

Simulación dinámica en tiempo real de sistemas multicuerpo complejos en computadores de gama media.

J. CUADRADO ARANDA, J. CARDENAL CARRO, P. MORER CAMO y E. BAYO PEREZ
Dep. Ing. Naval y Oc. e Ing. Mecánica, Universidad de La Coruña, Campus de Esteiro, 15403 Ferrol
E.mail: javicquad@cdf.udc.es

Resumen

La simulación del comportamiento dinámico en tiempo real de sistemas multicuerpo complejos (automóviles, robots, satélites, cuerpo humano, tractores, grúas, etc.) sólo puede ser alcanzada hoy en día recurriendo a computadores de gran potencia de cálculo y muy elevado coste. Ello hace que sea una posibilidad únicamente al alcance de algunos centros estatales o de grandes empresas multinacionales, entidades capaces de asumir la fabulosa inversión que dicho hardware supone. La simulación dinámica en tiempo real puede ser de utilidad para el diseño mecánico (*virtual prototyping*), para el testeo de componentes físicos reales (*hardware-in-the-loop*), para la construcción de entrenadores de personal (*man-in-the-loop*) o para el desarrollo de sistemas de control inteligente abordo de vehículos (IVCS).

Este trabajo muestra que existe la metodología necesaria para lograr esas mismas simulaciones en tiempo real en computadores de gama media, estaciones de trabajo multiprocesador con un coste del orden de 10 millones de pesetas. De esta forma, la simulación en tiempo real puede convertirse en una herramienta asequible para gran variedad de empresas que, incluso en muchos casos, no habrán de adquirir el computador por estar ya empleándolo para otros fines (CAD, análisis por elementos finitos, etc.). La metodología, consistente en una adecuada combinación de procedimientos de modelización, formulaciones dinámicas, algoritmos de integración numérica, técnicas de manipulación de matrices dispersas y trabajo de procesadores en paralelo, es aplicada a la simulación de la dinámica de un sistema multicuerpo realista: el modelo completo de un vehículo automóvil. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad del tiempo real en estaciones de trabajo de gama media.

1. Introducción

Las herramientas informáticas de análisis y simulación (CAE) se utilizan cada vez con más profusión en el diseño industrial, ya que permiten reducir notablemente el ciclo de diseño y, por tanto, producir a un coste menor y lanzar al mercado los productos con rapidez. Más en concreto, dentro del amplio espectro de herramientas de análisis disponibles en la actualidad, los programas de cinemática y dinámica de máquinas y mecanismos son ampliamente utilizados por los fabricantes de automóviles, robots, maquinaria pesada, productos biomecánicos y las industrias aeroespacial y militar, por citar algunos ejemplos. Si bien para muchas aplicaciones el tiempo empleado por el computador en llevar a cabo el análisis dinámico no es una cuestión crucial, existen otras cuya propia esencia exige que los cálculos sean realizados en tiempo real. Ejemplos son los montajes con *hardware-in-the-loop*, en los que un componente real se introduce en la simulación; los dispositivos con *man-in-the-loop*, cuyo objeto es el entrenamiento de personal; el prototipado virtual, que

permite al diseñador interactuar con el modelo y constatar inmediatamente el efecto de modificaciones en el diseño; y los sistemas de control inteligente de vehículos, que hacen a los transportes más cómodos y seguros. Los programas comerciales existentes son capaces de proporcionar dinámica en tiempo real en computadores convencionales solamente para sistemas mecánicos pequeños y puramente académicos. Sin embargo, cuando se aborda la simulación del comportamiento de sistemas multicuerpo complejos y realistas, que son los que realmente interesan en las aplicaciones industriales, se hace preciso disponer de grandes computadores de muy elevado coste que compensen con su potente hardware la limitada eficiencia de los códigos.

En un artículo anterior, Cuadrado y otros (1997), los autores comenzaron un estudio sobre los diferentes factores que influyen en el proceso de simulación: modelización matemática del problema, formulación de las ecuaciones dinámicas e integración numérica de las mismas. Tenían la impresión de que la adecuada combinación de estos factores dependía de las características del sistema mecánico a analizar. No sería, por tanto, correcto hablar del mejor método de análisis dinámico, sino del mejor método para resolver un problema determinado, y así se introducía el concepto de simulación inteligente: elección de los factores en función del caso a estudiar. En dicho artículo se desarrollaron cuatro métodos que fueron probados para descubrir a qué tipo de problemas se adaptaba mejor cada uno. Para ello, se dispuso una serie de ejemplos que contenían cadenas cinemáticas abiertas y cerradas, posiciones singulares, ecuaciones de restricción redundantes y sistemas con elevada rigidez. Los resultados obtenidos llevaron a concluir que había dos métodos superiores a los demás: una formulación de Lagrange aumentada en índice-3 con proyecciones, y una formulación totalmente recursiva. Sin embargo, ninguno de los ejemplos era lo suficientemente grande para permitir generalizar las conclusiones a sistemas mecánicos complejos y realistas. El caso más grande estudiado contenía 23 variables cuando se modelizaba en coordenadas dependientes, mientras que los modelos realistas de vehículos, satélites, robots o humanos superan las 150 variables. Además, no se tuvieron en cuenta cuestiones como la paralelización o las técnicas para matrices dispersas, que adquieren relevancia cuando el tamaño del problema aumenta.

Las razones comentadas han llevado a los autores a presentar este nuevo artículo. En él, los dos mejores métodos mencionados se utilizan para resolver la dinámica de un vehículo militar todo-terreno, sometido a diversas maniobras de gran exigencia. El tamaño de este problema es 168. La influencia de la paralelización del código para el trabajo simultáneo en varios procesadores y la tecnología de matrices dispersas es también objeto de estudio. A partir de los resultados obtenidos, se concluye que la dinámica en tiempo real de sistemas mecánicos realistas puede ser alcanzada en estaciones de trabajo de gama media.

2. Formulaciones dinámicas

Por limitaciones de espacio, no se van a describir aquí los dos métodos seleccionados para la resolución de la dinámica, sino que se indicará dónde encontrarlos. Cada método consta de la formulación dinámica propiamente dicha, esto es, las ecuaciones del movimiento; de la técnica de modelización del problema, es decir, los parámetros o variables que sirven para definir el sistema multicuerpo; y del procedimiento de integración numérica empleado para resolver las ecuaciones diferenciales planteadas.

El primer método consiste en una formulación dinámica de Lagrange aumentada en índice-3. La modelización se lleva a cabo en coordenadas dependientes, concretamente en coordenadas naturales, García de Jalón y Bayo (1994). El integrador es la regla trapezoidal, implícito, de paso simple. Tomando las posiciones como variables primarias, se combina el integrador con las ecuaciones del movimiento para llegar a un sistema no lineal de ecuaciones algebraicas donde las incógnitas son las posiciones en el instante de tiempo siguiente. Dicho sistema se resuelve mediante el procedimiento iterativo de Newton-Raphson, utilizando una matriz tangente aproximada. Alcanzada la convergencia en posiciones, se realizan proyecciones para limpiar las velocidades y aceleraciones proporcionadas por el integrador. La explicación detallada de este método puede encontrarse en Bayo y Ledesma (1996).

El segundo método es una formulación topológica y totalmente recursiva de orden $O(N)$ basada en el *método de la inercia articulada* expuesto en Featherstone (1987). La modelización se lleva a cabo mediante coordenadas relativas. El integrador es de nuevo la regla trapezoidal, implícito, de paso simple. En esta ocasión se emplean las aceleraciones como variables primarias, de manera que el sistema no lineal de ecuaciones planteado por el integrador se resuelve mediante iteración de punto fijo. En cada paso de la iteración se precisan las aceleraciones, que se obtienen de evaluar la función, esto es, de resolver las ecuaciones de la dinámica. La explicación detallada de este método puede encontrarse en Jiménez (1993). El método es relativamente simple para cadenas abiertas, pero se torna enormemente complicado y difícil de generalizar cuando aparecen cadenas cerradas, debiéndose abrir éstas mediante técnicas tales como el *cut-joint*, Bae y otros (1988), que elimina o *corta* un par en cada cadena cerrada.

3. El ejemplo y las maniobras

Para comparar los dos métodos mencionados se va a resolver la dinámica de un sistema multicuerpo realista y complejo. El ejemplo elegido es un vehículo militar todoterreno denominado Bombardier Iltis, descrito en Iltis Data Package (1990), y que fue propuesto por la industria automovilística europea como banco de pruebas para los programas de dinámica de mecanismos. El vehículo incorpora cuatro suspensiones idénticas (ver figura 1) cuyas características son:

– Un *amortiguador*, que proporciona una fuerza disipativa que viene dada por la siguiente expresión no lineal:

$$F_D = 9945.627v + 33955.72v^2 - 59832.25v^3 - 395651.0v^4 \text{ [N]} \text{ for } -0.2 < v < 0.21 \text{ m/s}$$

$$F_D = -416.42 + 1844.3v \text{ [N]} \text{ for } v < -0.2 \text{ m/s}$$

$$F_D = 1919.1638 + 1634.727v \text{ [N]} \text{ for } v > 0.21 \text{ m/s}$$

y una fuerza elástica debida a un polímero externo dada por

$$F_S = -4.0092 * 10^6 + 2.8397 * 10^7 x - 6.7061 * 10^7 x^2 + 5.2796 * 10^7 x^3 \text{ [N]}$$

donde la distancia x se ha definido en metros.

– Una *ballesta*, modelizada con un resorte lineal de rigidez 35,900 N/m.

– Un *neumático*, cuya rigidez radial es 460,000 N/m. La fuerza lateral y el momento de alineamiento se obtienen por aplicación del modelo de Calspan, que puede encontrarse en Bonn y Keenan (1974).

Por supuesto, existe también un sistema de dirección, guiado cinemáticamente durante las maniobras. La masa total del vehículo es de unos 1500 Kg.

La figura 1 muestra la modelización del problema en coordenadas naturales (izquierda, 168 variables) y en coordenadas relativas (derecha, 43 variables), ilustrando en este segundo caso la apertura de las cadenas cerradas mediante la técnica del *cut-joint*.

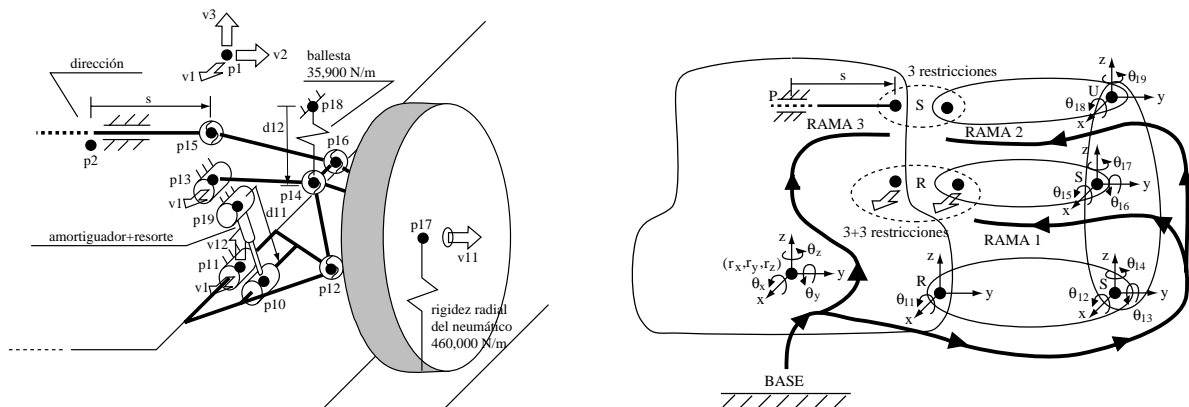


Fig.1. Modelización del Iltis en coordenadas naturales y en coordenadas relativas.

En la primera maniobra, que se llamará Simul1, el vehículo parte de la horizontal con una velocidad de 5 m/s, sube una rampa y desciende por unos escalones, llegando de nuevo a la horizontal, donde se estabiliza. La maniobra dura 10 segundos y el vehículo sufre aceleraciones de hasta 5g. La figura 2 muestra un instante de la maniobra junto con la aceleración del centro de masas del vehículo a lo largo de la misma.

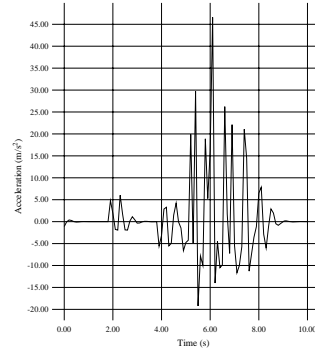
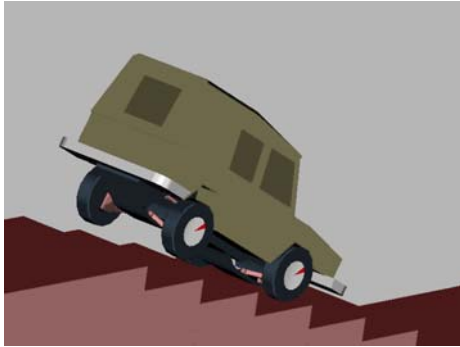


Fig. 2. Maniobra Simul1.

En la segunda maniobra, Simul2, el vehículo parte de la horizontal a 5 m/s, y asciende una rampa en el lado izquierdo para caer de nuevo a la horizontal, donde se estabiliza. La maniobra dura 10 segundos. La figura 3 muestra un instante de la maniobra así como la historia de la aceleración del centro de masas del vehículo.

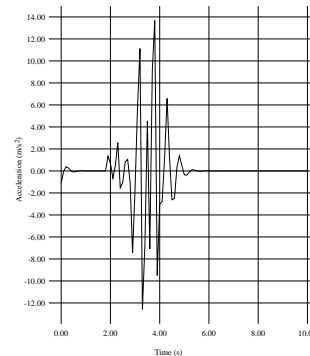


Fig. 3. Maniobra Simul2.

En la tercera maniobra, Simul3, el vehículo parte en horizontal a 5 m/s y sortea una serie de tres columnas en línea. La maniobra dura 10 segundos. La figura 4 muestra un instante de la maniobra junto con la aceleración del centro de masas del vehículo durante la misma.

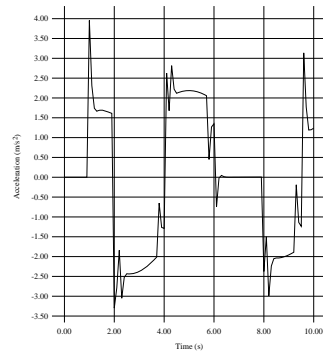
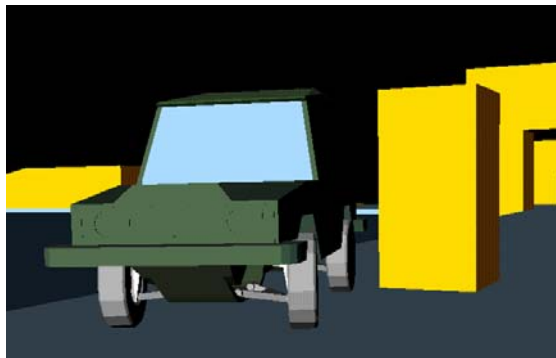


Fig. 4. Maniobra Simul3.

4. Resultados

La tabla 1 muestra los resultados de tiempos conseguidos en una estación de trabajo SGI Indigo2 IMPACT con un procesador R4400SC @ 200 MHz y 2 Mb de memoria caché. Para cada método, la primera columna indica el mejor tiempo obtenido para la simulación correspondiente, mientras que la segunda muestra el paso de tiempo de integración con el que se ha conseguido ese mejor tiempo. Recuérdese que, en todos los casos, el tiempo de simulación es de 10 segundos.

Tabla 1. Eficiencia en una máquina monoprocesador.

	Lagrange aumentado		Totalmente recursivo	
	CPU (s)	Δt (s)	CPU (s)	Δt (s)
Simul1	34	0.0175	20	0.0075
Simul2	18	0.03	14	0.0075
Simul3	27	0.025	9	0.0075

La tabla 2 muestra la reducción de tiempos, en tanto por ciento, que se logra para cada método al paralelizar el código y aumentar el número de procesadores. La máquina utilizada ha sido una SUN Sparc Station 20 con cuatro procesadores HyperSparc (RT625) @ 100 MHz y 256 Kb de memoria caché.

Tabla 2. Reducción de tiempo de CPU en % debido a la paralelización.

Número de procesadores	Lagrange aumentado	Totalmente recursivo
1	0.0	0.0
2	22.7	0.0
3	29.6	0.0
4	29.6	0.0

5. Conclusiones

A la vista de los resultados obtenidos, pueden establecerse las siguientes conclusiones:

- El método totalmente recursivo es más eficiente que el de Lagrange aumentado, pero presenta las siguientes desventajas:

a) Si hay cadenas cerradas, su formulación es mucho más complicada, y además no es generalizable, por lo que debe desarrollarse expresamente para cada ejemplo. Esto hace que no sea un buen candidato para ser implementado en programas de propósito general.

b) No obtiene ganancia de la paralelización, de manera que en máquinas multiprocesador la eficiencia de ambos métodos es similar.

c) Precisa adoptar un paso de tiempo inferior en la integración. Por este motivo, en simulaciones poco exigentes, donde el método de Lagrange aumentado puede tomar un paso muy grande, las eficiencias también se igualan.

- Las estaciones de trabajo de gama media que actualmente ofrece el mercado proporcionan unas prestaciones superiores a las utilizadas en este trabajo, por lo que puede afirmarse que la simulación en tiempo real de la dinámica de sistemas multicuerpo realistas es alcanzable hoy en día en esta clase de computadores de coste moderado.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación aportada para este trabajo por la Oficina de Investigación del Ejército de E.E.U.U. (proyecto DAAH04-95-1-0662), y la CICYT (proyecto TAP95-0226).

7. Referencias

BAE, D.S., HWANG, R.S. y HAUG, E.J. (1988) "A Recursive Formulation for Real-Time Dynamic Simulation", *1988 Advances in Design Automation*, ed. por S.S. Rao, ASME, pp 499-508.

BAYO, E. y LEDESMA, R. (1996) "Augmented Lagrangian and Mass-Orthogonal Projection Methods for Constrained Multibody Dynamics", *Nonlinear Dynamics*, vol. 9, pp 113-130.

BOHN, P.F. y KEENAN R.J. (1974) "Hybrid Computer Vehicle Handling Program", Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University Report no. DOT-HS-801 290.

CUADRADO, J., CARDENAL, J. y BAYO, E. (1997) "Modeling and Solution Methods for Efficient Real-Time Simulation of Multibody Dynamics", *Multibody System Dynamics*, vol. 1, pp 259-280.

FEATHERSTONE, R. (1987) *Robot Dynamics Algorithms*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

GARCIA DE JALON, J. y BAYO, E. (1994) *Kinematic and Dynamic Simulation of Multibody Systems*, Springer-Verlag, Berlin.

ILTIS DATA PACKAGE (1990) IAVSD Workshop, Herbertov, Czechoslovakia.

JIMENEZ, J.M. (1993) "Formulaciones Cinemáticas y Dinámicas para la Simulación en Tiempo Real de Sistemas de Sólidos Rígidos", Tesis Doctoral, Universidad de Navarra, España.