ScienceDirect
Disponible en www.sciencedirect.com
Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 13 (2016) 238–246
www.elsevier.es/RIAI

Control de Fuerza de Robots Manipuladores Basado en Observadores Proporcionales Integrales Generalizados

Alejandro Gutiérrez–Giles[a,*], Marco A. Arteaga–Pérez[a], Hebertt Sira–Ramírez[b]

[a] *Departamento de Control y Robótica. División de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Apdo. Postal 70–256, México, D. F., 04510, México.*
[b] *Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N. Avenida IPN, No. 2508. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Sección de Mecatrónica. Colonia San Pedro Zacatenco Apdo. Postal 14740, 07300 México, D.F., México.*

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño de un controlador lineal robusto para el seguimiento simultáneo de posición y fuerza de robots manipuladores completamente actuados. Las no linealidades aditivas, posiblemente dependientes del estado, se modelan como una perturbación variante en el tiempo absolutamente acotada. Los observadores Proporcionales Integrales Generalizados (GPI, por sus siglas en inglés) son capaces de estimar esta perturbación desconocida y un cierto número de sus derivadas temporales de forma aproximada, aunque arbitrariamente cercana. Esta estimación se utiliza en el diseño del controlador para cancelar los efectos de los términos desconocidos. Hasta donde los autores saben, los observadores GPI no se han utilizado para el control de fuerza de robots manipuladores. Se presenta un análisis comparativo experimental para mostrar el buen desempeño del esquema propuesto.

Palabras Clave:
Control de fuerza, Control de posición, manipuladores robóticos, observadores de estados, control robusto.

1. Introducción

La estimación de perturbaciones externas, no estructuradas, con el objetivo de cancelar exacta o aproximadamente sus efectos mediante las entradas de control, ha sido un tema ampliamente investigado en la literatura. Uno de los primeros trabajos en este sentido es el *Control por Acomodación de Perturbaciones* (DAC, por sus siglas en inglés), realizado en la década de 1970 (Johnson, 1971), mismo que ha ido evolucionando tanto teórica como prácticamente. Una técnica relacionada con el DAC es el *Control por Rechazo Activo de Perturbaciones* (ADRC, por sus siglas en inglés) (Han, 2009). Aunque la idea de estimar las perturbaciones utilizando un observador y cancelarlas mediante la entrada de control es similar, a diferencia del DAC, el énfasis en el ADRC recae principalmente en la estimación *no lineal* de perturbaciones. Una idea cercanamente relacionada constituye el núcleo del llamado *Control PID Inteligente* (IPIDC, por sus siglas en inglés) (Fliess y Join, 2006). Los desarrollos principales del IPIDC se basan en el método algebraico, lo que implica que está restringido a modelos *fenomenológicos* de primero o segundo orden. Los observadores de perturbaciones (DOb, por sus siglas en inglés) (Ohnishi et al., 1996) también realizan un control robusto basado en la estimación y cancelación en línea de perturbaciones.

Otro método que aborda el mismo problema es el control basado en los observadores *Proporcionales Integrales Generalizados* (GPI, por sus siglas en inglés), que son la contraparte de los controladores GPI desarrollados en Fliess et al. (2002). Los observadores GPI son observadores lineales de alta ganancia que incluyen un polinomio en el tiempo como modelo interno de los efectos conjuntos tanto de las perturbaciones dependientes del estado como de las perturbaciones externas. Una estimación de este polinomio es entregada al controlador para su cancelación en tiempo real, al mismo tiempo que se estiman las variables de fase relacionadas con la salida. Los observadores GPI se basan en la linealización exacta del modelo en el espacio de estados, a diferencia de los DOb que están basados en una linealización aproximada con un modelo dado en el dominio de la frecuencia. Por su naturaleza, el uso de observadores GPI para el control de robots manipuladores es muy atractivo, debido a que estos sistemas son altamente no lineales y muchas de las técnicas más importantes para su control se basan el un modelo dinámico exacto, que resulta difícil de obtener.

*Autor en correspondencia.
Correos electrónicos: alejandrogilesg@comunidad.unam.mx (Alejandro Gutiérrez–Giles), marteagp@unam.mx (Marco A. Arteaga–Pérez), hsira@cinvestav.mx (Hebertt Sira–Ramírez)

http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2016.01.004

Aunado a esto, cuando un robot interactúa con su entorno es necesario controlar no sólo la posición sino la fuerza ejercida sobre dicho entorno. En la literatura pueden encontrarse diversas estrategias para lograr este objetivo (véase por ejemplo Siciliano y Villani (1999); Yoshikawa (2000)). En general, el control de robots manipuladores en interacción con un entorno puede dividirse en dos categorías: control directo y control indirecto. En el primer caso la fuerza de contacto puede ser llevada a un valor deseado mediante un lazo de control de fuerza explícito y en el segundo caso la fuerza ejercida sobre el entorno es generada mediante el control de movimiento del manipulador. A esta última categoría pertenecen los controladores por impedancia y por *compliance* (Siciliano et al., 2010), mientras que a la primera categoría pertenecen los controladores de fuerza híbridos y paralelos (Siciliano y Villani, 1999). La idea de utilizar un estimador de perturbaciones para robustecer un controlador de fuerza ha sido utilizada en Katsura et al. (2007) para un esquema de control por impedancia, cuyo análisis de estabilidad y robustez es ampliado en Sariyildiz y Ohnishi (2014). Con respecto al control directo de fuerza, un ejemplo interesante se presenta en Parra-Vega et al. (2001), donde se desarrollan esquemas híbridos utilizando la propiedad de descomposición ortogonal del espacio cartesiano. La descomposición ortogonal permite desacoplar los controles de fuerza y de movimiento en dos espacios ortogonales independientes entre sí, facilitando el diseño de los controladores y el análisis de estabilidad (Arimoto et al., 1993).

Por otra parte, debe notarse que la mayoría de los controladores de fuerza y posición utilizan mediciones de velocidad articular, o en su defecto un estimador numérico a partir de la posición. En de Queiroz et al. (1996) y en Martínez-Rosas et al. (2006) se presentan algunas soluciones a este problema. Además, la mayoría de las estrategias de control propuestas considera que el modelo dinámico del sistema es completamente conocido. Para lidiar con el caso de incertidumbre en los parámetros del modelo, o incluso un completo desconocimiento del mismo, se han propuesto diferentes soluciones (Arteaga-Pérez y Rivera-Dueñas, 2007; Jung y Hsia, 2010; Cheah et al., 2010).

En este trabajo se utiliza, dentro del contexto de control de fuerza para robots manipuladores, una estimación aproximada, aunque cercana, de las perturbaciones tanto externas como dependientes del estado con el fin de obtener un control robusto tanto en seguimiento de fuerza como de posición, mediante los observadores GPI. El controlador presentado tiene la ventaja de no requerir el conocimiento exacto de todo el modelo (solo un aproximado de la matriz de inercia), además de que tampoco requiere medición de velocidad ni cálculo de la cinemática inversa. Hasta donde los autores saben, este enfoque nunca ha sido utilizado para el seguimiento de fuerza y posición por retroalimentación de salida para robots manipuladores.

El artículo está organizado de la siguiente forma: en la Sección 2 se presenta una introducción al control lineal de sistemas mecánicos no lineales completamente actuados, concretamente el caso de robots manipuladores rígidos. La Sección 3 presenta la contribución principal de este trabajo que es la adaptación del algoritmo presentado en la Sección 2 para el control simultáneo de fuerza y de posición de robots rígidos. En la Sección 4 se muestran experimentos de laboratorio, los cuales sirven para validar la efectividad del método propuesto, además de incluirse un esquema adaptable y un controlador PID para propósitos de comparación. En la Sección 5 se presentan las conclusiones y algunas sugerencias de trabajo futuro en esta área.

2. Control basado en observadores GPI

Considérese un robot manipulador rígido de n grados de libertad. Su dinámica está dada por (Siciliano et al., 2010)

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{\tau}\,, \tag{1}$$

donde $\boldsymbol{q} \in \Re^n$ es el vector que contiene las coordenadas generalizadas, $\boldsymbol{H}(\boldsymbol{q}) \in \Re^{n\times n}$ es la matriz de inercia, positiva definida, $\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} \in \Re^n$ es el vector de fuerzas centrífugas y de Coriolis, $\boldsymbol{D} \in \Re^{n\times n}$ es la matriz diagonal positiva semidefinida que contiene los coeficientes de fricción viscosa, $\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) \in \Re^n$ es el vector de pares debidos a la gravedad y $\boldsymbol{\tau} \in \Re^n$ es el vector de los pares que actúan sobre las articulaciones.

Propiedad 2.1. Con la adecuada definición de los parámetros del robot, el modelo (1) puede ser escrito como

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{Y}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}},\ddot{\boldsymbol{q}})\boldsymbol{\theta}\,, \tag{2}$$

donde $\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}},\ddot{\boldsymbol{q}}) \in \Re^{n\times p}$ es el *regresor* y $\boldsymbol{\theta} \in \Re^p$ es un vector (constante) de parámetros. △

El siguiente desarrollo está basado principalmente en Sira-Ramírez et al. (2010). Supóngase que sólo las coordenadas articulares $\boldsymbol{q}$ son medidas, mientras que el modelo dinámico del sistema es desconocido, con excepción de la matriz de inercia $\boldsymbol{H}(\boldsymbol{q})$ [1]. El objetivo de control principal es seguir lo más cercanamente posible el valor de referencia $\boldsymbol{q}_{\mathrm{r}}(t)$. Idealmente, el seguimiento exacto se alcanza sólo si se cumple

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{q}_{\mathrm{r}})\ddot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{r}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}_{\mathrm{r}},\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{r}})\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{r}} + \boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{r}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}_{\mathrm{r}}) = \boldsymbol{\tau}^*\,, \tag{3}$$

donde $\boldsymbol{\tau}^*(t)$ representa una ley de control nominal. Dado que el modelo del sistema es desconocido, esta ley de control no puede ser calculada *a priori* con precisión. Para abordar este problema, considérese el error de seguimiento $\boldsymbol{e} \triangleq \boldsymbol{q} - \boldsymbol{q}_{\mathrm{r}}$, cuya dinámica está dada por

$$\begin{aligned} \ddot{e} \;=\;& \boldsymbol{H}^{-1}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{H}^{-1}(\boldsymbol{q})\left[\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})\right] \\ &+ \boldsymbol{H}^{-1}(\boldsymbol{q}_{\mathrm{r}})\left[\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}_{\mathrm{r}},\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{r}})\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{r}} + \boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{r}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}_{\mathrm{r}})\right] \\ &- \boldsymbol{H}^{-1}(\boldsymbol{q}_{\mathrm{r}})\boldsymbol{\tau}^*(t)\,. \end{aligned} \tag{4}$$

Definiendo $z(t)$ como

$$\begin{aligned} z(t) \;=\;& -\boldsymbol{H}^{-1}(\boldsymbol{q})\left[\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})\right] \\ &+ \boldsymbol{H}^{-1}(\boldsymbol{q}_{\mathrm{r}})\left[\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}_{\mathrm{r}},\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{r}})\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{r}} + \boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{q}}_{\mathrm{r}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}_{\mathrm{r}})\right] \\ &- \boldsymbol{H}^{-1}(\boldsymbol{q}_{\mathrm{r}})\boldsymbol{\tau}^*(t)\,, \end{aligned} \tag{5}$$

[1] Es posible modificar el algoritmo GPI para hacer innecesario el conocimiento de la matriz de inercia, como se muestra en Arteaga-Pérez y Gutiérrez-Giles (2014)