

CONTROL ADAPTATIVO BASADO EN LA ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DE UNA RED INALÁMBRICA

Luis Orihuela y Francisco R. Rubio
Dept. Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla
{luoriesp, rubio}@us.es

Resumen

En este trabajo se presenta el control de plantas lineales cuando el sensor, controlador y actuador están conectados por medio de una red inalámbrica. Lo que se pretende es utilizar la información dada por los parámetros de calidad de servicio de la red en tiempo real. En concreto, a partir de la medida del retardo que introduce la red, se diseña un algoritmo de control adaptativo para hacer frente a los efectos que esto ocasiona. Se muestran ejemplos en los que se observa la eficacia del método propuesto.

Palabras Clave: Sistemas de control a través de redes; calidad de servicio; control adaptativo.

1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de control realimentados donde el lazo de control se cierra a través de una red de comunicaciones en tiempo real son llamados *Networked Control Systems* (NCS). La característica esencial que define a un NCS es que la información, ya sea la señal de control, la referencia o la salida, se intercambia entre los componentes del sistema usando una red, Zhang et al. [14]. Un esquema general sobre como la información fluye en un NCS se muestra en la Figura 1.

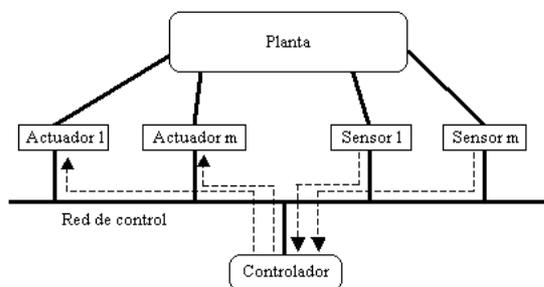


Figura 1. Esquema general del flujo de información en un NCS

La utilización de una red de comunicación para realizar este intercambio de información conlleva ventajas e inconvenientes que deben tenerse muy presentes a la hora de elegir su utilización. Las ventajas principales son la reducción del cableado del sistema, la facilidad de mantenimiento y diagnóstico de problemas, y el incremento de la flexibilidad del sistema. Sin embargo, la inserción de la red en el bucle de realimentación hace que el estudio de un NCS sea complejo. En general, puede hablarse de un deterioro de los parámetros que componen lo que se conoce como calidad del servicio (QoS), a saber, retardos constantes o variables (*jitter*), pérdidas de información, tamaño máximo de paquetes, velocidades máximas del canal.

El desconocimiento de estos parámetros hace que sistemas de control que han sido diseñados sin tenerlos en cuenta pueden degradar sus especificaciones o, incluso llegar a desestabilizarse.

Algunas redes actuales que son candidatas para implementaciones de NCS son las DeviceNet, Ethernet o WiFi, por nombrar a algunas. Cada una de ellas tiene sus propias características y protocolos que las hacen deseables para un tipo de aplicaciones u otro. Para el presente trabajo se utilizarán las redes basadas en el protocolo 802.11 del IEEE [7].

El estudio de los sistemas de control a través de redes inalámbricas (WNCS) es un tema que está recibiendo mucha atención recientemente. Las líneas de investigación son muy variadas, desde el mantenimiento de tasas de bits efectivas, Nair et al. [8], hasta estabilidad del sistema resultante, Walsh et al. [12] o Naghshtabrizi et al. [9], pasando por algunos algoritmos que se utilizan para hacer frente a la degradación del canal de comunicaciones, Tian et al. [11]. Sin embargo, no existen muchos trabajos en los que se utilicen las medidas de los parámetros de QoS *on-line* para diseñar controladores. En Nikolakopoulos et al. [10] se miden algunos parámetros de QoS para ajustar el tiempo entre tramas y las retransmisiones de paquetes. Lo que aquí se pretende es, a partir de la medida del retraso que introduce la red, obtener señales de control adecuadas para el sistema. La validación de los algoritmos que se van a presentar se hará en el

entorno de simulación TrueTime, presentado en Cervin et al. [3], Andersson et al. [2], Cervin et al. [4] y Henriksson et al. [6].

El trabajo comienza con una introducción a los sistemas controlados a través de redes. Seguidamente se realizará un estudio del canal de comunicaciones, así como la elección de los protocolos que se utilizarán para el intercambio de información. A continuación se presentan los algoritmos de control adaptable a los parámetros de QoS medidos. El trabajo concluye con la presentación de ejemplos y conclusiones.

2 FORMULACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL A TRAVÉS DE REDES

Supongamos que se tiene un sistema continuo, representado por su función de transferencia $G(s)$. Ya sea porque el acceso al sistema así lo requiere, o por aumentar la flexibilidad del sistema, éste se encuentra únicamente conectado a una red inalámbrica, tal y como muestra la Figura 2.

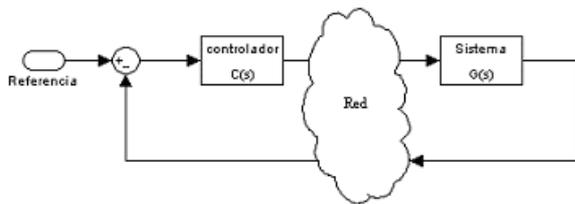


Figura 2. Lazo de control de un NCS

Para facilitar la notación, se presenta la formulación para un sistema con una sola entrada y una sola salida (SISO), aunque es fácilmente adaptable para sistemas MIMO. Un sensor muestrea la salida del sistema en el instante kT , $k \in \mathbb{N}$, siendo T el periodo de muestreo. Debido a que la red es un medio compartido, se producirán retardos. Además de éstos, hay que tener en cuenta otros retrasos, como los de propagación o de transmisión. Sin embargo, como se verá más adelante, en las tecnologías actuales, los retrasos mayores son los debido al acceso al medio. No se tienen en cuenta pérdidas de paquetes. Así que, a la entrada del controlador se tendrá

$$e(t) = r(t) - \hat{y}(t) = r(t) - y(t - \tau_1)$$

siendo, $r(t)$ la referencia y τ_1 el retardo que introduce la red en el sentido sensor - controlador.

El controlador está basado en eventos, es decir, realiza sus funciones en cuanto detecta que ha llegado una muestra de la salida (ver el tutorial [5], para más información). Una vez calculada la señal de

control, ésta se envía de nuevo por la red hasta el otro extremo, por lo que sufrirá un nuevo retardo, τ_2 , de valor, en principio, diferente al anterior. Al actuador llegará $\hat{u}(t) = u(t - \tau_2)$.

3 ESTUDIO DEL CANAL DE COMUNICACIONES

El estándar del IEEE 802.11b [7] es un protocolo para comunicaciones en radio frecuencias. Podrían haberse escogido otros medios físicos para su utilización como red de comunicaciones. Sin embargo hay un conjunto de características que llevan a decidirse por éste en concreto. Para empezar, las tecnologías inalámbricas están actualmente en auge, ya que dan una gran versatilidad a las posibles localizaciones de los equipos y elimina el coste de instalación de cableado. Puede pensarse en un sistema de control multivariable donde los sensores y actuadores se encuentren en posiciones distantes entre sí y, además, de difícil acceso. En estos casos, medios con cables, como Ethernet, no son adecuados.

Dentro de las posibles tecnologías sin cables existentes, como son WiFi, Bluetooth, Wimax o ZigBee, en este trabajo se ha utilizado el estándar 802.11b por dos motivos. Para empezar es un estándar muy extendido, con equipos muy baratos y velocidades de transmisión adecuadas para su utilización en NCS. Además, el entorno TrueTime está preparado para simularlo, lo que permite hacer numerosos experimentos antes de realizar la inversión económica.

El estándar del IEEE contempla las capas más bajas del modelo OSI. En concreto, las capas físicas y la subcapa de control de acceso al medio (MAC). En cuanto a la capa física, y sin entrar en modulaciones, 802.11b opera en la banda de 2.4 GHz y ofrece cuatro velocidades de transmisión 1, 2, 5.5 y 11 Mbps. La capa MAC utiliza el protocolo de acceso múltiple por detección de portadora con evitación de colisiones (CSMA/CA) para acceder al medio compartido. Cuando un equipo desea enviar un paquete a la red debe esperar a que el medio está libre y, llegado ese momento, un tiempo aleatorio adicional durante el cual el medio debe permanecer libre. Se reducen de este modo la probabilidad de colisiones.

En cuanto a las posibles topologías o configuraciones que pueden usarse, este estándar permite configuración en Infraestructura, donde todos los nodos se conectan con un nodo maestro, o Ad-hoc, donde cada nodo puede comunicarse con cualquier otro nodo. Para utilizarlas en NCS son igualmente válidas ambas posibilidades. En las simulaciones se supondrá que se utiliza la configuración Ad-hoc, en

parte porque es más sencillo implementarla y es más general que la configuración Infraestructura.

Para la capa de transporte se tienen dos posibilidades, TCP o UDP. Como se muestra en Aad et al. [1] o en Xylomenos et al. [13], las redes inalámbricas tienen un comportamiento mejor bajo el protocolo de transporte UDP en cuanto a rendimiento. UDP es un protocolo no orientado a conexión y, por tanto, no se requieren señales de asentimientos para sincronizar al cliente y al servidor. En UDP puede surgir el problema de que paquetes que se enviaron después lleguen antes al destino. Esto ocurre porque la cabecera de los paquetes UDP contiene muy poca información. Todas estas características hacen de UDP un protocolo preferible para aplicaciones en tiempo real.

Los paquetes UDP se introducen en datagramas IP. La longitud máxima del datagrama IP dependerá del medio sobre el que se envíe. IP establece que todas las redes deberían ser capaces de enviar, al menos, 576 octetos. Las cabeceras, en general, de estos protocolos son de 20 octetos para IP y 8 octetos para UDP. Estas cabeceras podrían ser mayores con diversas opciones.

4 CONTROL ADAPTABLE A LOS PARÁMETROS QoS

Los parámetros que componen la calidad de servicio, tales como retrasos, pérdidas o ancho de banda no resultan fáciles de medir en tiempo real. Pero aún es más difícil aprovechar esas medidas para diseñar un control que pueda hacer frente a estas degradaciones. Esto se debe, principalmente, a que la mayoría de las redes que se utilizan y, concretamente, las redes 802.11b, tienen un gran componente estocástico y la medida de un parámetro en un instante no permite asegurar nada sobre el valor que tomará ese parámetro en un instante posterior.

Sin embargo, puede asumirse que los cambios en el tráfico de la red no serán tan rápidos, comparados con los tiempos en los que se muestrean y se envían las actuaciones. Esto puede asumirse así porque, en muchos casos, se utilizarán redes dedicadas específicamente al control en los que el tráfico estará mucho más controlado.

Aprovechando esta característica, se pretende diseñar un método de control que sea capaz de hacer frente a los retrasos que sufren los paquetes de información que circulan por la red. Básicamente, el algoritmo que va a seguirse es:

- En cada instante de muestreo, el sensor lee la salida de la planta. Construye un paquete UDP/IP y en el campo de información añade, además del valor

leído, una marca de tiempo en el que se ha hecho esa lectura.

- Al llegar el paquete al controlador, que actúa por eventos, éste dispondrá de la salida de la planta y del retraso sensor-controlador. Debido a que la dinámica de la red es relativamente lenta, el controlador supone que el retraso en sentido controlador-actuador será el mismo que el retraso sensor-controlador.

- Conocido el retraso total que tiene el sistema, el controlador adaptativo diseña una actuación con alguna técnica de control de sistemas con retardos conocidos. Encapsula el valor en un paquete UDP/IP y lo envía al actuador.

Este algoritmo se repetiría en cada instante de muestreo, por lo que se tendría cada vez un control distinto dependiendo del retraso medido.

Para que este algoritmo funcione hay que asumir que los relojes del controlador y sensor están sincronizados. Este inconveniente podría solucionarse si se estuviesen enviando continuamente paquetes desde el controlador para que volviesen a él y pudiese conocerse el retraso de ida y vuelta (*round trip delay*). Sin embargo, esta solución hace que se sature la red, ya que mientras más exactitud se quiera en la medida, más paquetes habrá que enviar. Además habría que dotar al sensor y al actuador de mayor inteligencia.

Con respecto a la técnica de control, puede usarse cualquiera que permita tratar sistemas con retrasos. Pueden citarse, por ejemplo, las reglas de Ziegler – Nichols, técnicas basadas en parametrización afín o predictor de Smith.

5 EJEMPLOS

En este apartado se va a probar la eficacia del método propuesto con dos técnicas muy distintas para el diseño de controladores de la familia de los PID: las reglas de sintonía de Ziegler - Nichols; y el diseño mediante la parametrización afín. En ambos ejemplos, el sistema está descrito por,

$$G(s) = \frac{10}{s+1}. \quad (1)$$

Con respecto a las características propias de la transmisión por la red, los elementos se intercambiarán paquetes de 100 octetos, de los cuales 28 corresponden a las cabeceras de los protocolos. En el espacio restante hay capacidad suficiente para incluir los datos que hay que transmitir, además de las marcas de tiempo.

La velocidad binaria del canal se escoge de 5.5 Mbps. La distancia entre equipos será la suficiente para que las señales lleguen, teniendo en cuenta la potencia de transmisión de los equipos y los umbrales de recepción. Con un equipo medio, [16], que emite una potencia de 18 dBm y tiene una sensibilidad de -80 dBm, la señal alcanza 50 metros.

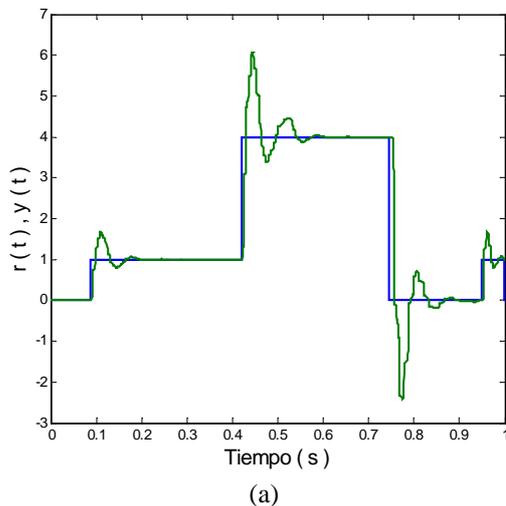
5.1 FÓRMULAS DE SINTONÍA DE ZIEGLER - NICHOLS

Las formulas de sintonía de Ziegler – Nichols [15] aplicadas al sistema (1) más un retraso de valor τ para el diseño de un PI son

$$\begin{aligned} K_p &= \frac{0,0702}{0,005 + \tau}, \\ T_i &= \frac{0,005 + \tau}{0,3}. \end{aligned} \quad (2)$$

siendo K_p la ganancia y T_i el tiempo integral. El valor de los parámetros se halla en cada tiempo de muestreo. Con este nuevo valor cada vez, se halla el valor de la señal de control.

En la Figura 3 se muestra la salida del sistema utilizando un controlador fijo y con el controlador adaptativo que varía sus parámetros con el retardo medido. En ambos casos, la ocupación de la red va aumentando según avanza la simulación, que ha sido realizada en el entorno TrueTime.



Puede observarse, como la respuesta obtenida con el controlador adaptativo propuesto es mejor que el caso de utilizar un controlador fijo.

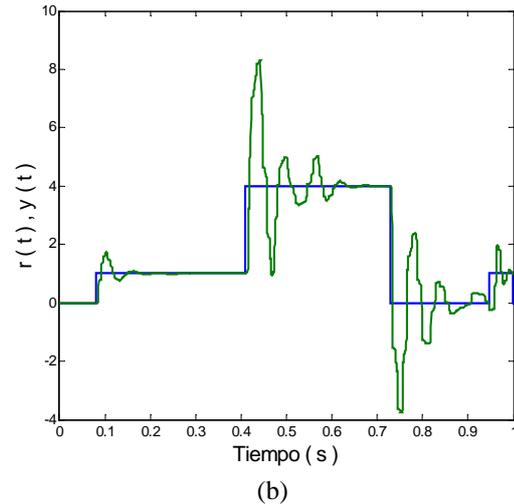


Figura 3. Salida del sistema (a) con control adaptativo. (b) sin control adaptativo

5.2 PARAMETRIZACIÓN AFÍN

El segundo método que se propone para hallar los parámetros del controlador PID es el llamado método basado en parametrización afín. Lo que se persigue es expresar la función de transferencia del controlador de una forma nueva, es decir, una nueva parametrización del controlador. Esta nueva parametrización permitirá expresar las funciones de sensibilidad como funciones afines en la variable de diseño.

Según la parametrización afín, se busca un controlador $K(s)$ de la forma siguiente.

$$K(s) = \frac{Q(s)}{1 - Q(s)G_o(s)}. \quad (3)$$

La función $G_o(s)$ es un modelo lineal de la planta a controlar. Diseñar un controlador $K(s)$ para que el lazo cerrado sea estable puede ser complicado. Pero con este método se asegura la estabilidad y lo único que debe buscarse es una función $Q(s)$ que sea estable. Por tanto, $Q(s)$ se convierte en la nueva variable de diseño. Las funciones de sensibilidad se expresan fácilmente a partir de $Q(s)$.

$$\begin{aligned} T_o(s) &= Q(s)G_o(s), \\ S_o(s) &= 1 - Q(s)G_o(s), \\ S_{io}(s) &= [1 - Q(s)G_o(s)]G_o(s), \\ S_{uo}(s) &= Q(s). \end{aligned} \quad (4)$$

Expresar las especificaciones que se desea que tenga el sistema en bucle cerrado a partir de las funciones de sensibilidad es sencillo. Y traducir esas

especificaciones a $Q(s)$ lo es también, ya que esas funciones de sensibilidad son afines en $Q(s)$.

Una buena elección de partida para la $Q(s)$ es la siguiente,

$$Q(s) = F_Q(s)[G_o(s)]^{-1}, \quad (5)$$

donde $F_Q(s)$ es un filtro paso de bajo que permite que $Q(s)$ sea propia. $[G_o(s)]^{-1}$ es la inversa exacta del modelo nominal. Esto puede llevar a que la función $Q(s)$ tenga polos inestables o ceros de fase no mínima, como se verá más adelante, y haya que modificar algo la elección.

Para el problema que aquí se estudia, se tiene una planta que se representa con un modelo de primer orden con retardo.

$$G_o(s) = \frac{k_o e^{-s\tau_o}}{v_o s + 1}. \quad (6)$$

El retraso puede aproximarse con una aproximación de Padé de primer orden.

$$e^{-s\tau_o} \approx \frac{-s\tau_o + 2}{s\tau_o + 2}. \quad (7)$$

Sustituyendo esa expresión en el modelo nominal se obtiene la siguiente aproximación racional del modelo de la planta.

$$G_{0p}(s) = \frac{k_o(-s\tau_o + 2)}{(v_o s + 1)(s\tau_o + 2)} \approx G_o(s). \quad (8)$$

Esta función tiene un cero de fase no mínima que conviene pasar simétricamente al plano negativo. Se construye así la función $G_o^i(s)$.

$$G_o^i(s) = \frac{k_o}{v_o s + 1} \frac{s\tau_o + 2}{s\tau_o + 2} = \frac{k_o}{v_o s + 1}. \quad (9)$$

Como esta función sólo tiene un polo, al invertirla aparecerá un cero que hará que la función sea impropia y, por lo tanto, hay que añadir un filtro de primer orden de la forma $F_Q(s) = (\alpha s + 1)^{-1}$. Se obtiene así la siguiente función $Q(s)$.

$$Q(s) = \frac{v_o s + 1}{k_o(\alpha s + 1)}. \quad (10)$$

El controlador queda, finalmente, de la siguiente forma.

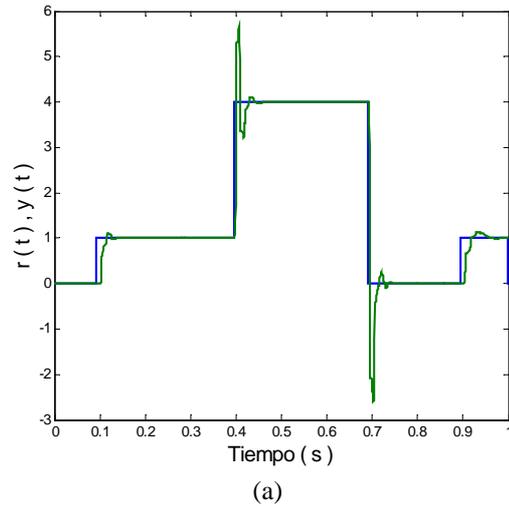
$$K(s) = \frac{1}{k_o(\alpha + \tau_o)} \frac{\left(\frac{v_o \tau_o}{2}\right) s^2 + \left(v_o + \frac{\tau_o}{2}\right) s + 1}{s \left(\left(\frac{\tau_o}{2(\alpha + \tau_o)}\right) s + 1\right)} \quad (11)$$

Haciendo la equivalencia con un PID paralelo de la forma $K(s) = K_p + K_i/s + K_d s/(\tau_d s + 1)$, las ganancias y la constante de tiempo correspondientes valen

$$\begin{aligned} K_p &= \frac{2v_o + \tau_o}{2k_o(\alpha + \tau_o)} - \frac{\alpha\tau_o}{4k_o(\alpha + \tau_o)^2}, \\ K_i &= \frac{1}{k_o(\alpha + \tau_o)}, \\ K_d &= \frac{v_o + \tau_o}{2k_o(\alpha + \tau_o)} - \frac{\alpha\tau_o(2v_o + \tau_o)}{4k_o(\alpha + \tau_o)^2} + \frac{\alpha^2\tau_o^2}{4k_o(\alpha + \tau_o)^3}, \\ \tau_d &= \frac{\alpha\tau_o}{2(\alpha + \tau_o)}. \end{aligned} \quad (12)$$

Al igual que en el apartado anterior, con el controlador adaptativo propuesto, en cada instante de muestreo habría que actualizar el valor de los parámetros antes de hallar la señal de control.

En la Figura 4 se muestra la salida del sistema utilizando un controlador fijo y otro que varía sus parámetros con el retardo medido. En ambos casos, la ocupación de la red va aumentando según avanza la simulación, que ha sido realizada en el entorno TrueTime.



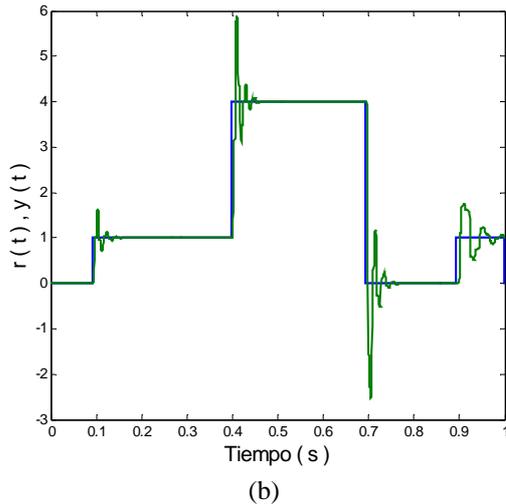


Figura 4. Salida del sistema. (a) con control adaptativo. (b) sin control adaptativo.

6 CONCLUSIONES

Se ha presentado un método para contrarrestar los efectos negativos que introduce una red de comunicación en los sistemas de control basándose en la medida en tiempo real del retraso que sufren los paquetes. Con el conocimiento del retraso en el camino sensor – controlador se estima el del camino controlador – actuador, suponiendo que las características de la red tienen una dinámica lenta.

Se han propuesto dos algoritmos simples de control PID en los que se ha utilizado este método. En ambos casos, los resultados son visiblemente mejores que en el caso de controladores fijos.

El trabajo aquí presentado es fácilmente aplicable a otros métodos de control de sistemas con retardo, como los predictores de Smith, sin más que utilizar la medida del retraso medida como parámetro.

Referencias

[1] Aad, I. and Castellucia, C. (2003). "Priorities in WLANs", *Computer Networks*, 41, 505-526.

[2] Andersson, M., Cervin, A., Henriksson, D., and Årzén, K. E. (2005). "Simulation of Wireless Networked Control Systems", *Proceedings of the 44th Conference on Decision and Control, and the European Control Conference, Seville, Spain*.

[3] Cervin, A., Henriksson, D., and Ohlin, M. (2007). "TrueTime 1.5-Reference Manual", *Department of Automatic Control, Lund University*.

[4] Cervin, A., Ohlin, M., and Henriksson, D. (2007). "Simulation of Networked Control Systems using TrueTime", *Department of Automatic Control LTH, Lund University, Sweden*.

[5] Dormido, S., Sánchez, J., Kofman, E. (2008), "Muestreo, Control y Comunicación Basados en Eventos". *Revista Iberoamericana de Automatica e Informática Industrial (RIAI)*, Vol 5-1, pp 5.26.

[6] Henriksson, D, Cervin, A., and Årzén, K. E. (2003). "TrueTime: Real-time control system simulation with MATLAB/Simulink", *Proceedings of the Nordic MATLAB Conference, Copenhagen, Denmark*.

[7] IEEE Std 802.11 (2001). "IEEE standard for local and metropolitan area networks: wireless LAN medium access control (MAC) and Physical Layer (PHY) specification.

[8] Nair, G., Evans, R., Mareels, I., and Moran, W. (2003). "Feedback data rates for nonlinear systems", *Proceedings of the European control conference, Vol. 112, Cambridge, UK*.

[9] Naghshtabrizi, P., and Hespanha, J. P. (2005). "Designing an observer-based controller for a network control system", *Proceedings of the 44th Conference on Decision and Control, and the European Control Conference, Seville, Spain*.

[10] Nikolakopoulos, G., Panousopoulou, A., and Tzes, A. (2008). "Experimental controller tuning and QoS optimization of a wireless transmission scheme for real-time remote control applications", *Control Engineering Practice*, 16(3), 333-346.

[11] Tian, Y., and Levy, D. (2008). "Compensation for control packet dropout in networked control systems", *Information Sciences*, 178(5), 1263-1278.

[12] Walsh, G. C., Ye, H. and Bushnell, L. G. (2002). "Stability analysis of networked control systems", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 46(7), 1093-1097.

[13] Xylomenos, G. and Polyzos, G. (1999). "TCP and UDP performance over a wireless LAN", *Proceedings of the 18th annual joint conference of the IEEE computer and communications societies*, 439-446, New York, NY, USA.

- [14] Zhang, W., Branicky, M. S. and Phillips, S. M. (2001). "Stability of Networked Control Systems", *IEEE Control Systems Magazine*, February, 84-99.
- [15] Ziegler, J. G., Nichols, N. B. (1942). "Optimum settings for automatic controllers", *Trans. ASME*, 1942, 65, 433-444.
- [16] <http://www.tp-link.com/>