Enfoque práctico de la teoría de robots

Con aplicaciones en Matlab

Enrique Luis Arnaez Braschi

Enfoque práctico de la teoría de robots

Con aplicaciones en Matlab

Enrique Arnaez Braschi

Lima, mayo de 2015

Universidad Peruana De Ciencias Aplicadas

Quiero agradecerle a Mariella, mi esposa, y a Daniella y Andrea, mis hijas por su amor, alegría y felicidad. Son lo más grande que tengo en la vida.

Del mismo modo le quiero agradecer a toda mi familia por su permanente estímulo, respaldo y apoyo para continuar con los estudios e investigaciones emprendidas, a mis amigos de la Marina, de la universidad y a mis colegas del tiro deportivo por su aliento permanente.

A Dios le doy las gracias por su amor y por haberme hecho nacer en mi Perú, hermoso y pujante, con gente extraordinaria y una cultura milenaria.

| Contenido

Prólogo	7
Introducción	8
Capítulo 1. Introducción a la teoría de robots	10
Capítulo 2. Arquitectura del robot	12
2.1 Algunas definiciones importantes	12
2.2 Tipos de manipuladores por su movimiento	13
Capítulo 3. Planificación de trayectorias	15
3.1 Trayectoria óptima de tiempo mínimo de tres etapas	15
3.2 Trayectoria óptima de tiempo mínimo de dos etapas	19
3.3 Trayectoria lineal en el espacio cartesiano (con evolución temporal definida)	21
Capítulo 4. Cinemática de los robots	23
4.1 Coordenadas generalizadas de los robots	23
4.2 Representaciones en el espacio de la posición de los objetos	23
4.3 Transformación de coordenadas	23
4.4 Transformación homogénea de coordenadas	26
4.5 Problema cinemático directo	27
4.6 El método de Denavit-Hartenberg (D-H)	28
4.7 Cinemática de manipuladores de eslabones rígidos	35
4.8 Espacio articular <i>versus</i> espacio cartesiano	36
4.9 Problemas de cinemática y la cinemática inversa	36
4.10 Transformaciones diferenciales homogéneas	37
4.11 Transformación jacobiana	37
4.12 Matriz de transformación jacobiana	39
4.13 Rotaciones diferenciales	41

4.14 Cálculo de velocidades articulares desde las velocidades lineales	43
4.15 Singularidades	48
Capítulo 5. Dinámica de los robots	55
5.1 Modelo de la dinámica del robot en el espacio articular	55
5.2 Método directo para el cálculo del modelo dinámico de un manipulador	61
5.3 Propiedades de la dinámica del robot en el espacio articular	72
5.4 Representación en espacio-estado	74
Capítulo 6. Controladores para manipuladores de robot	76
6.1 Control PD de torque computado	77
6.2 Control PID de torque computado	83
6.3 Control PD con compensación de gravedad	87
6.4 Control articular clásico	90
6.5 Control de error filtrado basado en aproximación	91
6.6 Control adaptivo	93
6.7 Control robusto	98
6.8 Control neural-adaptivo y difuso-robusto	102
Capítulo 7. Modelamiento y control de trayectorias completo en Matlab	115
7.1 Determinación del modelo cinemático	115
7.2 Determinación del modelo dinámico	118
7.3 Parámetros del robot y trayectorias óptimas	122
7.4 Simulación y control PD de torque computado	125
7.5 Excepciones del modelo	146
Apéndice. Introducción al Matlab	147
Bibliografía	170

| 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 buscado por los estudiantes pero que no es muy fácil encontrarlo 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 sobre por qué 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, y 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

Capítulo 1. Introducción a la teoría de robots

«Robot», es una palabra que como tal fue empleada por primera vez por el escritor checo Karel Čapek en su obra *Opítek* en 1917, la cual etimológicamente proviene de la palabra ‘robotá’, que significa ‘servidumbre’, ‘esclavitud’ o ‘trabajo obligado’.

La robótica es una nueva disciplina que se encarga del estudio y del diseño de los robots y del movimiento de objetos en el espacio. Las causas que impulsan a la robótica están dadas por procesos industriales peligrosos como altas temperaturas o ambientes contaminados, por el alto costo de la fuerza de trabajo, y por la efectividad económica al optimizar la relación costo-beneficio.

Debemos comenzar por enfrentar algunas ideas populares. Primera: un robot no es un androide necesariamente, como los conocidos Terminator, C-3P0 o todos los que tienen dos brazos, dos piernas y forma ‘humanoide’ en general.

En ese contexto las siguientes preguntas son válidas: ¿Sería útil darle forma humana a un robot? ¿Por qué a una invención debemos asignarle nuestras limitaciones físicas?

Como postulado, asumiremos que, desde el punto de vista de la ingeniería, nunca le debemos dar las limitaciones humanas a los robots. Segunda: los robots se caracterizan por tener un órgano terminal con forma de mano, es decir, cuentan con por lo menos una garra, característica que los define como manipuladores. Y tercera: toda la teoría de manipuladores estudia la cinemática y la dinámica de robots estáticos, pero es fácilmente aplicable a robots móviles cuando estos son dotados de ruedas o de piernas y un sistema de navegación adecuado.

Entonces, las principales características que deben darse en un robot son:

1. Es un manipulador reprogramable multifuncional: ya que debe manipular o mover objetos, debe ser reprogramable para realizar diversos movimientos y debe ser multifuncional para ejecutar varias aplicaciones.
2. Ejecuta acciones en forma automática: está compuesto de una estructura mecánica y de un sistema de control programable.

Adicionalmente, la demanda de exploración ha llevado a desarrollar sistemas autónomos que trabaje con gran precisión como son los vehículos aéreos no tripulados, más conocidos como UAV, de sus iniciales anglosajonas *Unmanned Aerial Vehicle*, así como sus versiones terrestres, marinas y submarinas. Inclusive, invita a pensar en el desarrollo de armas inteligentes con comportamientos «de robots» como son los misiles de última generación. En este caso, los sistemas de puntería harían las veces de órganos terminales que buscan alcanzar el objetivo que es el blanco militar.

Con esta apreciación, y coincidente con el profesor Peter Corke, la definición de un robot debe darse a un sistema autónomo capaz de realizar diversas tareas y que cumpla un objetivo.

Los manipuladores de robóticos tienen complejas dinámicas no lineales que hacen muy pesado el diseño de sus controladores. Afortunadamente, la dinámica del robot está dentro de la clase de la dinámica de los sistemas de Lagrange, los cuales tienen propiedades físicas modelables y, por ende, es más aplicable su control.

Para abarcar los temas en los que se centra la robótica, debemos saber que estos son:

- La arquitectura de los manipuladores.
- La definición de las trayectorias.
- La cinemática de los robots.
- La dinámica de los robots.

No es rígido el orden de los temas tocados líneas arriba, pues por cada proyecto de diseño tendremos muchas limitaciones las cuales dirigirán el punto de inicio y su respectiva secuencia dentro de los temas en cuestión. Por ejemplo, si se otorga un trabajo específico y ya se cuenta con un manipulador, podríamos comenzar con la definición de trayectorias o con la cinemática. Sin embargo, si no contamos con el manipulador, podemos partir de la arquitectura que optimice el empleo del ambiente de trabajo.

Gráfico 1.1 Secuencia de operación de un robot

Una vez finalizado el diseño y considerando que la operación será la labor permanente del manipulador, describiremos la secuencia técnica de operación:

- Se definen como entradas el punto de inicio y final del recorrido del manipulador.
- Se generan las trayectorias de cada articulación para realizar este recorrido en el menor tiempo posible. Es decir, empleando las velocidades y aceleraciones máximas de diseño de los actuadores.
- Se muestrea la posición y se determina el error que procurará eliminarse.
- Se genera el torque que demandan los actuadores para eliminar el error de posición, empleando el modelo dinámico del manipulador.
- Se vuelve a muestrear la posición y se actualiza el torque hasta eliminar el error.

Capítulo 2. Arquitectura del robot

El concepto de arquitectura de un robot se refiere primordialmente al *software* y *hardware* que definen el ámbito de control de una máquina de este tipo. Una tarjeta controladora que ejecuta algún *software* para operar motores y la comunicación con el *hardware* es lo que la define realmente.

Los sistemas robóticos son complejos y tienden a ser difíciles de desarrollar; esto es debido a la gran variedad de sensores que deben integrar, así como al hecho de delimitar su rango de acción; por ejemplo, el radio de giro de un brazo robot o la altura máxima a la que puede levantar algún objeto que esté manipulando.

La nueva tendencia para el desarrollo de arquitectura robótica se ha enfocado en lo que podemos nombrar sistemas reactivos o bien basados en el entorno. Es decir, los robots tendrán la capacidad de reaccionar sin necesidad de la intervención humana ante ciertas situaciones de eventual peligro para la máquina.

2.1 Algunas definiciones importantes

Gráfico 2.1 Manipulador genérico

- a. **Grado de libertad:** se le conoce con las siglas DOF del inglés *Degree of Freedom*, y se define como un movimiento elemental independiente del resto. Usualmente cada grado de libertad necesita de un actuador.
- b. **Eslabón o link:** es la parte sólida, normalmente rígida que compone al robot. En la figura superior serían el brazo y el antebrazo.
- c. **Articulación:** también conocida como *joint* o junta, es la unión móvil entre los eslabones.
- d. **Mano o garra:** es el actuador del manipulador capaz de sujetar un objeto.

Para poder revisar todo el contenido de esta edición,
visite nuestra **tienda virtual**.