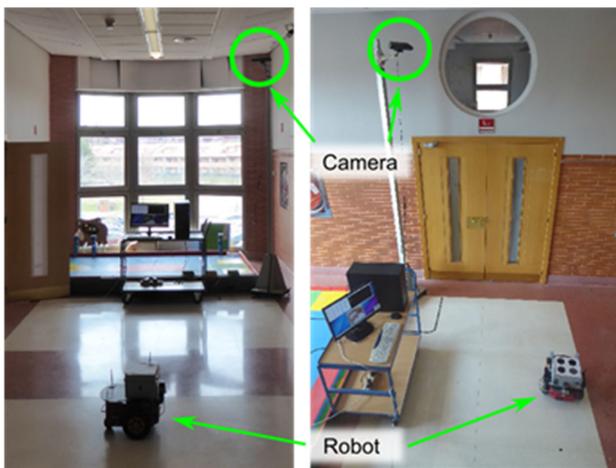


Figura 10: Set-up para el ensayo de sensado aperiódico con mecanismo de disparo remoto basado en covarianza.

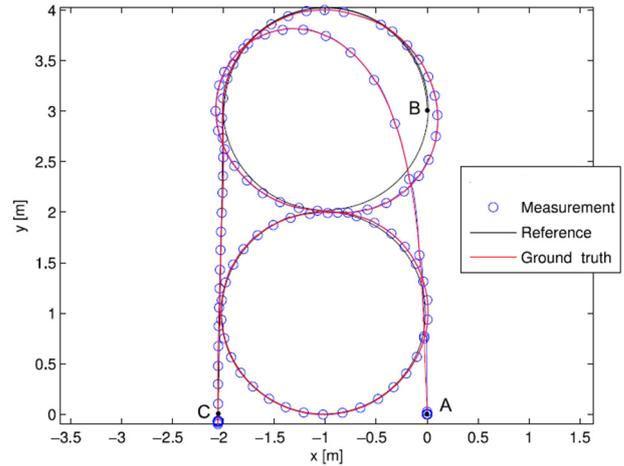


Figura 11: Comparación de trayectoria de referencia y ground-truth en el ensayo experimental de EBSE adaptativo propuesto en el proyecto ALCOR. En azul se indican los instantes en los que la cámara aporta al estimador medida de la pose.

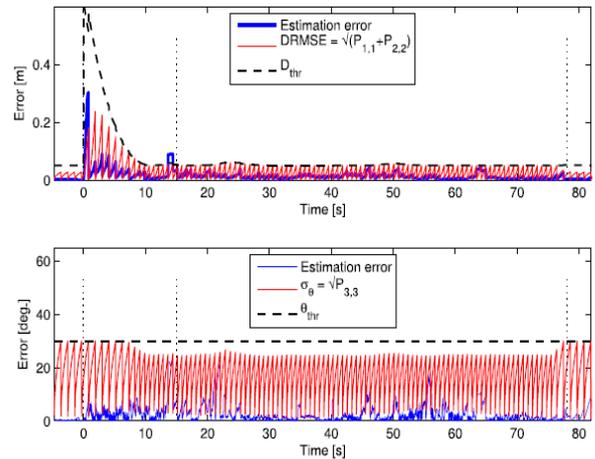


Figura 12: Efecto de las incertidumbres de distancia (DRMSE) y orientación (σ_θ) en la generación de eventos del ensayo de las Figuras 10 y 11.

siendo: D_{appr} el umbral de disparo en la fase de aproximación (approaching), D_{trk} el umbral de disparo en la fase de seguimiento (tracking), \hat{L} la distancia de la unidad móvil a la trayectoria a seguir, y K_D un parámetro de ajuste.

Para la experimentación de esta estrategia de sensado aperiódico se ha utilizado un set-up como el mostrado en la Figura 10. Una muestra de resultados ensayados se incluye en la Figura 11, donde la trayectoria de referencia (en forma de ocho) es de trazo continuo, tiene su origen en el pto B y termina en el pto C, mientras que la posición inicial del robot es el pto A. Las medidas aportadas por el sensor se indican con círculos azules y el recorrido real (ground-truth) se indica con trazo continuo rojo. En la Figura 12 se muestra la evolución temporal de las incertidumbres de distancia (Distance Root Mean Square Error –DRMSE-) y de ángulo (σ_θ), generándose un nuevo disparo cada vez que una de ellas alcanza el umbral establecido; en azul se indica el error de estimación.

5. Conclusión

El proyecto ALCOR ha aportado contribuciones científico-tecnológicas al uso eficiente de la energía y acceso al canal de los nodos de control y sensado característicos de entornos inteligentes, en este caso para el guiado automático de unidades móviles. En el ámbito sensorial se ha conseguido una estructura flexible de sensores IR (PSDs) para identificar y localizar, con precisión centimétrica y tiempos de respuesta de milisegundos, unidades móviles dotadas del correspondiente emisor IRED en un entorno extenso. Se han resuelto los problemas de calibración eléctrica y geométrica, y las pruebas en régimen dinámico han proporcionado errores similares a la conocida cámara Kinect 2 pero con una frecuencia de muestreo 50 veces mayor.

La combinación de diferentes mecanismos: sincronización, enrutamiento (sistema distribuido basado en reglas) y auscultación de tráfico red han contribuido a mejorar la integridad y seguridad de las comunicaciones inalámbricas necesarias para el enlace entre sensores, unidades móviles y centro de control remoto. Las aportaciones en el ámbito de control se han centrado en el guiado remoto de unidades móviles aplicando técnicas aperiódicas, concretamente auto-disparo adaptativo con compensación del retardo del canal. Además, la realimentación de la pose para las maniobras de aproximación a un punto y seguimiento de trayectorias se ha implementado de forma también aperiódica con mecanismo de petición de medidas basado en la matriz de covarianza del error de estimación e implementado en el centro remoto de control.

Actualmente se está trabajando en la integración de todas las contribuciones en un único demostrador, como paso previo a la extensión a una red de sensores inalámbricos y a múltiples unidades robóticas.

Agradecimientos

El proyecto coordinado ALCOR está siendo financiado por el M^o de Economía y Competitividad a través de los sub-proyectos: DPI2013-47347-C2-1-R y DPI2013-47347-C2-2-R

Referencias

- Alcaraz, J.M.; Olivares, J. 2017 "Data Obfuscation and Integrity System by Blocks for Wireless Sensor Networks". *Journal of Information Security and Applications*. Work in progress
- Cano-García, A.E; Pompa, Y; Lázaro, J.L. 2016. "Preliminary simulation for an Optical-Indoor Positioning System based on cyclic-Time Difference of Arrival". In Proc. of the 2016 International Conference on Indoor Positioning (IPIN 2016).
- Castillo-Secilla, J.M; León, F; Olivares, J.; Palomares, J.M. 2015. "Multiplicative composition of clock-skew components for improving time synchronisation". *Electronics Letters* 51 (13), 991-993.
- Castillo-Secilla, J.M; Palomares, J.M; León, F; Olivares, J. 2017. "Homomorphic Filtering for Improving Time Synchronization in Wireless Networks" *Sensors* 17 (4), 24.
- Cook, D.J., Augustob, J.C. and Jakkulaa, V.R. 2009. "Ambient intelligence: Technologies, applications, and opportunities". *Pervasive and Mobile Computing*. Volume 5, Issue 4, Pp 277-298.
- Cubero, A. Castillo-Secilla, J. M.; Palomares, J.M.; Olivares, J.; León, F. 2013. "Distributed Intelligent Rule-Based Wireless Sensor Network Architecture". *Ambient Intelligence-Software and Applications*, 187-194. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 219. Springer, Heidelberg.
- Cubero, A. ; León, F. ; Palomares, J.M.; Olivares, J. 2017 "Adaptive Pattern Matching Model for Distributed Rule-Based Systems for the Internet of Things". *Journal of Parallel and Distributed Computing*. Work in progress
- De-la-Llana-Calvo, A; Lázaro-Galilea, J.L; Gardel-Vicente, A; Rodríguez-Navarro, D; Bravo-Muñoz, I; Tsirigotis, G; Iglesias-Miguel, J. 2017. "Model for IR signal reflection applied to indoor multipath propagation" *Sensors* 2017, 17, 847
- Domingo-Perez, F; Lazaro-Galilea, J.L; Wieser, A; Martin-Gorostiza, E; Salido-Monzu, D; de la Llana, A. 2016. "Sensor placement determination for range-difference positioning using evolutionary multi-objective optimization". *Expert Systems with Applications*, Vol 47, pp 95-105.
- Estévez, F.J; Castillo-Secilla, J.M; González, J; Olivares, J; Glösekötter, P; 2017. "mDARAL: A Multi-Radio Version for the DARAL Routing Algorithm" *Sensors* 17 (2), 17.
- Haykin, S. 2005. "Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communication"; *Communications, IEEE Jopurnal on*. Vol.23, n.º 2, pp. 201-220.
- Heemels, W.P.M.H; Johansson, K.H; Tabuada, P. 2012. 'An introduction to event-triggered and self-triggered control', 51st IEEE Conference on Decision and Control, Maui, Hawaii, USA.
- Heißmeyer, S; Overmeyer, L; Müller, A. 2013. "Optical Indoor Positioning of Vehicles". *Logistics Journal*, 2013, vol. 2013
- León, F. ; Cubero, A. ; Castillo-Secilla, J. M.; Palomares, J.M.; Olivares, J. 2017 "Avoiding Traffic in Threshold-Based EventDetection WSNs". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. Under review.
- Martin-Gorostiza, E. 2011. "Sistema de Posionamiento Local para Localización Absoluta de Robots Móviles en Espacios Inteligentes mediante Infrarrojos". Tesis Doctoral, Dpto. de Electrónica de la Universidad de Alcalá, 2011.
- Martin-Gorostiza, E; Domingo-Perez, F; Lázaro-Galilea, J.L; Meca-Meca, F.J; Wieser, A; Salido-Monzú, D. 2016. "Specular multipath model for an optimal anchor placement evolutionary algorithm". In Proc. of the 2016 International Conference on Indoor Positioning (IPIN 2016).
- Martínez-Rey, M; Espinosa, M; Gardel, A; Santos, C. 2015 "On-Board Event-Based State Estimation for Trajectory Approaching and Tracking of a Vehicle". *Sensors*. 15 (6), pp. 14569-14590, DOI:10.3390/s150614569
- Martínez-Rey, M; Santiso, E; Espinosa, F; Nieto, R; Gardel, A. 2016. "Smart laser scanner for event-based state estimation applied to indoor positioning". In Proceedings of the 7th Int. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Alcalá de Henares, Spain. DOI:10.1109/IPIN.2016.7743613
- Mautz, R; Tilch, S. 2011 "Survey of Optical Indoor Positioning Systems". Proc. of the 2011 International Conference on Indoor Positioning and Navigation (IPIN). Doi 10.1109/IPIN.2011.6071925, pp-1-7. Guimaraes (Portugal), Sept 2011
- Mazo Jr, M; Anta, A; Tabuada, P. 2009. "On self-triggered Control for Linear Systems: Guarantees and Complexity", 10th European Control Conference, July 2009.
- Miskowicz, M. 2015. "Event-Based Control and Signal Processing", CRC Press, United Kingdom. ISBN: 9781482256550.
- Mitola, J. 2006. "Cognitive Radio Architecture. The Engineering Foundations of Radio XML"; ISBN: 978-0-471-74244-9. October 2006.
- Rodríguez-Navarro, D; Lázaro-Galilea, J.L; Bravo-Muñoz, I; Gardel-Vicente, A; Tsirigotis, G. 2016 "Analysis and Calibration of Sources of Electronic Error in PSD Sensor Response". *Journal: Sensors* 2016, 16(5), 619.
- Rodríguez-Navarro, D. 2017. "Sistema de posicionamiento local basado en interiores en PSD". Tesis Doctoral. Universidad de Alcalá. Marzo de 2017.
- Salido-Monzú, D; Meca-Meca, F.J; Martín-Gorostiza E; Lázaro-Galilea, J.L. 2016. "SNR Degradation in Undersampled Phase Measurement Systems" *Sensors* 2016, 16(10), 1772.
- Sánchez, M.; Palomares, J.M.; Olivares, J. 2017 "SnifferWSNTOS: Software Implementation for Multi-Channel IEEE 802.15.4 Adaptive Sniffer". *Journal of Wireless Communications and Mobile Computing*. Work in progress.
- Santos, C; Mazo Jr, M; Espinosa, F. 2014. "Adaptive Self-triggered Control of a Remotely Operated P3-DX Robot: Simulation and Experimentation" *Robotics and Autonomous Systems*. Elsevier. DOI: 10.1016/j.robot.2014.01.010.
- Santos, C; Espinosa, F; Santiso, E; Mazo Jr, M. 2015. "Aperiodic linear networked control considering variable channel delays: application to robot coordination". *Sensors-Basel* 2015, 15, 12454-12473. DOI:10.3390/s150612454.
- Zhang, Z. 2000. A Flexible New Technique for Camera Calibration. *Technical Report* 11.