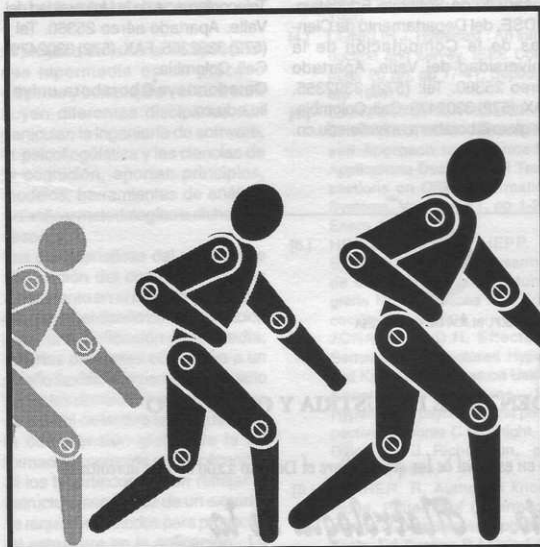


Propiedades de los modelos dinámicos en robótica clásica



□ José Tomás Buitrago M.
Ingeniero Mecánico
Profesor Auxiliar
Universidad del Valle

RESUMEN

Se presenta un panorama general, un breve desarrollo histórico y se hace una evaluación de las propiedades de algunos métodos utilizados para resolver el problema relacionado con la dinámica de robots.

ABSTRACT

This paper shows a general approach, a brief historical development and an

evaluation of the proprieties of some methods used to solve the robot dynamic problem.

PALABRAS CLAVES:

Dinámica de robots, robótica.

KEYWORDS: robot dynamics, robotics.

1. INTRODUCCIÓN

La robótica es una ciencia que está en su etapa de desarrollo en países como el nuestro. Es prácticamente una tecnología desconocida y el entorno en que se mueve es muy pequeño.

La instalación de robots en la industria, a nivel mundial, es muy reciente (1961) y por esto lo desarrollado hasta el momento, en cierta forma, es muy poco, aunque teóricamente se han añadido modificaciones a la cinética (dinámica) de los manipuladores mecánicos, basados en las ecuaciones clásicas del movimiento.

Los robots instalados en la industria, tanto norteamericana como japonesa, son numerosos. En nuestro país solo hay unos pocos manipuladores instalados en la industria.

En las universidades la enseñanza de la robótica es teórica y la práctica es muy poca porque el acceso a un robot industrial es muy restringido. En este artículo, se hace una evaluación de las propiedades dinámicas de los modelos dinámicos

más utilizados, porque a partir de ellas se pueden obtener leyes de control más eficientes, que generan esfuerzos de control menores y el movimiento del robot se hace más suavemente, libre de vibraciones mecánicas. Conociendo la dinámica del robot se puede llegar a aumentar su vida útil.

2. DINÁMICA Y ROBÓTICA

La dinámica de robots se fundamenta en las formulaciones matemáticas del comportamiento del movimiento del brazo. Las ecuaciones de movimiento de un manipulador son un conjunto de ecuaciones matemáticas que describen su conducta dinámica. Tales ecuaciones son útiles para la simulación en computadora del movimiento del robot, el diseño de leyes de control apropiadas para el robot y la evaluación del diseño y estructura del brazo (Figura 1). En teoría, se han desarrollado muchos algoritmos que explican el comportamiento dinámico de un manipulador, como las formulaciones de Lagrange-Euler y Newton-Euler[2]. Estas fueron desarrolladas antes de instalarse el primer robot industrial. Con el avance tan rápido de la tecnología, los algoritmos dinámicos están siendo modificados, pero siempre sobre la misma base: hacer que los diseños y sistemas de control de los robots sean más eficientes.

La forma en que estos algoritmos teóricos se han descrito, con mucha simbología y representación matricial, los hace dispendiosos para trabajar manualmente, por esto, se han hecho reducciones de los modelos, linealizándolos alrededor de un punto de trabajo específico. De esta forma se han implementado modelos que facilitan la aplicación de estos algoritmos, los cuales generan resultados más inmediatos, obteniéndolos de un modo más fácil y rápido. El software ayuda a reafirmar los resultados teóricos obtenidos al aplicar los modelos de la dinámica del robot. Luego se verifican los resultados con el modelo completo y se hacen los ajustes necesarios.

Además, mediante la simulación, el programa de computador que se obtiene puede ser empleado en estudios posteriores. El implementar un algoritmo que explique la dinámica del robot, sirve como guía para comprender mejor el funcionamiento mecánico de un brazo robot, así como el control y diseño del mismo.

3. DESARROLLO HISTÓRICO

En los últimos años la robótica ha fusionado la mecánica clásica con la teoría de control. El rápido avance de las aplicaciones industriales ha hecho que los desarrollos teóricos y prácticos hayan tenido algunas discrepancias respecto a los resultados de uno y otro.

Recientemente, debido a las necesidades para mejorar los algoritmos de control y los manipuladores, la investigación ha integrado más estas dos disciplinas. A su vez los robots hacen que la demanda de métodos teóricos aumente.

Los primeros trabajos acerca de la dinámica de mecanismos espaciales fueron publicados en 1937[1], época en la cual los computadores no estaban disponibles para estos análisis. Muchos métodos desarrollados fueron resueltos manualmente, los modelos más eficientes no habían sido desarrollados, inclusive los modelos existentes eran para cualquier clase de mecanismo. Hay que anotar que fueron formulados antes de patentarse el primer brazo robot por G. Devol y J. Engelbert en 1954[5].

Con el advenimiento de los computadores, los investigadores hacen que los algoritmos que reúnen las ecuaciones dinámicas sean cada vez más eficientes y precisos. Así, el papel del investigador se centra en analizar la información de entrada, que son las diferentes configuraciones del mecanismo (en este caso el brazo robot). Las investigaciones han hecho demostraciones en las cuales se hacen equivalencias de modelos de convección de fluidos (transmisión de calor entre fluidos) con la dinámica de manipuladores [6] y se ha estudiado la forma de eliminar fuerzas y momentos de reacción dinámicos planeando trayectorias adecuadas[7].

4. MÉTODOS UTILIZADOS

Los métodos dinámicos se centran en dos clases de soluciones: la dinámica inversa y la dinámica directa (figura 2), en donde la solución inversa consiste en obtener las fuerzas y torques actuantes en cada elemento y articulación del mecanismo, y el problema directo radica en calcular las velocidades y aceleraciones bajo condiciones de carga.[1][3]

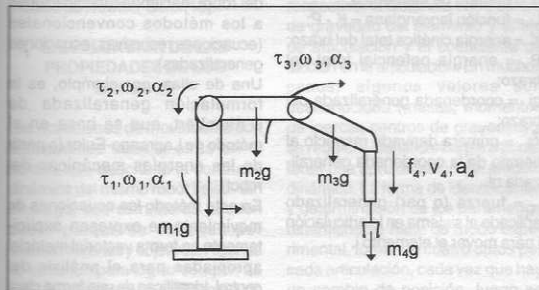


Figura 1 Robot con sus variables dinámicas.

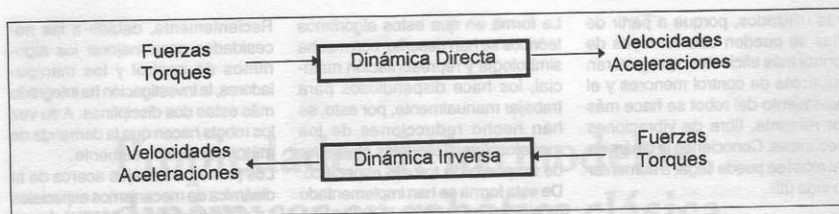


Figura 2. Soluciones dinámicas.

La aparición de los métodos computacionales para resolver los modelos dinámicos de manipuladores representó un avance en la teoría de robots. Los métodos son generales y cubren diferentes configuraciones de brazos robots; estas configuraciones son los datos de entrada. El modelo obtenido es de forma matricial compacta. Esta formulación lleva a la aplicación práctica de modelos dinámicos (modelación matemática, ecuaciones cinéticas, ecuaciones diferenciales de movimiento).

Un problema importante en el análisis dinámico es la definición de los parámetros del robot. Estos parámetros caracterizan las articulaciones del robot, su posición y orientación con respecto a la articulación anterior. El cálculo de los parámetros se hace de una forma sencilla y directa, fácil de implementar en el computador y simple para el usuario; en este punto se incluye el análisis de la posición, en donde uno de esos parámetros es la variable de articulación (un ángulo si la articulación es de revolución y un desplazamiento si la articulación es prismática). La representación más difundida es la matricial de Denavit-Hartenberg [5]. Los algoritmos dinámicos básicos sirven como punto de partida para el desarrollo de nuevos algoritmos o modificaciones del mismo, dichas modificaciones cubren algunos tipos de manipuladores, aplicaciones diversas y mejora las soluciones generadas. Los algoritmos se basan en la mecánica clásica y se han desarrollado de tal forma que su

implementación computacional resulta relativamente sencilla.

El modelo dinámico de un robot se puede obtener a partir de leyes físicas conocidas como las leyes de la mecánica newtoniana y lagrangiana. Esto conduce al desarrollo de las ecuaciones de movimiento dinámico para las diversas articulaciones del manipulador, en términos de los parámetros geométricos e inerciales de los elementos. Métodos convencionales como las formulaciones de Lagrange-Euler (L-E) y Newton-Euler (N-E) se pueden aplicar, entonces, sistemáticamente para desarrollar las ecuaciones de movimiento del robot. La formulación de estos dos métodos es la siguiente:

• Lagrange - Euler

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i, i=1,2,\dots,n$$

donde:

n = número de elementos;
 L = función lagrangiana = $K - P$;
 K = energía cinética total del brazo;
 P = energía potencial total del brazo;
 q_i = coordenada generalizada del brazo;
 $\dot{q}_i$ = primera derivada respecto al tiempo de la coordenada generalizada q_i .
 τ_i = fuerza (o par) generalizado aplicado al sistema en la articulación i para mover el elemento i .

• Newton - Euler

$$\tau_i = \begin{cases} n_i^T z_{i-1} + b_i \ddot{q}_i & (1) \\ f_i^T z_{i-1} + b_i \dot{q}_i & (2) \end{cases}$$

se aplica la expresión (1) si el elemento i es rotacional y la (2) cuando el elemento i es traslacional. Donde:

n_i = momento ejercido sobre el elemento i por el elemento $i-1$ en el sistema de coordenadas de este elemento;

f_i = fuerza ejercida sobre el elemento i por el elemento $i-1$ en el sistema de coordenadas de este elemento para soportar al elemento i y a los elementos por encima de él;

z_{i-1} = eje de la articulación $i-1$;

b_i = coeficiente de rozamiento viscoso de la articulación i ;

$\dot{q}_i$ = primera derivada respecto al tiempo de la coordenada generalizada q_i .

A partir de las formulaciones anteriores se obtienen diferentes formas de describir la dinámica del brazo del robot, haciendo modificaciones a los métodos convencionales (ecuaciones recursivas, ecuaciones generalizadas).

Una de ellas, por ejemplo, es la formulación generalizada de D'Alembert, que se basa en el método de Lagrange-Euler (a partir de las energías mecánicas del robot).

En este método las ecuaciones de movimiento se expresan explícitamente en forma vectorial matricial apropiadas para el análisis del control. Identifican de una forma clara las contribuciones de los efectos

traslacionales y rotacionales de los elementos, lo cual facilita la simplificación y la linealización alrededor de un punto para obtener el controlador adecuado[2].

A su vez, se han propuesto modelos dinámicos alternos, utilizando la formulación cinemática modificada de Denavit-Hartenberg, obteniéndose resultados similares a los convencionales, aunque con menos cálculos [8].

Entre los métodos dinámicos existen desarrollos empíricos específicos para un robot en particular, modelos simplificados donde se omiten los términos no lineales en las ecuaciones y modelos discretos[2].

Otros métodos involucran redes neuronales artificiales, por su capacidad de representar funciones complejas y su potencial para trabajar en tiempo real. Se utiliza hardware especial para esta aplicación. Los resultados simulados y la precisión de los modelos, luego de unos pocos ciclos de entrenamiento de la red, prometen un buen futuro para esta metodología[9].

El advenimiento de la computación paralela ha motivado la investigación de arquitecturas y algoritmos paralelos para lograr una mejor precisión en los modelos dinámicos. Los métodos convencionales fueron analizados y se les encontró paralelismo en muchos de sus cálculos, en donde se concluyó que el más eficiente fue una variación del modelo de Newton-Euler[10].

5. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS MODELOS

Las ecuaciones de movimiento son equivalentes unas a otras en el sentido que describen la conducta dinámica del mismo robot físico. Sin embargo, sus estructuras pueden diferir porque se obtienen por diversas razones y objetivos. Algunas se obtienen para lograr tiempos de cálculo rápido en la evaluación de los pares de articulaciones no

minales para controlar el manipulador (para seis grados de libertad Newton-Euler requiere 792 multiplicaciones y 662 sumas, comparado con Lagrange-Euler que realiza 77.405 sumas y 101.348 multiplicaciones [2]), otras se obtienen para facilitar el análisis y la síntesis de control (como Lagrange-Euler) y otras se obtienen para mejorar la simulación por computador del movimiento del robot (como algunas modificaciones de Newton-Euler[8]). El método de D'Alembert permite expresar las ecuaciones de movimiento en forma vectorial matricial, en las cuales se identifican claramente los efectos rotacionales y traslacionales de las articulaciones; es un método intermedio entre Newton-Euler y Lagrange-Euler.

La eficiencia de los métodos depende, principalmente, del tiempo de procesamiento de las señales de los actuadores y de su obtención del esfuerzo de control (el torque de los motores de cada articulación).

Las simplificaciones del modelo se pueden hacer bajo ciertas características de velocidad, como a velocidades bajas, ya que las velocidades altas aumentan el efecto de los términos simplificados y el modelo resulta inexacto, tanto en esfuerzo de control, como en la repetibilidad requerida.

Los parámetros principales en el modelo dinámico son la longitud de los elementos, la masa de los mismos, el momento de inercia respectivo, la distancia entre centro de gravedad del elemento y el eje de articulación y el coeficiente de fricción en la articulación. En muchos casos, algunos valores son desconocidos (masas, momentos de inercia, centros de gravedad) y se requiere identificarlos para poder tener una aproximación del modelo dinámico. La forma de identificación y determinación de los parámetros dinámicos se hace de modo experimental, tomando cuatro datos por cada articulación, cada vez que hay un cambio de posición, luego se aplica un método convencional de

identificación fuera de línea y se hacen las pruebas correspondientes para validar los resultados.

La formulación de los modelos dinámicos se hace sin tener en cuenta los efectos de la fricción en los actuadores y en la articulación, estos se adicionan al modelo como un término que depende de la velocidad de la articulación y coeficiente de fricción (que en muchos casos hay que identificar experimentalmente).

En cuanto a las formulaciones de tipo paralelas, se requiere utilizar un transputer o computador paralelo para lograr los resultados adecuados[10].

6. CONCLUSIONES

La obtención del modelo basado en la formulación de Lagrange-Euler es simple y sistemática; en sí es un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales acopladas de segundo orden. Este modelo proporciona ecuaciones de estado explícitas para la dinámica del robot y se pueden utilizar para analizar y diseñar estrategias de control para las articulaciones. Este método requiere mucho tiempo de operación matemática, así que esta formulación necesita simplificarse para trabajar en tiempo real.

Como alternativa para derivar ecuaciones de movimientos más eficientes, se dirigió la atención a desarrollar algoritmos para calcular las fuerzas y torques basados en las ecuaciones de Newton-Euler. Las ecuaciones dinámicas resultantes son un conjunto de ecuaciones recursivas hacia adelante y hacia atrás. Este conjunto de ecuaciones se puede aplicar secuencialmente a los elementos del robot. El resultado más significativo es que el tiempo de cálculo de las fuerzas y torques es linealmente proporcional al número de articulaciones del brazo e independiente de la configuración del mismo. Este algoritmo permite realizar el control en tiempo real simple de las variables de articulación

del robot.[2]

El algoritmo de Newton-Euler es fácil de adecuar en el computador por su forma recursiva y su formulación simplificada.

La obtención de modelos con redes neuronales es una posibilidad prometedora y muy eficiente[9]

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1.] VUKOBRATOVIC.M, POTKONJANK.V, Dynamics of Manipulation Robots, Springer-Verlang, Berlín, 1982.
- [2.] FU.K.S, GONZÁLEZ.R. C, LEE. C.S.G, Robótica: Control, detección, visión e inteligencia, McGraw-Hill, Bogotá, 1989.
- [3.] VUKOBRATOVIC.M, POTKONJANK.V, Applied Dynamics and CAD of Manipulation Robots, Springer-Verlang, Berlín, 1985.
- [4.] PARKIN.R.E, Applied Robotic Analysis, Prentice Hall, New Jersey, 1991.
- [5.] GROOVER.M y otros, Robótica Industrial. Tecnología, programación y aplicaciones, McGraw-

Hill, Bogotá, 1989.

- [6.] HEMATI.N, Modeling Multi D.O.F. Robots as Coupled Lorentz-Type Systems, Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol 2, 1994, pp. 1541-1546.
- [7.] PAPADOPOULOS.E, ABU-ABED.A, Design and Motion Planning for a Zero-Reaction Manipulator, Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol 2, 1994, pp. 1554-1559.
- [8.] MCINNIS.B.C, LIU.C.K, Kinematics and Dynamics in Robotics: A Tutorial Based Upon Classical Concepts of Vectorial Mechanics, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol RA-2, No 4, 1986, pp. 181-187.
- [9.] ESKANDARIAN.A, BEDEWI.N.E, KRAMER.B.M, BARBERA.A.J, Dynamics Modeling of Robotic Manipulators Using an Artificial Neural-Network, Journal of Robotic Systems, vol. 11, issue 1, 1994, pp. 41-56.

- [10.] POND.B, Parallel Algorithms for Dynamics of Robotic Manipulators, M.A.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Victoria, 1993, <http://www.me.uvic.ca/~bpond/publications/>

AUTOR

José Tomas Buitrago Molina

Ingeniero Mecánico Universidad del Valle. Estudiante de Maestría en Automática en la Universidad del Valle. Profesor Auxiliar - Cátedra de Automática y Robótica de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica en la Universidad del Valle. Áreas de interés: robótica y sistemas de control. Ce: buitrago@maxwell.univalle.edu.co

