

ENFOQUE PRÁCTICO DE LA TEORÍA DE ROBOTS

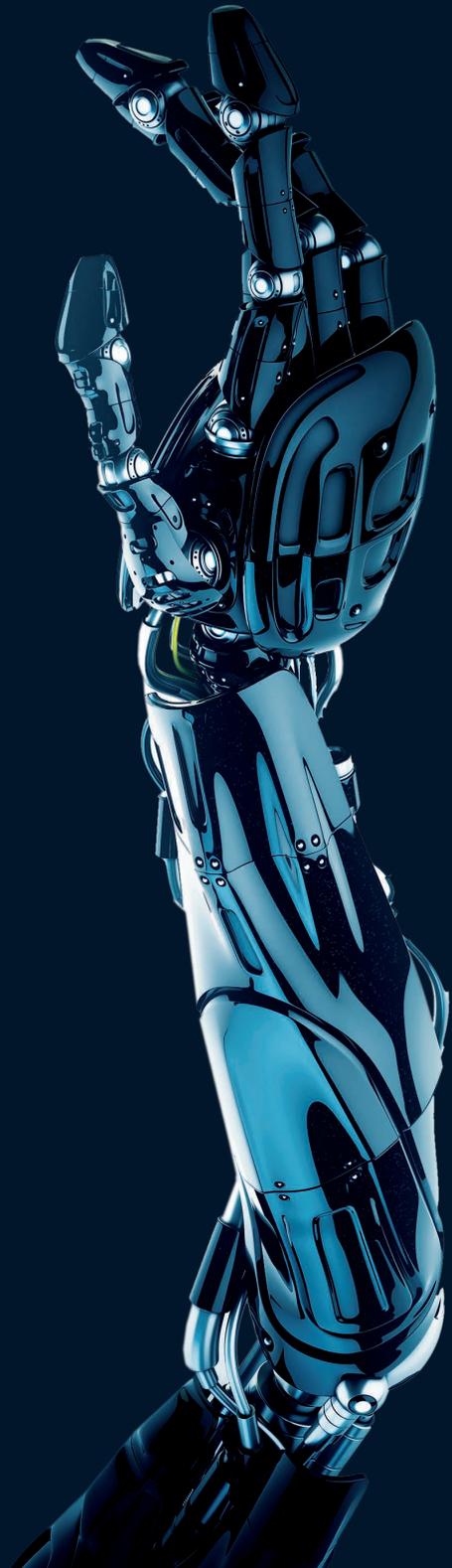
Con aplicaciones en Matlab

Enrique Luis Arnáez Braschi

ECO
EDICIONES



UPC
Universidad Peruana
de Ciencias Aplicadas



Contenido

Prólogo	9
Introducción	11
Capítulo 1. Introducción a la teoría de robots	13
Capítulo 2. Arquitectura del robot	15
2.1 Algunas definiciones importantes	15
2.2 Tipos de manipuladores por su movimiento	16
Capítulo 3. Planificación de trayectorias	19
3.1 Trayectoria óptima de tiempo mínimo de tres etapas	19
3.2 Trayectoria óptima de tiempo mínimo de dos etapas	23
3.3 Trayectoria lineal en el espacio cartesiano (con evolución temporal definida)	25
Capítulo 4. Cinemática de los robots	27
4.1 Coordenadas generalizadas de los robots	27
4.2 Representaciones en el espacio de la posición de los objetos	27
4.3 Transformación de coordenadas	27
4.4 Transformación homogénea de coordenadas	30
4.5 Problema cinemático directo	31
4.6 El método de Denavit-Hartenberg (D-H)	32
4.7 Cinemática de manipuladores de eslabones rígidos	39
4.8 Espacio articular <i>versus</i> espacio cartesiano	40
4.9 Problemas de cinemática y la cinemática inversa	40
4.10 Transformaciones diferenciales homogéneas	41
4.11 Transformación jacobiana	41
4.12 Matriz de transformación jacobiana	43
4.13 Rotaciones diferenciales	45

4.14 Cálculo de velocidades articulares desde las velocidades lineales	47
4.15 Singularidades	52
Capítulo 5. Dinámica de los robots	59
5.1 Modelo de la dinámica del robot en el espacio articular	59
5.2 Método directo para el cálculo del modelo dinámico de un manipulador	65
5.3 Propiedades de la dinámica del robot en el espacio articular	76
5.4 Representación en espacio-estado	78
Capítulo 6. Controladores para manipuladores de robot	81
6.1 Control PD de torque computado	82
6.2 Control PID de torque computado	88
6.3 Control PD con compensación de gravedad	92
6.4 Control articular clásico	95
6.5 Control de error filtrado basado en aproximación	96
6.6 Control adaptivo	98
6.7 Control robusto	103
6.8 Control neural-adaptivo y difuso-robusto	107
Capítulo 7. Modelamiento y control de trayectorias completo en Matlab	121
7.1 Determinación del modelo cinemático	121
7.2 Determinación del modelo dinámico	124
7.3 Parámetros del robot y trayectorias óptimas	128
7.4 Simulación y control PD de torque computado	131
7.5 Excepciones del modelo	152
Apéndice. Introducción al Matlab	153
Bibliografía	175

| Prólogo

Siento una gran admiración, aprecio y orgullo por el Capitán de Navío Enrique Arnáez Braschi a quien tengo la satisfacción de conocer desde su nacimiento y, por lo tanto, haber sido testigo de su formación, de su crecimiento, de sus aspiraciones de juventud y luego de sus logros. Tanto en el ámbito de su desarrollo como persona, como de esposo y padre en una linda familia, como Oficial profesional de la Marina de Guerra del Perú, como catedrático de diferentes programas de pregrado y posgrado de reconocidas universidades del país y como deportista calificado, siendo seleccionado nacional en la disciplina de tiro con pistola y en la cual ha conseguido para su institución y nuestro país numerosas medallas y trofeos.

Por lo tanto, el perfil del autor de esta obra, *Enfoque práctico de la teoría de robots*, es el de una persona íntegra, estudiosa, disciplinada y responsable; que se entrega con preparación, apasionamiento y amor a las diferentes actividades, tareas y retos que asume, buscando siempre que mejorar los resultados ya obtenidos, exigiéndose cada vez más para ello y luego, sin ningún egoísmo y mucha humildad, enseñar y transmitir todo lo que va aprendiendo.

Este libro está dirigido a estudiantes de maestría en el área de control, automatización y robótica de las carreras de Ingeniería Electrónica, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Mecatrónica, Ingeniería Mecánica y afines, como resultado de estudios, experiencia profesional, docencia y trabajos de investigación realizados durante algo más de 14 años y con la finalidad de darle una orientación realmente práctica a los temas teóricos, normalmente considerados como difíciles, del control moderno y de la robótica.

El enfoque del libro intenta ser una guía para enfrentar problemas de diseño de sistemas de control para manipuladores que, normalmente, es muy buscada por los estudiantes pero que no es muy fácil encontrarla de manera tan explícita. Considero, por lo tanto, que el autor cumple con su objetivo y aplicando de manera adecuada, sus cualidades pedagógicas y experiencia docente, expone al lector los fundamentos del diseño que se persigue, utilizando problemas muy ilustrativos, con soluciones claras y empleando matemáticas lo menos complejas posibles, aunque sin perder el nivel y el rigor pertinente.

El autor consolida, en consecuencia, los resultados de mucha investigación y de mucho ingenio en una obra acerca de la robótica, a la fecha única en su género escrita por un autor nacional, y que enriquece a la cátedra universitaria, con aportes propios a los modelos y técnicas de diseño de controladores para manipuladores aquí tratados.

Estoy seguro que esta obra de Enrique Arnáez Braschi, al igual que su antecesora orientada a cursos de pregrado, *Enfoque práctico del control moderno con aplicaciones en matlab*, será un valioso aporte a la formación de los alumnos de maestría y que aspiran a impulsar un desarrollo tecnológico propio para nuestro país.

Ing. Jorge Tejada Polo

Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica
Universidad de San Martín de Porres

Introducción

Cuando estudiaba cursos previos a estudiar robótica, al igual que el resto de alumnos, siempre me quejaba porque tenía que llevar asignaturas que supuestamente «nunca iba a aplicar» durante mi carrera. Posteriormente, al llevar los cursos referentes a Ingeniería de Control, entendí la importancia de todos los cursos de los que renegaba y valoré a esta rama de la ingeniería por su utilidad para la sociedad.

Al profundizar algunos temas, llegué a seguir teoría de robot como un curso sumamente complejo porque no se tenían las facilidades informáticas que hoy tenemos. Por ejemplo, tardé más de un día realizando ecuaciones diferenciales para determinar un modelo dinámico de un manipulador de tres grados de libertad, con la alta probabilidad de errar en un signo o algún cálculo obvio. Ahora, junto a mis alumnos con los métodos que se plantean en este texto, elaboramos modelos dinámicos de manipuladores de más grados de libertad en pocos minutos.

Este libro ha sido preparado pensando en condensar temas sumamente abstractos de manera sencilla que permitan apoyar el dictado de la teoría de manipuladores robóticos. Específicamente, me refiero a los temas de modelamiento y control de movimiento de robots, ya que, cuando me tocó aprender y luego dictar estos cursos, el lenguaje que empleaban las publicaciones y la forma de escribir las matemáticas eran complicadas. Asimismo, no se tenían aplicaciones en Matlab de los ejemplos que planteaban, siendo una gran interrogante la forma en la que los autores programaban y llegaban a los resultados.

En esta publicación se resume, en una forma práctica, estudios, trabajos e investigaciones de más de 14 años tratando de plasmar el enfoque práctico de la parte teórica del control moderno y de la robótica.

La teoría de control moderno emplea durante diferentes etapas para el diseño de los controladores un amplio número de ciencias y herramientas, como álgebra lineal, teoría de vectores y matrices, cálculo diferencial y programación. Para esta última herramienta, empleamos el Matlab. Por ello, si el lector no está familiarizado con estos temas, es conveniente que primero desarrolle ciertas habilidades antes de comenzar con estos conocimientos, pues solo se hará mención a los procedimientos necesarios sin profundizar en ellos.

Adicionalmente, todo ingeniero que vaya a analizar el comportamiento de un sistema controlado, o para controlarlo, deberá investigar la teoría que sostiene dicho comportamiento. En este caso, para la teoría de robots, usamos conceptos de electricidad, electrónica, mecánica y dinámica de sólidos o fluidos, economía, química, o cualquiera que fuera el campo o los campos de trabajo del sistema en cuestión.

Complementariamente, el control moderno utiliza análisis numérico, teoría de optimización, lógica difusa, redes neuronales y otras nuevas teorías que puedan mejorar el desempeño de los sistemas que manejemos.

Para finalizar, el enfoque en este tema de teoría de robots de manera simple pero con conceptos avanzados, presentamos dos ejemplos en que se aprecia el empleo de todos los conocimientos presentados descritos anteriormente.

Así, en el primer capítulo presentamos una breve introducción al tema, el cual es desagregado en sus cuatro fases en cada uno de los siguientes cuatro capítulos, arquitectura, trayectorias, cinemática y dinámica de robots.

Todo concluye en el sexto capítulo, en que presentamos los controladores que conducen las tareas que los manipuladores realizará como son los controladores de torque computado, que complementariamente se ven enriquecidos con ejemplos de controladores más sofisticados de modo ilustrativo.

Finalmente, en el séptimo capítulo, integramos todos los temas de manera práctica con una simulación en Matlab del diseño y control de un manipulador sencillo, acompañada de un ejemplo completo.

Adicionalmente, se presenta un apéndice donde planteamos una introducción al Matlab. La finalidad de este apéndice no es enseñar a usar este programa sino explicar algunas de sus funciones y aplicaciones para ayudar a su empleo.

Los temas teóricos están presentados con ejemplos en su aplicación para una fácil y rápida comprensión y casi en su totalidad son desarrollados adicionalmente en Matlab, siempre y cuando sea aplicable.

Por último, expresamos que el resultado de la investigación que está comprendido en el contenido de este texto innova cuatro aspectos de los estudios en robótica:

1. Presenta un método sencillo para establecer la ubicación de los centros de masa de los eslabones del manipulador definiendo cómo alterar el concepto inicial del algoritmo de Denavit-Hartenberg.
2. Plantea la determinación del modelo dinámico de un manipulador a partir de los centros de masa de los eslabones íntegramente en Matlab.
3. Presenta simulaciones integrales en Matlab en que se definen las trayectorias, se aplica el modelo dinámico y se emplean las diferentes técnicas de control de robots expuestas.
4. Define un tipo de controlador neural-adaptivo difuso-robusto que no necesita del modelo dinámico para controlar un manipulador, pues lo identifica y aprende durante los primeros instantes de trabajo.

Enrique Arnáez Braschi

Enfoque práctico de la teoría de robots



¿Qué entendemos por “robot”? Primero, debemos comenzar por enfrentar la idea popular de que un robot es un androide como los conocidos Terminator, C-3PO o todos los que tengan alguna forma “humanoide”. La robótica es el punto de encuentro de varias ramas de la ingeniería que se ocupa del diseño, construcción, operación, manufactura y aplicación de robots, o entidades virtuales o mecánicas artificiales con movimiento propio en el espacio. Su origen se debe a la existencia de procesos industriales peligrosos y a la necesidad de encontrar soluciones costo-eficientes para su realización.

Incluye

- Descripción de controladores para manipuladores de robots.
- Apéndice con introducción al Matlab.

Enfoque práctico de la teoría de robots explica temas de modelamiento y control de movimiento de robots con una estructura y lenguaje sencillos. Luego de una breve introducción al tema, el autor describe aspectos de la teoría de robots –arquitectura, trayectorias, cinemática y dinámica de robots– seguidos de un capítulo sobre controladores que conducen las tareas realizadas por los manipuladores. El último capítulo integra todos los temas vistos con una simulación del diseño y control de un manipulador sencillo con el *software* Matlab.

Este libro está dirigido a estudiantes de maestría en el área de control, automatización y robótica de las carreras de Ingeniería Electrónica, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Mecatrónica, Ingeniería Mecánica y afines. El libro incluye aplicaciones con Matlab que requieren del lector ciertas habilidades con el *software*.

Colección: Ingeniería y salud en el trabajo

Área: Ingeniería

ECO
EDICIONES



UPC
Universidad Peruana
de Ciencias Aplicadas

