Revista Iberoamericana de
Automática e Informática Industrial

Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 14 (2017) 256–267

www.elsevier.es/RIAI

Observadores Distribuidos Garantistas para Sistemas en Red

Ramón A. García[a,*], Francisco R. Rubio[a], Luis Orihuela[b], Pablo Millán[b], Manuel G. Ortega[a]

[a]Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla, Sevilla, España
[b]Departamento de Ingeniería, Universidad Loyola Andalucía, Sevilla, España

Resumen

En este artículo se propone un observador distribuido garantista para sistemas en red, considerando de forma explícita el problema de los retardos variables en las comunicaciones. Se asume que la información intercambiada entre agentes llega siempre a su destino, si bien las comunicaciones están sujetas a retardos variables, cuyo valor máximo se supone conocido. Cada observador trabaja con información parcial, y necesita comunicarse con observadores vecinos para llevar a cabo una estimación del estado completo del sistema. Para representar a los conjuntos garantistas, cuya función es acotar en tiempo real la región en la que se encuentra el estado del sistema, se ha optado por la utilización de zonotopos. Esto permite integrar de forma sencilla la información recibida por cada agente. Finalmente se presentan resultados de simulación para validar el algoritmo propuesto.

Palabras Clave:
Estimación Distribuida, Observadores de Estado, Sistemas con Retardos, Sistemas en red, Zonotopos.

1. Introducción

En control automático existen muchas técnicas que se basan en la descripción interna del sistema a controlar, es decir, en el conocimiento del estado del sistema. Es bien conocido que en la práctica en la mayoría de los casos no se dispone de dicha información, por lo que es necesario recurrir a estimadores de estados de la planta o proceso. Por otro lado en plantas de gran tamaño, que cuentan con un gran número de variables de estado, la información está típicamente distribuida.

En ese sentido, el término estimación distribuida hace referencia a dos conceptos. El primero, la estimación del estado de la planta no se lleva a cabo por un único observador, sino que se realiza por un conjunto de observadores denominados agentes. El segundo es que, además, dichos agentes colaboran para poder cumplir su objetivo, transmitiendo de forma periódica información a través de una red de comunicación, (Rubio et al., 2014). También hay enfoques que consideran comunicaciones asíncronas, como en (Weimer et al., 2012), (Guinaldo et al., 2016) y (García et al., 2015), donde los agentes determinan en función a ciertos eventos si comunican su información o no.

Es posible encontrar en la literatura un gran número de publicaciones sobre este tema. Por ejemplo, existen multitud de trabajos basados en versiones distribuidas del Filtro de Kalman (Roshany-Yamchi et al., 2013), (Feng et al., 2013), (Mahmoud and Khalid, 2013), incluso en ocasiones combinado con otras técnicas, (He et al., 2016), (Wu et al., 2016). Otros enfoques posibles son los trabajos basados en adaptaciones del observador de Luenberger donde se usan técnicas de consenso (Millán et al., 2012b), teoría H_∞ (Orihuela et al., 2013), (Zhang et al., 2016), o con horizonte deslizante (Farina et al., 2010), (Li et al., 2014), entre otros.

Por su parte el término garantista indica que se utilizará un enfoque que, basado en el conocimiento de los límites que pueden alcanzar las distintas perturbaciones, incertidumbres y ruidos que actúan sobre el sistema, resulta en una clase de estimadores que obtienen dinámicamente conjuntos que incluyen en todo instante el estado actual del sistema. Las técnicas garantistas o de pertenencia a conjunto no usan asunciones probabilísticas para las perturbaciones o ruidos, sino que se basan en que dichas señales pueden tomar cualquier valor dentro de un conjunto acotado y conocido. Esos conjuntos pueden tener diferentes representaciones: intervalos o cajas (Bars et al., 2012), elipses o elipsoides (Zhou et al., 2013), politopos (García et al., 2015), etc. Dentro del último tipo se encuentran los zonotopos, que son politopos convexos y simétricos respecto a su centro.

Los sistemas en red, ya sean sistemas multi-agentes o plantas de grandes dimensiones, incorporan una red por la que se realiza una comunicación de los datos en lugar de un procesamiento centralizado de los mismos. Aplicaciones típicas pue-

*Autor en correspondencia.
Correos electrónicos: `ramongr@us.es` (Ramón A. García), `rubio@us.es` (Francisco R. Rubio), `dorihuela@uloyola.es` (Luis Orihuela), `pmillan@uloyola.es` (Pablo Millán), `mortega@us.es` (Manuel G. Ortega)

http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2017.05.003
Disponible en www.sciencedirect.com

den ser redes de sensores (Iyengar and Brooks, 2016), flota de vehículos o robots (Briñón Arranz et al., 2009) o monitoreo de procesos (Millán et al., 2012a), entre otros.

En este tipo de sistemas, los retardos son inevitables y tienen un impacto importante en los algoritmos de control y estimación, pudiendo llegar a la desestabilización de los mismos, (Fridman, 2014). En (Richard, 2003) se hace una profunda revisión sobre los avances y los problemas abiertos en los sistemas con retardos.

En este trabajo se presenta un método garantista de estimación distribuida para sistemas en red. Debido a la necesidad de intercambiar información en el proceso de comunicación se consideran los retardos causados por la red de comunicaciones. Se propone un algoritmo que asegura que los estados de la planta siempre están contenidos en los zonotopos obtenidos por cada agente a pesar de la presencia de los retardos en las comunicaciones.

El algoritmo desarrollado, que se implementa en cada agente, es capaz de integrar la información local con aquella transmitida por agentes (observadores) vecinos, calculando continuamente el conjunto factible que acota la zona en la que se encuentra el estado de la planta. Dicho conjunto factible vendrá delimitado por zonotopos.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera. La Sección 2 presenta la notación, algunos conceptos y definiciones sobre zonotopos y cálculo matricial. El problema bajo consideración, así como los objetivos perseguidos son detallados en la Sección 3. El observador distribuido sin retados se presenta en la Sección 4. El observador distribuido propuesto con retardos se presenta en la Sección 5. Simulaciones ilustrativas sobre el rendimiento del algoritmo se muestran en la Sección 6. Finalmente, las conclusiones se resumen en la Sección 7.

2. Notación y preliminares

Sea $R \in \mathbb{R}^{n\times p}$. Entonces, $\|R\|_F = \sqrt{tr(R^T R)}$ es la norma Frobenius de R. La norma Frobenius de un vector $x \in \mathbb{R}^n$ es igual a la norma Euclidea definida como $\|x\| = \sqrt{x^T x}$.

Una caja, o *box* en inglés, es un vector compuesto por intervalos que acotan una región. Por ejemplo en una representación en $\mathbb{R}^2$ una caja representa un rectángulo. La anchura de un intervalo $[a,\ b]$ se denota como $b - a$.

Un zonotopo, representado por la letra caligráfica $\mathcal{X}$, es definido por su centro $c \in \mathbb{R}^n$ y su matriz de vectores generadores $H \in \mathbb{R}^{n\times b}$:

$$\mathcal{X} = \langle c, H\rangle = \left\{ c + \sum_{i=1}^{b} \varsigma_i h_i : |\varsigma_i| \le 1 \right\},$$

siendo $h_i \in \mathbb{R}^n$ la i-ésima columna de H. Nótese que si la matriz H fuese diagonal, lo que se tendría sería una caja, ya que tendría un conjunto de intervalos, cada elemento del vector denotaría el centro y el elemento de H la mitad de la anchura. Cualquier permutación de las columnas de H deja invariante al zonotopo. El orden del zonotopo viene dado por el número de vectores generadores, esto es, b.

El F-radio del zonotopo $\mathcal{X} = \langle c, H\rangle$ es la norma de Frobenius de H, es decir, $\|\mathcal{X}\|_F = \|H\|_F$. La covariación de un zonotopo $\mathcal{X} = \langle c, H\rangle$ es $P_{\mathcal{X}} = HH^T$.

Sean $\mathcal{X} = \langle c_x, H_x\rangle$ e $\mathcal{Y} = \langle c_y, H_y\rangle$ dos zonotopos y R una matriz de dimensiones apropiadas, se definen las siguientes operaciones:

$$R\mathcal{X} = \langle Rc_x, RH_x\rangle \quad (1)$$

$$\mathcal{X} \oplus \mathcal{Y} = \langle c_x + c_y, [H_x\ H_y]\rangle \quad (2)$$

Considérense los vectores $x \in \mathcal{X}$, $w \in \mathcal{W}$ y la matriz A. Entonces, si se define el vector $y \triangleq Ax + w$, según las operaciones vistas se tiene que $y \in A\mathcal{X} \oplus \mathcal{W}$.

El operador $red_q(\mathcal{X})$ o $red_q(\langle c, H\rangle)$ es una reducción de orden del zonotopo $\mathcal{X}$, de tal manera que $\mathcal{X} \subseteq red_q(\mathcal{X})$. El orden de $red_q(\mathcal{X})$ es q, por tanto lo que se reduce es el orden de la matriz generadora, es decir, el número de vectores necesarios para describir el zonotopo y no el tamaño del zonotopo. Esta operación está definida como en (Combastel, 2015), primero consiste en ordenar las columnas de H en orden decreciente según la norma del vector,

$$H = \begin{bmatrix} h_1 & \cdots & h_j & \cdots & h_b \end{bmatrix},\ \|h_j\|^2 \ge \|h_{j+1}\|^2,$$

y encerrando el conjunto $H_<$ generado por las $b - q + n$ menores columnas en una caja:

$$red_q(\langle c, H\rangle) = \begin{cases} \langle c, H\rangle, & b \le q, \\ \langle c, [H_>\ \ box(H_<)]\rangle, & b > q, \end{cases}$$

donde

$$H_> = \begin{bmatrix} h_1 & \cdots & h_{q-n} \end{bmatrix},$$
$$H_< = \begin{bmatrix} h_{q-n+1} & \cdots & h_b \end{bmatrix},$$

y $box(H) \in \mathbb{R}^{n\times n}$ se calcula como

$$box(H) = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{b} |h_{1j}| & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sum_{j=1}^{b} |h_{nj}| \end{bmatrix}.$$

La operación de reducir el orden de un zonotopo se hace necesaria para poder abordar el problema desde un punto de vista computacional. Como puede observarse en (2), la suma de dos zonotopos tiene como resultado otro, cuya matriz de vectores generadores concatena aquellas de los zonotopos sumados. Con la operación de reducción se persigue hacer posible la suma sucesiva de estos conjuntos, evitando una explosión en el número de vectores generadores mediante el compromiso entre la precisión en la descripción de los zonotopos y la cantidad de información necesaria para describirlos.

El operador $Vol(\mathcal{X})$ corresponde al volumen del zonotopo $\mathcal{X}$. En este trabajo se calculará con una aproximación basada en la descomposición en valores singulares (SVD) de la matriz generadora del zonotopo (Caro, 2004). Para un cálculo más exacto del volumen consultar (Le et al., 2013). La descomposición SVD de $H \in \mathbb{R}^{n\times b}$, viene dada por:

$$H = USV'$$