

LIBROS Y MONOGRAFÍAS

En este número traemos a nuestra sección la recensión de un libro que acaba de salir al mercado. Se trata de la segunda edición de un texto clásico para la enseñanza de la robótica en español, escrito por los profesores Antonio Barrientos, Luís Felipe Peñín, Carlos Balaguer y Rafael Aracil. Esta nueva edición no sólo actualiza y amplía los contenidos respecto a la primera, que vio la luz hace más de diez años, sino que también incorpora nuevos ejercicios resueltos, muchos de ellos mediante el software de simulación Matlab. La recensión de este libro ha sido realizada por Rafael Sanz Domínguez, de la Universidad de Vigo.

En el apartado de novedades presentamos tres tesis doctorales recientes, dos de ellas presentadas en la Universidad de Valladolid y una en Universidad Politécnica de Valencia. La primera de ellas, realizada por Rachid Aref Ghraizi y titulada “Supervisión del comportamiento de los controladores industriales” aborda el tema de la supervisión automática de los controladores industriales, desarrollando herramientas para evaluar el comportamiento del controlador y realizar un mantenimiento sistemático. La segunda tesis, titulada “Sistemas Dinámicos con Retardos Temporales: Contribución al desarrollo de predictores robustos para el control de sistemas inestables” ha sido realizada por Pedro García Gil en la Universidad Politécnica de Valencia y en ella se presenta una nueva metodología que, de forma similar al Predictor de Smith, permite el desarrollo de compensadores de tiempo muerto (DTCs) para el control de sistemas estables o inestables de fase mínima o no mínima. Finalmente, la tesis “Model-Free Learning Control for Chemical Processes”, presentada por Syafiie en la Universidad de Valladolid, presenta algoritmos de control *Model-Free Learning Control*, propuestos para sistemas en los que no es factible obtener un modelo y usan procedimientos Aprendizaje por Refuerzo, lo que permite realizar el aprendizaje con una base teórica sólida, fundamentada en la teoría de los Problemas de Decisión de Markov (MDP), dando entonces una forma factible de solución de los problemas de Programación Dinámica resultantes. Los resúmenes han sido enviados por sus autores.

Animamos de nuevo a los lectores a enviar resúmenes de novedades, tanto de libros como de tesis doctorales recientes, y a solicitar recensiones de libros que consideren de interés para el área a través de la dirección de correo electrónico que figura a continuación.

Carlos Bordóns Alba
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática
Universidad de Sevilla
bordons@esi.us.es

RECENSIÓN

Fundamentos de Robótica. 2ª edición

Antonio Barrientos, Luís Felipe Peñín, Carlos Balaguer y Rafael Aracil

McGraw-Hill/Interamericana de España (2007). 512 páginas, ISBN: 8448156366

Acaba de salir la segunda edición de este libro. Después de diez años de la primera edición, los autores han querido actualizar y ampliar los contenidos de uno de los textos clásicos en español para la docencia en robótica industrial, volcando en el texto su dilatada experiencia docente, industrial e investigadora.

Respecto a la primera edición, aparte de la actualización y ampliación de contenidos, el texto incluye un nuevo y extenso capítulo sobre teleoperación. También incorpora nuevos ejercicios resueltos, muchos de ellos mediante el software de simulación Matlab. Estos ejercicios son muy interesantes desde la perspectiva docente para complementar los contenidos teóricos.

El texto sigue un índice bastante habitual en un curso básico de robótica. El capítulo 1 aborda la evolución histórica de los robots industriales y su clasificación, incorporando nuevos tipos de robots, tales como robots móviles, de servicio y domésticos.

El capítulo 2 describe la morfología del robot y sus componentes: estructura mecánica, transmisiones y reductoras, actuadores, sensores y elementos terminales. De todos ellos se hace básicamente una descripción funcional, sin entrar prácticamente en formulaciones matemáticas, lo cual es suficiente para comprender los principios de funcionamiento y sus características más relevantes. Aunque se ha ampliado algo el apartado de elementos terminales, en mi opinión, se podían describir muchos más tipos.

Los capítulos 3, 4 y 5 tratan el modelado matemático del manipulador necesario para estudiar posteriormente el control del robot en los capítulos 6 y 7. Así, el capítulo 3 introduce las diferentes herramientas matemáticas empleadas para especificar la posición en el espacio del extremo del brazo y de cualquier objeto del entorno. Se estudian principalmente las matrices de transformación homogénea y también los cuaternios. Respecto a la primera edición se han incluido ejercicios resueltos empleando Matlab, que constituyen una gran ayuda para afianzar los conocimientos del capítulo.

El capítulo 4 se dedica a las técnicas de modelado cinemático directo e inverso del manipulador. Para la descripción geométrica de la cadena cinemática se emplea fundamentalmente la técnica sistemática desarrollada por Denavit y Hatemberg. La resolución del modelo cinemático directo se aborda mediante el empleo de matrices de transformación homogénea y cuaternios. También se plantean varias formas de resolución del modelo diferencial mediante el empleo de la matriz Jacobiana. Se han incluido nuevos ejercicios resueltos, algunos de ellos utilizando Matlab.

El capítulo 5 trata el modelado dinámico de un robot, que constituye uno de los aspectos más complejos de la robótica. Se estudian las formulaciones de Lagrange y de Newton-Euler para la obtención del modelo dinámico de un robot. Asimismo, se estudian brevemente los modelos dinámicos de los actuadores. Algunos de los ejercicios resueltos propuestos al final de este capítulo incluyen el código completo en Matlab y las gráficas de los resultados obtenidos.

El capítulo 6 se dedica al control cinemático del robot que tiene como objetivo establecer las trayectorias de los actuadores de cada articulación para cumplir los criterios de diseño. En el capítulo 7 se analizan las técnicas más frecuentes de control dinámico de las trayectorias que han sido previamente calculadas por el control cinemático. Los ejercicios de ambos capítulos están desarrollados en Matlab y los del 7 emplean también Simulink para la descripción del esquema de control y sus parámetros.

El capítulo 8 aborda la programación de robots desde un aspecto general, describiendo las características comunes a cualquier sistema de programación. Se detallan los lenguajes Rapid y V+, incluyendo programas de ejemplo. En esta nueva edición se han incluido dos ejercicios completamente resueltos con cada uno de estos lenguajes.

En el capítulo 9 se describen diferentes aspectos prácticos de implantación de un robot industrial. En primer lugar, la distribución en planta de una célula de trabajo y las características que hay que considerar a la hora de elegir un robot para una aplicación concreta. A continuación, se estudian brevemente aspectos de seguridad en instalaciones robotizadas que son muy útiles como guía en la fase de diseño, desarrollo y puesta en explotación de la instalación. Por último, se dan indicaciones de cómo realizar un análisis económico de una instalación robotizada acompañado de algunos sencillos ejemplos. Un último apartado resume el estado actual del mercado de robots en el mundo y en España. Este apartado podría estar perfectamente en el capítulo 1 de introducción, ya que sirve más bien para tener una imagen general de las principales aplicaciones de la robótica. En este capítulo se han añadido también nuevos ejercicios resueltos que son muy interesantes para complementar los contenidos del mismo. Con buen criterio, se ha dejado para un apéndice una descripción más pormenorizada de la normativa sobre robots industriales.

En el capítulo 10 se describen algunas de las principales aplicaciones de los robots en la industria, así como nuevas aplicaciones en otros sectores agrupados bajo la denominación general de robots de servicios. Al final, también se han incluido ejercicios resueltos que permite analizar diferentes aspectos en la implantación de los robots. En mi opinión, este capítulo puede ser perfectamente estudiado antes del 9 sin ningún problema; ello reforzaría aún más los contenidos estudiados en este último capítulo.

El capítulo 11 que estudia los fundamentos de teleoperación y telerrobótica es completamente nuevo. Por su propia extensión, algo más de cien páginas, casi puede constituir un curso completo sobre esta materia. Este último capítulo cubre, por tanto, todos los aspectos importantes de teleoperación: componentes, arquitecturas,

dispositivos de control y realimentación, modelado del operador, control de teleoperación y aplicaciones de la teleoperación. Se han incluido también varios ejercicios resueltos con diferentes esquemas de control bilateral.

Al final del libro se han incluido dos anexos. El primero presenta de manera resumida las normativas aplicables sobre robots industriales, identificadas en España como normas UNE EN ISO, que pueden servir de guía para una consulta más detallada del texto específico de las mismas. El anexo 2 simplemente describe los símbolos gráficos empleados en el texto.

Como se puede deducir de la descripción realizada en los párrafos anteriores, nos encontramos ante un texto que cubre todos los aspectos de la robótica industrial y que está dirigido a un amplio sector. Aunque el libro está principalmente orientado a la formación de estudiantes de ingeniería, también puede ser utilizado por profesionales que quieren conocer o profundizar en diferentes aspectos de la robótica industrial.

Desde el punto de vista académico, el libro completo puede servir para un curso de introducción a la robótica en los actuales estudios de Ingeniería Industrial o en estudios asimilados (Automática y Electrónica, por ejemplo), incluso sin la parte de teleoperación (capítulo 11). Algunos capítulos, como el 11, pueden formar parte del material de un curso de postgrado de manera totalmente independiente. Para un curso práctico, meramente descriptivo de la robótica, se puede seguir el siguiente orden de capítulos: 1, 2, 8, 10 y 9. Para un curso de postgrado o seminario orientado únicamente a los aspectos matemáticos de la robótica, el orden podría ser: 1, 2, 3, 4 y 5. Si se añaden a éstos los capítulos 6 y 7, se complementa la parte de modelado con la de control (muy importante para ingenieros de control).

Se trata, en definitiva, de un libro que permite estudiar los principios de la robótica industrial con un acertado equilibrio entre aspectos matemáticos, de control y prácticos, útiles para cualquier estudiante o profesional que quiera conocer a fondo esta disciplina.

Rafael Sanz Domínguez

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática
Universidad de Vigo. España.
rsanz@uvigo.es

NOVEDADES

Tesis doctoral: Supervisión del comportamiento de los controladores industriales

Autor: Rachid Aref Ghraizi

Directores: Cesar de Prada Moraga y Ernesto Martínez

Universidad de Valladolid, octubre de 2006

La motivación de esta tesis doctoral surge por el hecho de que en una planta de proceso existen centenares o incluso miles de lazos de control, donde, normalmente, controladores con buen comportamiento sufren deterioros graduales o bruscos debido a varios factores. Entre éstos se encuentran los cambios en el proceso, cambios en los parámetros de sintonía del controlador, las perturbaciones o averías, etc. Por otra parte, debido a la gran cantidad de lazos y el enorme esfuerzo que supone una supervisión manual, a menudo los lazos de control reciben muy poca atención, o por lo menos no reciben la atención necesaria hasta que el proceso presenta serias dificultades. Todo ello, junto a la escasa disponibilidad de ingenieros de control en la planta, conduce a que la supervisión sea una tarea poco frecuente. Todos esos problemas reducen la eficiencia de los sistemas de control, causando un aumento en el coste de los productos y gastos de operaciones más altos, lo que se refleja en una calidad fuera del margen de las especificaciones de producción, y al mismo tiempo comprometen la seguridad de su entorno.

El objetivo fundamental de esta tesis es abordar el tema de la supervisión automática de los controladores industriales y desarrollar métodos y herramientas que puedan ser aplicados en línea o ser utilizados fuera de línea para evaluar el comportamiento del controlador y realizar un mantenimiento sistemático. En concreto, en la tesis se propone:

- Desarrollo de una metodología de supervisión que se pueda utilizar industrialmente
- Desarrollo de métodos que permitan realizar la supervisión de los controladores PIDs y de los MPCs para poder detectar anomalías en sus comportamientos
- Desarrollo de una herramienta informática para aplicar los métodos
- Comprobación de los métodos tanto en simulación como con datos a escala industrial.

El primer objetivo ha sido establecer una metodología de supervisión del comportamiento del controlador, al cual denominamos como Técnicas de Monitorización, Detección y Diagnóstico de anomalías en el comportamiento del controlador (TMDD). La metodología de supervisión TMDD dispone de dos métodos diferentes aunque tienen el mismo objetivo: analizar el comportamiento del controlador.

El primer método realiza la supervisión del controlador examinando la predictibilidad del error, y se ha aplicado a los controladores PIDs y los MPCs. La idea básica de ese método es la siguiente: si un controlador funciona adecuadamente y se produce un cambio de la referencia o aparece una perturbación, cambiará la señal de control para seguir dicha referencia o rechazar la perturbación, lo que conseguirá al cabo de un número razonable b de periodos de muestreo. En el intervalo $[t, t+b]$ es posible predecir más o menos cómo evolucionará la variable controlada o el error, pero a partir del instante $t+b$, los cambios de la salida serán debidos a perturbaciones aleatorias imposibles de anticipar y el error será una variable sin un patrón predecible de comportamiento. Por el contrario, si el regulador está mal sintonizado, de forma que presente errores estacionarios, oscilaciones mantenidas, o la salida tarda mucho en llegar a la referencia, entonces después de $t+b$ existirá un patrón de comportamiento de la variable controlada en vez de valores aleatorios y será fácil la predicción del error.

El segundo método calcula una serie de índices relacionados con el comportamiento de un MPC. Como el control predictivo se basa en la optimización en tiempo real de una función de coste, este enfoque de la supervisión de los MPC, se centra en ella para determinar los índices necesarios que van a permitir analizar y decidir sobre su estado. Para ello, se desarrollan unas técnicas basadas en informaciones de tiempo real y otros conocimientos históricos. Posteriormente relaciona estas funciones de costes y obtiene los índices necesarios para analizar el comportamiento del controlador. Este método solo se aplicará al controlador predictivo.

El método para la supervisión utilizando la predictibilidad del error se ha plasmado en una *toolbox* de Matlab denominada ACCI (Análisis del Comportamiento de los Controladores Industriales), mientras el método que utiliza las funciones de costes para la supervisión de los controladores predictivos se implementará en el programa HITO, el cual es una interfaz de control predictivo desarrollado en la Universidad de Valladolid.

Por último se han planteado los resultados de los métodos de supervisión propuestos, utilizando para ellos datos a escala industrial tomados de una planta petroquímica, y otros datos de simulación de un reactor químico.

Tesis doctoral: Sistemas Dinámicos con Retardos Temporales: Contribución al desarrollo de predictores robustos para el control de sistemas inestables

Autor: Pedro García Gil

Director: Pedro Albertos Pérez

Universidad Politécnica de Valencia, enero de 2007

Una de las mayores dificultades en el diseño de un sistema de control es sin duda la presencia de retardos, máxime si el sistema que se pretende controlar es inestable en bucle abierto y/o de fase no mínima. Los retardos pueden ser intrínsecos a los procesos a controlar, véase por ejemplo los procesos químicos, biológicos, columnas de destilación, procesos con intercambios térmicos, etc, o bien introducirse en el sistema de control por el propio diseño del mismo (tiempo de cómputo del algoritmo de control, sistemas distribuidos, control remoto, redes de comunicaciones, retardos introducidos por los sensores o actuadores, etc.).

El Predictor de Smith (SP) y la técnica de asignación finita del espectro (FSA) pueden considerarse como las estrategias de control más extendidas para el control de sistemas lineales sometidos a retardos de actuación o medida. Sin embargo, tanto el SP como la técnica de FSA tienen en común que realizan una compensación del retardo en base a una predicción de la salida, o del estado, a partir de un modelo del sistema considerado. De tal forma que, si el proceso a controlar es inestable, los esquemas de control resultantes no cumplen la condición de estabilidad interna, resultando a su vez en sistemas inestables.

Con objeto de poder aplicar estas técnicas al control de sistemas inestables con retardos temporales, se han propuesto diferentes modificaciones del SP original, denominadas genéricamente compensadores de tiempo muerto (DTCs), así como diferentes intentos de buscar una implementación segura, o numéricamente estable, de la técnica de FSA.

En esta tesis se presenta una nueva metodología que, de forma similar al SP, permite el desarrollo de compensadores de tiempo muerto (DTCs) para el control de sistemas estables o inestables de fase mínima o no mínima. A diferencia de propuestas anteriores, esta metodología permite un diseño de todos los controladores sin consideración del retardo, tanto en el ajuste de la ecuación característica correspondiente al seguimiento de la referencia, como en la correspondiente al rechazo de perturbaciones de carga. Para el caso de sistemas

inestables, la estructura resultante presenta mejores prestaciones que propuestas previas, habiendo sido validada experimentalmente sobre un prototipo de laboratorio de un helicóptero de 4 rotores.

En esta tesis, también se propone un esquema de predicción-observación robusto para evitar los problemas de inestabilidad numérica derivados de la implementación digital de la técnica de FSA, eliminando el problema de la inestabilidad producido por la aproximación numérica de la integral de predicción. La solución propuesta ha sido validada experimentalmente sobre un prototipo de laboratorio de un helicóptero de 4 rotores, y sobre un mini-helicóptero de 4 rotores en vuelo libre, para el cual fue desarrollado un sistema empotrado basado en el sistema operativo MaRTE OS. Es de destacar que uno de los artículos que se ha derivado de la tesis ocupa actualmente el tercer puesto en la lista “top25” de la revista “Journal of Process Control” de los artículos que han despertado mayor interés en la comunidad científica internacional.

Tesis doctoral: Model-Free Learning Control for Chemical Processes

Autor: Syafiie Syam

Directores: Fernando Tadeo y Ernesto Martínez

Universidad de Valladolid, febrero de 2007.

En esta tesis se presentan los algoritmos de control Model-Free Learning Control (MFLC), propuestos para aquellos sistemas en los que no es posible obtener un modelo, resulta muy costoso, o es demasiado complicado. Estos algoritmos usan procedimientos de aprendizaje basados en Aprendizaje por Refuerzo, lo que permite realizar el aprendizaje con una base teórica sólida, fundamentada en la teoría de los Problemas de Decisión de Markov (MDP), dando entonces una forma factible de solución de los problemas de Programación Dinámica resultantes.

Para permitir la aplicación a Control de Procesos, los algoritmos MFLC propuestos se basan en el conocimiento previo de las restricciones existentes en el sistema, sobre todo de las variaciones mínimas permitidas de la señal de control. Así, el conjunto de acciones posibles se define a partir de las restricciones sobre la señal de control y el conjunto de estados se define a partir de la tolerancia permitida, las restricciones sobre la salida y la distancia a la referencia. Estas técnicas se demuestran mediante la implementación práctica sobre dos procesos a escala de laboratorio: un sistema de control de pH y un proceso de oxidación de Fenoles. En concreto se prueban algoritmos basados en Q-Learning, donde distintos experimentos permiten estudiar el dilema entre Exploración y Explotación, el Aprendizaje Multi-etapa, la Abstracción Temporal, etc. Una vez realizado el aprendizaje, los algoritmos MFLC propuestos consiguen experimentalmente un buen control de los procesos.