



SISTEMAS CIBERFÍSICOS: PRINCIPALES ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN LA INDUSTRIA MODERNA

Alberto Villalonga Jaén^a, Yarens Cruz Hernández^b

^a Centro de Estudio en Fabricación Avanzada y Sostenible (GIFAS), Universidad de Matanzas, Cuba, alberto.villalonga@umcc.cu

^b Universidad de Matanzas – Sede “Camilo Cienfuegos”, Matanzas, Cuba

Resumen: Los sistemas ciberfísicos (SCF) son la nueva generación de sistemas inteligentes, se caracterizan por conferirle mayor importancia a la interacción entre los procesos físico y los componentes computacionales. En este trabajo se aborda acerca de los conceptos básicos de los mismos, las principales metodologías de control que son utilizadas en SCF, así como sus aplicaciones en la industria moderna.

Palabras claves: Sistema ciberfísicos, Control en Red, Control basado en Pasividad, Control basado en Eventos, Control distribuido.

Abstract: Cyberphysical systems (CPS) are the new generation of intelligent systems, they are characterized to give more importance to the interaction between the physical world and the computational components. This paper deals with the basic concepts of CPS, the main control methodology that are used in CPS as well as its applications to modern industry.

Keywords: Cyberphysical System, Networked Control, Passivity Based Control, Event Based Control, Distributed Control.

1. Introducción.

Los sistemas embebidos son sistemas computacionales diseñados para la realización de una o varias funciones dedicadas, los cuales son empleados en diversas aplicaciones tales como teléfonos inteligentes, reproductores mp3, sistemas de radares de aviones, el control de grandes fábricas, entre otras muchas.

En la actualidad el gran desarrollo de las tecnologías de la informática y la comunicación, así como la convergencia entre los espacios físicos y cibernéticos han transformado los sistemas embebidos tradicionales en sistemas ciberfísicos (SCF), los cuales son caracterizados por la estrecha integración y coordinación existente entre los procesos físicos y computacionales a través de la comunicación en red entre los mismos (Park, *et al.*, 2012).

Los sistemas ciberfísicos son la siguiente generación de sistemas inteligentes, realizan medición, computo, control distribuido sobre redes de comunicación alámbricas o inalámbricas, optimización y ejecutan algoritmos del alto nivel de toma de decisiones. Han surgido como un

importante paradigma de investigación en donde confluyen el control, las comunicaciones y la computación.

Las aplicaciones de los sistemas ciberfísicos abarcan un amplio margen por ejemplo las industrias de la aeronáutica, la transportación, la automatización, la medicina, la manufactura, entre otras (Baheti y Gill, 2011). Dada las numerosas aplicaciones, el incremento de la complejidad en los requerimientos de control en los sistemas ciberfísicos y los grandes avances tecnológicos ha sido también necesario el surgimiento de tecnologías de control capaces de interactuar con estas nuevas y complejas dinámicas.

Este trabajo se presentan los principales conceptos acerca de los sistemas ciberfísicos y las principales técnicas utilizadas en el control de los mismos y ejemplos de sus aplicaciones.

La sección dos aborda sobre las generalidades de los SCF, en la tres se discute acerca de cuatro de las principales estrategias de control y en la sección cuatro se presentan las conclusiones.

2. Generalidades de los SCF.

Aunque sea hace difícil realizar una definición exacta de los sistemas ciberfísicos en general se distinguen, a diferencia de los sistemas embebidos, por conferir una mayor importancia a la interacción entre el proceso físico y los sistemas computacionales. No basta simplemente con dominar las características del medio físico y conocer los elementos del sistema computacional sino se debe comprender la dinámica que se genera de la intercepción de ambos.

Han surgido con la expectativa de superar a sus predecesores logrando una mayor eficiencia, seguridad, escalabilidad, sostenibilidad, adaptabilidad y robustez lo que propiciaría la creación de sistemas con respuestas más rápidas, precisa, confiables y eficientes. Entre las ventajas que nos pueden brindar podemos encontrar: la creación de sistema de transporte que debido a su rapidez de respuesta pueden posibilitar evitar numerosos accidentes de tráfico, redes energéticas con mayor eficiencia, robots que puedan realizar cirugías con mayor precisión, líneas de manufactura que darían como resultados productos de mayor calidad y una producción con mayor eficiencia.

Los SCF son esencialmente heterogéneos no solo en término de sus componentes sino también en términos de requerimientos de diseño. Además de sus propiedades funcionales, los SCF están sujetos a un amplio rango de requerimientos físicos tales como dinámica, alimentación, tamaño físico, tolerancia a fallos y en adición a requerimientos de sistema tales como seguridad (Antsaklis, *et al.*, 2013).

Los principales retos en la investigación se encuentran en la creación de métodos y herramientas capaces de proponer una mayor sinergia entre el mundo físico y el cibernético abriendo paso a nuevos campos para la investigación (Frazzon, *et al.*, 2013) y retos tecnológicos tales como abstracción de sistemas en tiempo real, modelación y control de sistemas híbridos, control sobre redes, redes de sensores y actuadores, simulación, verificación y validación.

Las claves de desarrollo de estos sistemas se sustentan en las numerosas aplicaciones que poseen en los distintos campos de la ingeniería moderna, por lo que han sido llamados a cambiar el futuro de la manera que en las personas interactúan con el ambiente.

3. Principales Estrategias de control.

Cada día en el mundo se hace mayor el uso de los SCF sin embargo las técnicas de control utilizadas para estos permanecen aún en desarrollo. Entre las principales metodologías más utilizadas en el diseño de los SCF encontramos el control en red, el control basado en eventos, el control distribuido y el control basado en pasividad.

3.1. Control en red.

Los sistemas de control en red (SCR) son sistemas de control en los cuales se tiene en cuenta la dinámica de la red en la realimentación. Se caracterizan por compartir una red de comunicación entre sensores actuadores y controladores, propiciando la transmisión de información entre los dispositivos para lograr compartir los recursos entre los elementos de la red y coordinar así operaciones en diferentes lugares de una misma región (Zhou, *et al.*, 2013). Posee un canal de comunicación el cual consta de un o más lazos de control equipados con procesamiento de señales, optimización, operaciones de control, entre otras funciones. Son diseñados atendiendo a los requerimientos del sistema físico y no al desempeño o la estabilidad de la red. En la figura 1 se puede apreciar la estructura de un general de un SCR.

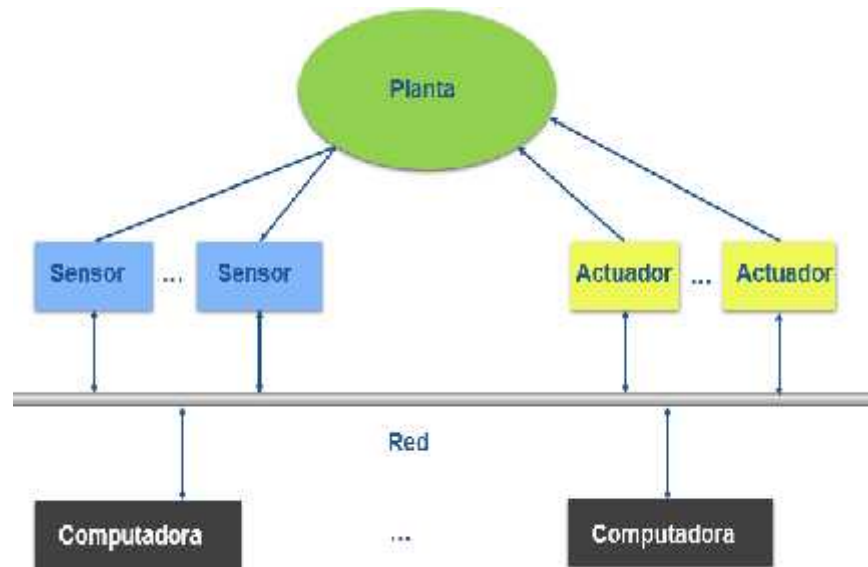


Figura 1. Comportamiento de las componentes de la fuerza de corte.

Los SCR eliminan el cableado innecesario reduciendo la complejidad y el costo tanto de diseño como de implementación de los sistemas. Puede también ser fácilmente modificados a través de la adición de cualquier elemento necesario (tanto controladores, sensores, como actuadores) con relativo bajo costo y sin muchos cambios en su estructura.

Unos de los principales desafíos en el diseño de SCR son la pérdida de datos y las demoras en la transmisión en la recepción desde los sensores a los controladores y de los controladores a los actuadores, por lo que se hace necesario el diseño un sistema que soporte la pérdida de paquetes, que sea capaz de realizar la decodificación parcial de los mismos, así como tolerar las demoras. Una alternativa para el chequeo de las pérdidas de información y las demoras en las comunicaciones es la utilización de redes inalámbricas.

(Kottenstette, *et al.*, 2013) presentan el diseño de un SCR, que puede tolerar la pérdida de paquetes y las demoras en la red, basado en la utilización de un controlador pasivo. (Araujo, *et al.*, 2014) diseñan la arquitectura de un sistema de control inalámbrico para la implementación practica de un SCR el cual garantice la estabilidad soportando demoras en la comunicación y la pérdida de paquetes y además de garantizar un mínimo consumo de energía y uso adecuado del ancho de banda de la red para su aplicación en sistemas de control industriales donde lo sensores se encuentran en lugares de difícil acceso para el cableado.

El control en red es una arquitectura hoy en día muy difundida que presenta grandes beneficios en la implementación de sistemas ciberfísicos de ahí la importancia que con lleva el estudio de la misma para su correcta implementación.

3.2 Control basado en eventos.

El control basado en eventos es un medio para la reducción de los tiempos en la utilización de los recursos de cómputo y la comunicación entre sensores, controladores y actuadores; propiciando que se produzca el intercambio de información entre estos componentes solo con la ocurrencia de eventos que propicien que sean excedidos los límites de error en el control. El instante de medición no se determina por un muestreo periódico sino mediante un generador de eventos el cual adapta el flujo de información en la realimentación al comportamiento en lazo cerrado del sistema. La actividad del controlador se ve reducida solo a intervalos de tiempo en los cuales es necesario su actuación para mantener los parámetros deseados del sistema. En la figura 2 se muestra la estructura de un sistema de control basado en eventos.

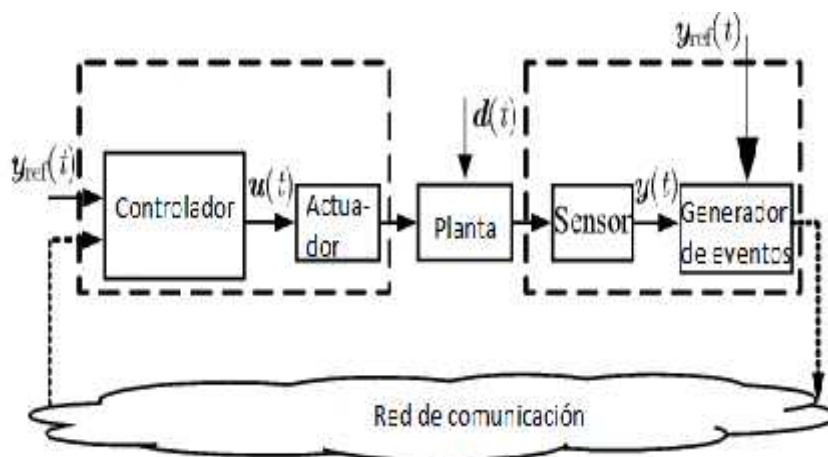


Figura 2. Comportamiento de las componentes de la fuerza de corte.

La reducción del intercambio de información permite aumentar la vida útil de la batería de los sensores y actuadores inalámbricos, reducir la carga computacional de los dispositivos, y disminuir el ancho de banda y la carga de la red.

Una de las principales aplicaciones del control basado en eventos se puede ver en las redes inalámbricas de sensores (WSN), esta consiste de una colección de sensores y actuadores conectados a través de un medio inalámbrico, debido a las limitaciones de ancho de banda que posee y además todos los nodos que la conforman utilizan baterías.

se ve la aplicación a las WSN del control basado en eventos, diseñando varios algoritmos para la comunicación asincrónica de un SCR que permitan la reducción del consumo de energía y con ello el aumento de la vida útil de la batería de los sensores y actuadores del sistema además de disminuir también la carga de la red.

En la comunicación basada en eventos es el sensor quien decide cuándo es el tiempo de enviar nuevas mediciones al controlador. Esta implementación es muy robusta frente a las perturbaciones, así como permite una continua supervisión del estado de la planta y también reduce la cantidad de información que debe transmitir cada nodo, aunque trae como desventajas que para la tarea de supervisión continua sea necesario la utilización de un hardware dedicado además de no permitir poder crear una planificación dinámica pues no se conocen con anterioridad los tiempos de actualización.

Para evaluar el desempeño de los algoritmos propuestos se construye una red inalámbrica con dos lazos de control y varios nodos independientes para monitorizar y transmitir mensajes adicionales. Los lazos de control son la regulación de un sistema de dos tanques, en cada tanque se colocan sensores y actuadores inalámbricos. Los resultados experimentales demuestran una buena respuesta temporal, un eficiente rechazo a las perturbaciones, así como un buen comportamiento de los parámetros de la red.

Aunque el control basado en eventos no es una metodología nueva ha tomado gran auge en la actualidad debido a sus aplicaciones en sistemas de control asincrónicos, mediciones y control en tiempo real, pese a esto todavía quedan temas a desarrollar como las posibles topologías a utilizar, como definir los eventos, que información transmitir, entre otras muchas.

3.3. Control distribuido.

Los sistemas de control distribuido (SCD) son sistemas de control multiestación en los cuales sus elementos se encuentran distribuidos a lo largo de todo el sistema con cada componente o subsistema controlado por uno o más controladores. Todo el sistema de los controladores está conectado mediante redes de comunicación y de monitorización.

Las principales características los SCD se encuentran en la conexión y el intercambio de información entre cada subsistema los que propicia una buena cohesión y la distribución de las tareas con el fin de lograr los objetivos globales. Comparados con los sistemas centralizados los SCD son considerados la tercera generación de sistemas de procesamiento de control y son ampliamente utilizados en el ámbito del control industrial.

Para el diseño de SCD se debe determinar una estructura de control la cual asigne entradas del sistema a un conjunto de controladores que se encarguen solamente de observar salidas locales.

En general el control descentralizado evita los problemas que pueden causar tanto el procesamiento como el almacenamiento de grandes volúmenes de información. Otra de las ventajas que proporciona los SCD es la tolerancia a fallos debido a la posibilidad de la redundancia de controladores y conexiones, también como aspecto importante tenemos la posibilidad que tiene estos sistemas de continuar funcionando cuando se han desconectados o agregado uno o más nodos lo que se logra a través de la utilización de algoritmos de autoconfiguración. En la figura 3 podemos ver la estructura típica de un SCD.

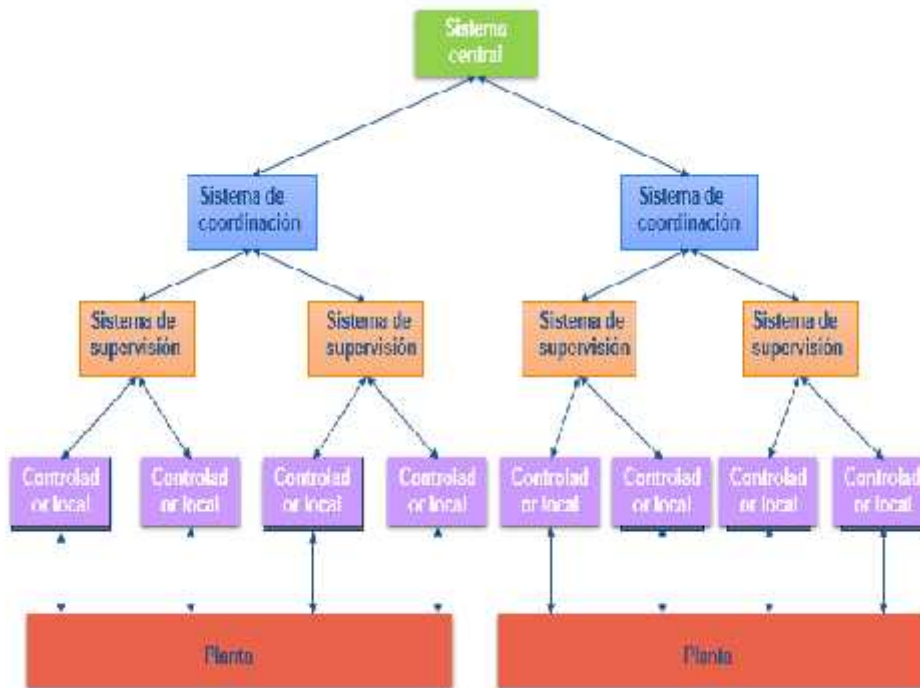


Figura 3. Comportamiento de las componentes de la fuerza de corte.

(Liu, *et al.*, 2012) realizan el diseño de un control distribuido con un modelo de control predictivo iterativo capaz de asimilar demoras asincrónicas en la realimentación, los controladores son diseñados a través del método de Lyapunov, (Farina y Scattolini, 2012) proponen un control predictivo distribuido para sistemas discretos, con un algoritmo no cooperativo, en el cual en cada período de muestreo cada agente envía información sobre su trayectoria de referencia a sus vecinos garantizando que su trayectoria actual quede entrelazada.

Los sistemas de control distribuido, muy superiores a los sistemas de control convencionales, permiten la comunicación a grandes distancias sin que la señal sea dañada por el ruido o algún otro elemento por lo que son de vital importancia en ambientes donde sean críticas las distancias entre los distintos sistemas de control de la fábrica.

3.4 Control basado en pasividad.

El control basado en pasividad (CPB) es una herramienta que ha demostrado grandes potencialidades en el diseño de sistemas ciberfísicos debido a las ventajas que ofrece en el diseño de sistemas a larga escala.

La pasividad es una herramienta clásica que permite el uso de enfoques basados en energías en sistemas dinámicos. Implica también otras propiedades tales como la estabilidad lo que le permite ser utilizada también en el desarrollo de sistemas complejos proporcionándoles un comportamiento estable además de robustez (Antsaklis, *et al.*, 2013).

Los CPB son capaces de solucionar los problemas que presentan las comunicaciones en red tales como demoras, pérdidas de información o distorsión de la misma. Para contrarrestar el efecto de las demoras en la red cuando se interconectan elementos pasivos se utiliza la transformación de la variable de la onda. Esta transformación se basa en un análisis energético de la red. Los demás efectos no deseados de la red son contrarrestados con enfoques energéticos propiciados por las características propias de los sistemas pasivos.

(Kottenstette, *et al.*, 2013) realizan el diseño de un controlador pasivo para un sistema de control en red. Los efectos de las demoras de la red y las pérdidas de paquetes son contrarrestados por las características del sistema pasivo propuesto además del uso de la transformación de la variable de onda. Para la validación se realiza la simulación del control de un brazo robótico, mostrado en la figura 4, y una red inalámbrica, cuya estructura es mostrada en la figura 5, compuesta por seis nodos de los cuales uno corresponde al controlador pasivo, otro al brazo robótico y los cuatro restantes se encarga de enviar perturbaciones a la red. Los resultados de la simulación demuestran la estabilidad del sistema, así como su robustez dada por el rechazo a las perturbaciones demostrando así las ventajas que brinda el control basado en pasividad para el diseño de controles en red que utilizan redes inalámbricas.

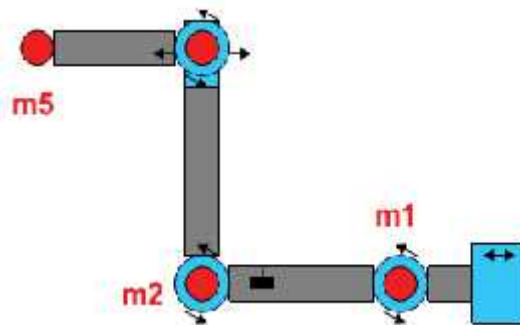


Figura 4. Brazo robótico utilizado en la simulación del controlador pasivo.

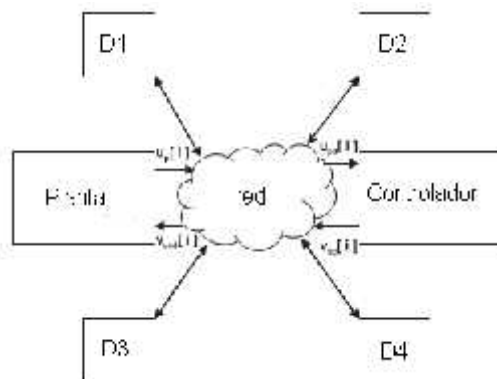


Figura 5. Estructura de la red del SCR basado en un controlador pasivo.

Los índices pasivos son una alternativa para los métodos de caracterización de la disipación de energía en los sistemas puesto que permite diseñar realimentaciones estables a sistemas no pasivos. La determinación de los índices pasivos permite que muchos más sistemas puedan ser analizados utilizando resultados similares al teorema de pasividad. Se puede ver la utilización de los mismos para el control de sistemas conmutados o lineales en (McCourt y Antsaklis, 2010), así como su aplicación a sistemas lineales y no lineales multiagentes en (Wu y Antsaklis, 2011) donde para los sistemas lineales los índices pasivos son explícitamente caracterizados mientras que para los no lineales se utiliza un conjunto de matrices de desigualdades.

4. Conclusiones.

En este artículo se presentan los conceptos básicos a cerca de los SCF, luego se exponen las características de las principales metodologías de control para su implementación como son el control en red, el control basado en eventos, el control distribuido y el control basado en pasividad citándose algunos ejemplos que se pueden encontrar en la bibliografía para su implementación en la industria moderna evidenciándose que aunque se aboga por un amplio uso de los SCF las metodologías de control aún están en desarrollo y precisan de un mayor estudio para lograr los resultados que se desean además de que en todos los sistemas de ingeniería moderna los SCF poseen una amplia aplicación y que sin duda son el futuro del control en los mismos para poder satisfacer las necesidades que el mundo demandara en futuro.

Referencias.

- Antsaklis, P.J.; Goodwine, B.; Gupta, V.; McCourt, M.J.; Wang, Y.; Wu, P.; Xia, M.; Yu, H. ; Zhu, F., 2013. "Control of cyberphysical systems using passivity and dissipativity based methods". *European Journal of Control*, 19 (5), pp. 379-388, DOI: 10.1016/j.ejcon.2013.05.018.
- Araujo, J.; Mazo, M.; Anta, A.; Tabuada, P. ; Johansson, K.H., 2014. "System architectures, protocols and algorithms for aperiodic wireless control systems". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10 (1), pp. 175-184, DOI: 10.1109/TII.2013.2262281.
- Baheti, R. ; Gill, H., 2011. "Cyber-physical Systems". En: Samad, T. ; Annaswamy, A.M. (eds.), *The Impact of Control Technology*. available at www.ieeecss.org: IEEE Control Systems Society, pp. 175-183.
- Farina, M. ; Scattolini, R., 2012. "A non-cooperative algorithm with neighbor-to-neighbor communication for linear systems". *Automatica*, pp. 1088–1096
- Frazzon, E.M.; Hartmann, J.; Makuschewitz, T. ; Scholz-Reiter, B., 2013. "Towards socio-cyber-physical systems in production networks". *Setubal*, vol. 7, pp. 49-54.
- Kottenstette, N.; Hall, J.F.; Koutsoukos, X.; Sztipanovits, J. ; Antsaklis, P., 2013. "Design of networked control systems using passivity". *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 21 (3), pp. 649-665.
- Liu, J.; Kou, T.; Chen, Q. ; Sherali, H., 2012. "On Wireless Network Infrastructure Optimization for Cyber-Physical Systems in Future Smart Buildings". En: Wang, X.; Zheng, R.; Jing, T. ; Xing, K. (eds.), *Wireless Algorithms, Systems, and Applications*. Springer Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-31868-9, vol. 7405, pp. 607-618.

McCourt, M. ; Antsaklis, J., 2010 of Conference. "Control Design for Switched Systems Using Passivity Indices". En: (ed.)^(eds.), *American Control Conference*. Marriott Waterfront, Baltimore, MD, USA, vol., pp.

Park, K.J.; Zheng, R. ; Liu, X., 2012. "Cyber-physical systems: Milestones and research challenges". *Computer Communications*, 36 (1), pp. 1-7, DOI: 10.1016/j.comcom.2012.09.006.

Wu, P. ; Antsaklis, P.J., 2011 of Conference. "Passivity Indices for Symmetrically Interconnected Distributed Systems.". En: (ed.)^(eds.), *19th Mediterranean Conference on Control and Automation*. vol., pp.

Zhou, K.; Ye, C.; Wan, J.; Liu, B. ; Liang, L., 2013. "Advanced control technologies in cyber-physical system". Hangzhou, Zhejiang, vol. 2, pp. 569-573.