

APROXIMACIÓN DE ROBOT A UN PUNTO BASADA EN EVENTOS CON POSICIONAMIENTO MEDIANTE PSD

Carlos Santos

Departamento de Electrónica. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Alcalá. carlos.santos@uah.es

David Rodríguez

Departamento de Electrónica. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Alcalá. david.rodriguez@uah.es

Álvaro de la Llana

Departamento de Electrónica. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Alcalá. alvaro.llana@uah.es

Felipe Espinosa

Departamento de Electrónica. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Alcalá. felipe.espinosa@uah.es

José L. Lázaro

Departamento de Electrónica. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Alcalá. josel.lazaro@uah.es

Resumen

En los sistemas de control en red, las estrategias de control basado en eventos han demostrado su efectividad para reducir notablemente la carga del canal inalámbrico sin degradar de forma significativa el índice de comportamiento establecido. El mecanismo de generación de eventos Self-triggered contempla un tiempo mínimo para garantizar estabilidad y un tiempo máximo de aceptación del sistema en lazo abierto. El tiempo mínimo, en la práctica, suele venir impuesto por la frecuencia máxima de cómputo del sistema a controlar y de actualización de los sensores remotos. Entre los sensores de posicionamiento en interiores que mayor tiempo de procesamiento requieren están las cámaras de visión artificial por lo que se siguen explorando técnicas de sensado con menor carga computacional. En este contexto, la alternativa de los dispositivos de sensado de posición (PSD) ópticos aporta importantes mejoras que se evalúan en este trabajo. Para la validación experimental se utiliza un robot P3-DX, con control aperiódico Self-triggered para alcanzar un punto de destino a partir de una determinada pose, utilizando un emisor IRED embarcado y un PSD en la infraestructura.

Palabras clave: sistema de posicionamiento, sensor óptico de posición, control basado en eventos Self-triggered, sistema de control en red, red inalámbrica de sensores, robótica.

1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de control en red (NCS) y las redes de sensores inalámbricos dan soporte a una amplia gama

de aplicaciones académicas e industriales [7,8,18,19]. Ejemplos claros son el control remoto de un robot para alcanzar un punto de la trayectoria a partir de una pose inicial, o el seguimiento de la misma, utilizando sensores ubicados en la infraestructura y conectados al centro remoto.

En este contexto, la posibilidad de conectar de forma inalámbrica nodos de sensado, de control y de actuación supone una gran ventaja pero no está exenta de problemas: retardos variables [3,10], pérdida de paquetes [2,4], limitaciones de ancho de banda [11,12], etc. Para potenciar las ventajas de flexibilidad y mantenimiento de las redes inalámbricas reduciendo su efecto negativo en la estabilidad de la planta controlada, se viene trabajando en técnicas de control, sensado y estimación basada en eventos [12,13]. Desde el punto de vista de control, estas técnicas consiguen aumentar el tiempo entre disparos (eventos), ya que solo se actualizará la planta en los instantes de tiempo en los que sea necesario para cumplir con un índice de desempeño predeterminado. El valor máximo del tiempo entre disparos de la técnica Self-triggered es fijado por el diseñador y determinará la robustez del sistema ante las perturbaciones, ya que se encarga de fijar el tiempo máximo de funcionamiento en lazo abierto del sistema [11].

En [5,13] se muestran los fundamentos teóricos y resultados experimentales de un ejemplo de control y estimación, de forma remota y aperiódica, aplicados al seguimiento de trayectorias no lineales con un robot móvil. En este caso el nodo sensorial incorpora una cámara Kinect 2. El tiempo transcurrido desde que el centro remoto solicita una medida de pose hasta que la recibe del nodo sensorial es aproximadamente 150ms; esto supone que, el robot desplazándose a 1m/s ha

recorrido 15cm. Y, por tanto, es uno de los puntos débiles de la aplicación. Téngase en cuenta que, además del doble retardo del canal inalámbrico, se incluye la identificación gráfica del patrón AprilTag [17] y su procesamiento para obtener la posición y orientación del punto de referencia. Una de las soluciones a este problema pasa por recurrir a sensores de respuesta más rápida y similar precisión de medida. En este trabajo se describe la experiencia de los autores con el PSD S5991-01.

El resto del artículo está estructurado de la siguiente forma, la sección 2 aborda los fundamentos teóricos y la sección 3 los resultados experimentales, dejando para la sección 4 las conclusiones y trabajos futuros.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El punto de partida para diseñar la solución de control es el modelo de la planta, en este caso cinemática del robot no-holonómico expresada como:

$$\begin{aligned}\dot{X}(t) &= v(t) \cos \Theta(t) \\ \dot{Y}(t) &= v(t) \sin \Theta(t) \\ \dot{\Theta}(t) &= \omega(t)\end{aligned}\quad (1)$$

siendo $[X, Y, \Theta]^T$ el vector de pose real del robot, y $[v, \omega]^T$ el vector de velocidades lineal y angular, en un instante t . La figura 1 ayuda a entender el significado de estas variables, donde el subíndice r indica los valores de referencia de las mismas variables. Otras variables de interés son el error en distancia L y el error de orientación α del robot con respecto al punto objetivo..

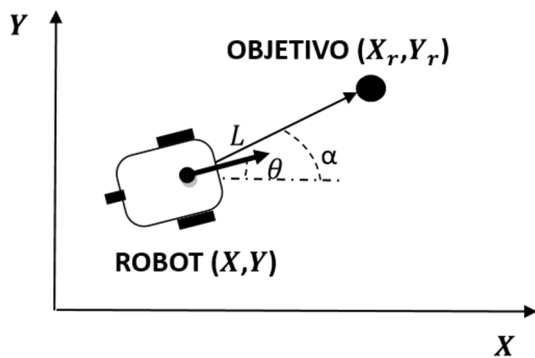


Figura 1: Principales variables involucradas en el problema de alcanzar un punto de la trayectoria a partir de una pose inicial conocida de un robot no-holonómico.

Con estas premisas, el error de distancia L y el error de ángulo α , en coordenadas polares, se pueden expresar de la forma:

$$\begin{aligned}L(t) &= \sqrt{(X_r(t) - X(t))^2 + (Y_r(t) - Y(t))^2}, \\ \alpha(t) &= \text{atan2}\left(\frac{Y_r(t) - Y(t)}{X_r(t) - X(t)}\right) - \Theta(t).\end{aligned}\quad (2)$$

Teniendo en cuenta el modelo cinemático (1), la derivada temporal de los errores de distancia y orientación se expresan como:

$$\begin{aligned}\dot{L}(t) &= -v(t) \cos \alpha(t), \\ \dot{\alpha}(t) &= -\omega(t) + v(t) \frac{\sin \alpha(t)}{L(t)}.\end{aligned}\quad (3)$$

Se asume que las velocidades de referencia $v_r(t)$ y $\omega_r(t)$ se mantienen constante entre disparos y son conocidas por el centro remoto.

2.1 CONTROL NO LINEAL BASADO EN EVENTOS

En la figura 2 se muestra el esquema de la solución de control no lineal para aproximación a posición objetivo del robot. La diferencia entre la pose de referencia $x_r(t)$ y la estimada $\hat{x}(t)$, permite obtener el error de distancia y ángulo de seguimiento, necesarios para garantizar la estabilidad mediante la función de Lyapunov V y definir el mecanismo de disparo para la obtención del próximo evento t_k .

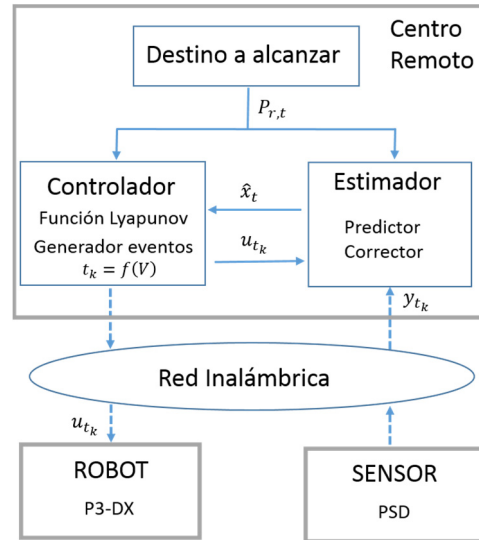


Figura 2: Esquema del control basado eventos ejecutado en el centro remoto para aproximación a punto objetivo del robot utilizando sensor de posicionamiento PSD.

2.1.2 Solución de control basada en Lyapunov

El controlador diseñado está basado en [1], obteniéndose las siguientes leyes de control para la velocidad lineal y angular:

$$v(t) = K_v L(t) \cos \alpha(t), \quad (4)$$

$$\omega(t) = K_w \alpha(t) + K_v L(t) \cos \alpha(t) \sin \alpha(t), \quad (5)$$

donde $K_v > 0$ y $K_w > 0$ son las ganancias de control. En definitiva, resulta la siguiente función de Lyapunov que garantiza la estabilidad del sistema en lazo cerrado

$$V(t) = \frac{1}{2} L^2(t) + \frac{1}{2} \lambda \alpha^2(t), \quad (6)$$

donde λ es un factor de ajuste mayor que 0.

2.1.3 Mecanismo de disparo

Sea el sistema no-lineal autónomo con dinámica

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)), \quad (7)$$

donde $x(t) \in D_x \subset \mathbb{R}^{n_x}$ es el estado de la planta y $u(t) \in D_u \subset \mathbb{R}^{n_u}$ la entrada de la misma, ambos dominios contienen al origen. Existe una ley de control $K: D_x \rightarrow D_u$, tal que el origen del sistema en lazo cerrado

$$\dot{x}(t) = f(x(t), K(x(t))), \quad (8)$$

es el único punto de equilibrio local asintóticamente estable en D_x . Y en el caso de implementación del controlador mediante mantenedor de orden cero (ZOH) resulta

$$\dot{x}(t) = f(x(t), K(x(t_k))), \quad t \in [t_k, t_{k+1}[, \quad k \in \mathbb{N}. \quad (9)$$

Siguiendo el mismo razonamiento que en [14], para establecer la estrategia de disparo que garantice estabilidad asintótica del sistema, se define la siguiente estrategia de disparo Self-triggered:

$$t_{k+1} = \min\{t > t_k \mid \dot{V}(t) \geq 0\}. \quad (10)$$

Mediante esta técnica de disparo el sistema solo se actualizará en los instantes de tiempo en los que la derivada de la función de Lyapunov deje de ser negativa. De esta forma se garantiza la estabilidad asintótica del sistema tal y como se describe en [14].

En [16] se aborda el cálculo teórico del mínimo tiempo entre disparos t_{min} que garantiza la no existencia de comportamiento Zeno, sin embargo en la práctica este valor viene impuesto por los condicionantes electrónicos al implementar la solución en controladores digitales.

2.1.3 Estimador de estados

La función del estimador es proveer al controlador del estado estimado \hat{x}_t , con el valor de predicción \hat{x}_t^-

mientras no recibe medida actualizada y_{t_k} del sensor remoto, y con el valor de corrección \hat{x}_t^+ una vez recibida la medida, véase figura 2.

Dado el modelo no lineal de la planta (1), con ruido de estado $\eta_{x,t}$ de matriz de covarianza $Q_{x,t}$, ruido de entrada $\eta_{u,t}$ de matriz de covarianza $Q_{u,t}$ y ruido de medida $\eta_{y,t}$ con matriz de covarianza R_t , se utiliza un Unscented Kalman Filter (UKF) para propagar el estado estimado \hat{x}_t , y la matriz de covarianza del error de estimación S .

Siendo h la función que calcula la predicción del estado mediante la transformación Unscented, cada periodo Δ , se tiene

$$(\hat{x}_{t+\Delta}^-, S_{t+\Delta}^-) = h(\hat{x}_t^-, u_t, S_t^-, Q_x, Q_u). \quad (11)$$

Y la corrección de la pose estimada tras cada medida permite calcular

$$\hat{x}_{t_k}^+ = \hat{x}_{t_k}^- - S_{t_k}^- (S_{t_k}^- + R_{t_k})^{-1} S_{t_k}^- (y_{t_k} - \hat{x}_{t_k}^-), \quad (12)$$

y para la matriz de covarianza del error de estimación

$$S_{t_k}^+ = S_{t_k}^- - S_{t_k}^- [S_{t_k}^- + R_{t_k}]^{-1} S_{t_k}^-, \quad (13)$$

2.1.4 Obtención de la pose mediante el sensor PSD

El sensor de posicionamiento óptico detecta la posición de un spot de luz enviado por el emisor de infrarrojo. Esto facilita la obtención de las coordenadas X e Y del emisor en el plano de referencia, tal y como se muestra en la figura 3. Contando con la medida P_{t_s} y la obtenida en la muestra anterior $P_{t_{s-1}}$, el nodo sensorial obtiene la orientación $\theta_{t_{s-1}}$

$$\theta(t_{s-1}) = \text{atg} \frac{Y_{t_s} - Y_{t_{s-1}}}{X_{t_s} - X_{t_{s-1}}}. \quad (14)$$

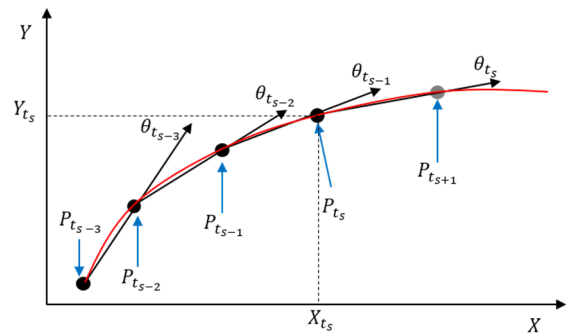


Figura 3: Estimación de orientación del móvil $\theta_{t_{si}}$ a partir de las medidas de posición $P_{t_{si}}$ registradas por el PSD.

Para estimar la orientación actual θ_{t_s} , se propone predecir la posición $P_{t_{s+1}}$ a partir de un polinomio de grado 2 para la coordenada $X_{t_{s+1}}$ y otro para la coordenada $Y_{t_{s+1}}$. Los coeficientes (ax_i, ay_i) de estos polinomios se obtienen por mínimos cuadrados contando con un mínimo de tres puntos $(P_{t_{s-2}}, P_{t_{s-1}}, P_{t_s})$. De esta forma se estima la orientación θ_{t_s}

$$\theta(t_s) = atg \frac{Y_{t_{s+1}} - Y_{t_s}}{X_{t_{s+1}} - X_{t_s}}. \quad (15)$$

3 EXPERIMENTACIÓN

Para los ensayos experimentales se ha contado con un demostrador que incluye: centro remoto, robot y sensor PSD, conectados mediante Wifi, tal y como se muestra en la figura 4.

Tanto el nodo de control como el de sensado cuentan con un mini PC (NUC5i3RYH) con un Procesador Core i3 y RAM de 4GB. El robot es un Pioneer 3-DX con la arquitectura electrónica adicional descrita en [6]. Los procesadores de los tres nodos utilizan Ubuntu (versión 12.04) como sistema operativo que proporciona la herramienta estándar de sincronización NTP (versión 4.2.6).

El sistema sensorial está formado por el sensor PSD S5991-01, ubicado a una altura de 3,5m cubriendo un área circular de radio 1m. Y por un IRED (Infrared Emitted Diode) SFH-4233 de Osram dispuesto sobre el robot.

Las covarianzas de proceso y de medida utilizadas en el estimador son:

$$Q = \begin{bmatrix} 10^{-8} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-8} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-8} \end{bmatrix}; \quad (16)$$

$$R = \begin{bmatrix} 9.4 \cdot 10^{-6} & -5.41 \cdot 10^{-6} & -5.18 \cdot 10^{-5} \\ -5.41 \cdot 10^{-6} & 1.32 \cdot 10^{-5} & 8.57 \cdot 10^{-5} \\ -5.18 \cdot 10^{-5} & 8.57 \cdot 10^{-5} & 7.73 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}.$$

La figura 4 muestra el entorno de trabajo del demostrador.

Se han realizado 3 ensayos partiendo de posiciones similares en los ejes X e Y pero con 3 orientaciones distintas. Para realizar una comparativa con las técnicas tradicionales, los ensayos se han realizado tanto con el control aperiódico como con un control periódico. Los parámetros de diseño del controlador son $K_v = 0.5$ y $K_w = 0.1$.



Figura 4: Demostrador utilizado para los resultados experimentales.

En la Figura 5 se muestran las rutas realizadas, en todos los ensayos se parte de la zona $(-1.2, 0.0)$ siendo la posición objetivo el punto $(0.25, 1.43)$ en color verde. Las orientaciones iniciales para cada ensayo son distintas: Ensayo 1 (trazo azul) 1.309 rad (75°), Ensayo 2 (trazo negro) 1.047 rad (60°) y Ensayo 3 (trazo rojo) 0.785 rad (45°). En la gráfica se representa con trazo continuo la estimación periódica de la posición \hat{x}_t^- del robot proporcionada por el UKF, con un círculo las medidas puntuales enviadas por el PSD en los instantes fijados por el control Self-triggered y en trazo discontinuo la reconstrucción de la ruta capturada por el PSD al finalizar el ensayo. El control Self-triggered entre muestras trabaja en lazo abierto sin actualizar la ley de control ni tomar medidas nuevas. Cada instante de disparo, la nueva ley de control se envía al robot y se recibe información de pose del PSD. Con la nueva medida el UKF realiza la correspondiente corrección de la pose estimada \hat{x}_t^+ y de la covarianza S . En todos los casos se aprecia como el controlador es capaz de alcanzar la posición objetivo, representada en color verde.

En la figura 6 se representa, en color azul, la función de Lyapunov asociada al Ensayo 1. Esta función describe la estabilidad del sistema. En la gráfica se puede apreciar como el sistema reduce el error de forma progresiva hasta llegar al punto de equilibrio. En color rojo se representan los instantes de actualización del sistema, estos tiempos son calculados por el control Self-triggered.

En la Figura 7 se representan las velocidades lineal y angular del Ensayo 1. Estas velocidades son calculadas por el control Self-triggered y mantenidas hasta el siguiente instante de actualización.

Por último se incluye una tabla en la que se presentan los resultados de los 3 ensayos con las soluciones de control periódico (50ms) y aperiódico. El periodo de 50ms viene impuesto por el sensor PSD. Como índice de comportamiento comparativo se ha utilizado el error de distancia L al objetivo. En los resultados obtenidos se aprecia como, para un error de distancia similar, el ahorro en el número de actualizaciones en el caso aperiódico es relevante.

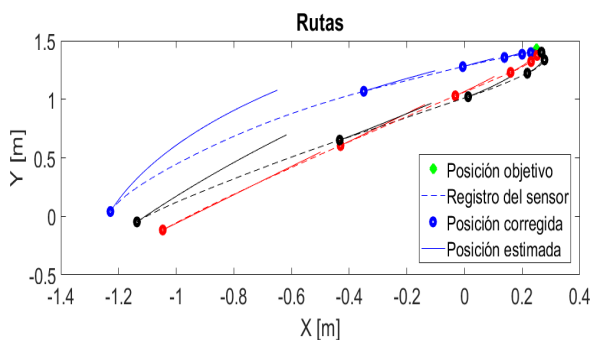


Figura 5: Rutas realizadas en los distintos ensayos, con el control aperiódico.

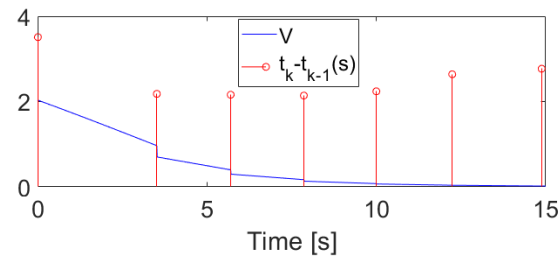


Figura 6: Ensayo 1: función de Lyapunov e instantes de actualización del sistema.

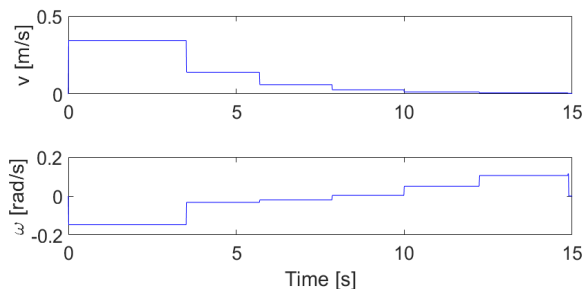


Figura 7: Ensayo 1: velocidades lineal y angular aplicadas al robot.

3 CONCLUSIONES

Los nodos inalámbricos sensoriales trabajando en modo aperiódico, por sí mismos o por su implicación en sistemas de control en red, siguen siendo motivo de investigación. Conseguir relajar la frecuencia con la que la información sensada está disponible para el resto de nodos sigue siendo objeto de estudio por las implicaciones que ello conlleva desde el punto de vista de eficiencia del canal y de autonomía del sensor.

Este trabajo ha permitido cuantificar, en una aplicación robótica, la mejora del comportamiento de sensado de posicionamiento basado en PSD frente a la opción de cámara de visión artificial [13]. La rápida respuesta del PSD permite reducir el tiempo mínimo del sensado aperiódico y despreciar el retardo entre el momento de captura de la pose y el momento de su aplicación en el estimador remoto.

La principal restricción en el ensayo realizado ha sido el área limitada cubierta por el sensor PSD. Para reducir este efecto, la propuesta de futuro pasa por trabajar en espacios que permita ubicar al PSD más alto, así como establecer una red de sensores PSD con ubicación adaptada al entorno requerido de trabajo.

Una alternativa para reducir los saltos en la estimación de la pose visualizados en la figura 5, es sustituir la solución Self-triggered por una Event-triggered, con el coste en comunicación que supone una comunicación periódica sensor-estimador remoto..

Tabla 1: Resultados de experimentación de los 3 ensayos aplicando tanto el control periódico como el control aperiódico.

Ensayo	Aperiódico			Periódico		
	1	2	3	1	2	3
Actualizaciones	7	6	7	300	300	300
Error distancia L(m)	6.59	6.85	6.93	8.87	8.55	9.21

English summary

EVENT-BASED ROBOT APPROACHING WITH PSD POSITIONING SYSTEM

Abstract

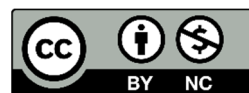
In networked control systems, event-based control strategies have proven effectiveness in significantly reducing the load on the wireless channel without relevantly degrading the established performance index. The Self-triggered mechanism contemplates a minimum time to guarantee stability and a maximum

time of acceptance for the system working in open loop. The minimum time, in practice, is usually imposed by hardware restrictions and by the refresh rate of the remote sensors. In the case of computational vision cameras, this time may be significant and sensing techniques requiring less computational load are being explored. In this context, the alternative of optical position sensing devices (PSD) provides important improvements that are evaluated in this work. A P3-DX robot with Self-triggered control for approaching task and external sensing via PSD are used for experimental validation,

Keywords: positioning system, optical device position sensor, Self-triggered control, networked control system, wireless sensing network, robotics.

Referencias

- [1] Aicardi, M.; Casalino, G.; Bicchi, A.; Balestrino, A. Closed loop steering of unicycle like vehicles via lyapunov techniques, *Robotics Automation Magazine*, IEEE 2 (1) (1995) 27-35.
- [2] Casanova, V.; Salt, J.; Cuenca, A.; Piza, R. Networked Control Systems: Control structures with bandwidth limitations. *Int. J. Syst. Control Commun.* 2009, 1, 267–296. [1] Casanova, V.; Salt, J.; Cuenca, A.; Piza, R. Networked Control Systems: Control structures with bandwidth limitations. *Int. J. Syst. Control Commun.* 2009, 1, 267–296.
- [3] Cloosterman, M.B.G.; van deWouw, N.; Heemels, W.P.M.H.; Nijmeijer, H. Stability of Networked Control Systems With Uncertain Time-Varying Delays. *IEEE Trans. Autom. Control* 2009, 54, 1575–1580.
- [4] Cuenca, A.; García, P.; Albertos, P.; Salt, J. A Non-Uniform Predictor-Observer for a Networked Control System. *Int. J. Control Autom. Syst.* 2011, 9, 1194–1202.
- [5] Espinosa, F.; Lázaro, J.L.; Olivares, J. Proyecto ALCOR: contribuciones a la optimización del guiado remoto de robots en espacios inteligentes. *Revista Iberoamericana de automática e informáticas industrial.* 2018. 1–4. <https://doi.org/10.4995/riai.2018.9199>
- [6] Espinosa, F.; Salazar, M.; Pizarro, D.; Valdes, F. Electronics Proposal for Telerobotics Operation of P3-DX Units. In *Remote and Telerobotics*; Mollet, N., Ed.; InTech: Hong Kong, China, 2010; Chapter 1.
- [7] Gupta, R.A.; Chow, M.Y. Networked Control System: Overview and Research Trends. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2010, 57, 2527–2535.
- [8] Hespanha, J.P. A Survey of Recent Results in Networked Control Systems. *Proc. IEEE* 2007, 95, 138–162.
- [9] Li, H.; Shi, Y. Network-Based Predictive Control for Constrained Nonlinear Systems with Two-Channel Packet Dropouts. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2014, 61, 1574–1582.
- [10] Luan, X.; Shi, P.; Liu, F. Stabilization of Networked Control Systems With Random Delays. *IEEE Trans. Ind.*
- [11] Mazo Jr, M.; Anta, A. and Tabuada, P. An ISS self-triggered implementation of linear controllers, *Automatica*, 46 (2010), pp. 1310{1314.6
- [12] Miskowicz, M. *Event-Based Control and Signal Processing*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2016.
- [13] Santos, C.; Martínez-Rey, M.; Espinosa, F.; Gardel, A. and Santiso, E. Event-Based Sensing and Control for Remote Robot Guidance: An Experimental Case. *Sensors (Basel)*. 2017 Sep; 17(9): 2034. Doi: 10.3390/s17092034.
- [14] Santos, C.; Espinosa, F.; Santiso, E. and Martínez-Rey, M. "A simplified event-triggering condition non-dependent on measurement error," 2017 3rd International Conference on Event-Based Control, Communication and Signal Processing (EBCCSP), Funchal, 2017, pp. 1-6. doi: 10.1109/EBCCSP.2017.8022823
- [15] Tabuada, P. Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks, *IEEE Trans. Autom. Control*, 52 (2007), pp. 1680{1685.
- [16] Tiberi, U.; Johansson, K. A simple self-triggered sampler for perturbed nonlinear systems. *Nonlinear Anal. Hybrid Syst.* 2013, 10, 126–140.
- [17] Wang, J.; Olson, E. AprilTag 2: Efficient and robust fiducial detection. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon, Korea, 9–14 October 2016.
- [18] Yang, S.H.; Cao, Y. Networked Control Systems and Wireless Sensor Networks: Theories and Applications. *Int. J. Syst. Sci.* 2008, 39, 1041–1044.
- [19] Zhang, S.; Zhang, H. A review of wireless sensor networks and its applications. In *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Automation and Logistics*, Zhengzhou, China, 15–17 August 2012; pp. 386–389.



© 2018 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC-BY-NC 3.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>)