

## Interacción virtual con sistemas mecánicos mediante técnicas de dinámica multicuerpo

A. Luaces, M. González

Universidade da Coruña  
aluaces@udc.es

---

### Resumen

*Las técnicas avanzadas de dinámica de sistemas multicuerpo permiten simular la respuesta dinámica de sistemas mecánicos complejos en tiempo real. La integración de estas técnicas con sistemas de Realidad Virtual hará posible en un futuro próximo la simulación interactiva del ensamblaje, puesta en marcha y comportamiento de cualquier sistema mecánico virtual, pudiendo validar su diseño y proceso de montaje o reparación sin necesidad de construir un prototipo real.*

*Este trabajo describe un sistema de interacción con sistemas mecánicos virtuales, compuesto por tres subsistemas: captura de movimiento, dinámica multicuerpo y visualización tridimensional.*

---

### INTRODUCCIÓN

El proceso de la elaboración del prototipo de un producto es una de las fases más importantes de su desarrollo, y a la vez de las que más recursos demanda, en tiempo y coste. Una alternativa para disminuir este impacto es minimizar tanto como sea posible el requerimiento de construir los prototipos mediante su simulación por ordenador. Mediante la simulación por ordenador se puede verificar que el prototipo cumple los parámetros de diseño en cualquier momento de su vida, como su fabricación, puesta en marcha, ergonomía o rendimiento de una manera rápida y con escasa demanda de recursos [1].

A lo largo del tiempo, los aspectos en los que las simulaciones pueden sustituir a los modelos reales aumentan. De meras comprobaciones geométricas se pasa al análisis de esfuerzos, pruebas de rendimiento, etc. El proyecto que se describe en este artículo trata de ahondar en el problema de la manipulación interactiva de mecanismos virtuales, un campo muy atractivo para los investigadores debido a las ventajas que ofrece sobre las técnicas tradicionales de diseño [2].

El comportamiento dinámico de los mecanismos simulados se apoya en eficientes técnicas de cálculo de sistemas multicuerpo. Mediante un sistema de captura de movimiento, el usuario puede transmitir sus acciones al prototipo virtual y manipularlo en tiempo real, constituyendo un sistema denominado *human-in-the-loop*.

### CAPTURA DE MOVIMIENTO

La interacción del usuario con el mecanismo virtual, tal y como se ha reseñado, viene dada por sus movimientos en el entorno virtual. Actualmente los datos que se recolectan en cada instante de tiempo son las posiciones de la cabeza y las manos del usuario. La posición de la cabeza permite representar la escena desde el punto de vista del usuario, mientras que las posiciones de las manos, además de ubicarlas en el entorno, sirven para computar las posibles fuerzas de reacción que surgirían en el caso de un contacto entre el usuario y el mecanismo simulado.

Para obtener estos datos se han empleado tradicionalmente diversos sistemas de sensorización, como acelerómetros, dispositivos magnéticos, ópticos, etc.

El proyecto emplea doce cámaras infrarrojas para este fin, dada la libertad de movimientos que permiten y la precisión adecuada que presentan, de unos 3mm. Las cámaras captan al usuario dentro del espacio de trabajo,

que es aproximadamente de 3 x 3 x 3 metros. Se posicionan con la intención del que todo el área de trabajo esté completamente cubierta por su volumen de captura, y que cada punto de este área sea visto por el mayor número de cámaras posible. Las posiciones de cualquier punto se pueden registrar adhiriéndole un pequeño marcador reflectante. La luz infrarroja del ambiente y la que las cámaras emiten en menor medida es reflejada intensamente por los marcadores, por lo que a partir de cada una de las imágenes que obtiene cada una de ellas, el sistema puede obtener su posición tridimensional.

Los sistemas de captura ópticos como el empleado presentan como ventajas la obtención directa de las coordenadas de los puntos que se desea ubicar, en lugar de proporcionar otro tipo de datos relacionados, como las aceleraciones. Las coordenadas que se podrían obtener tras la integración de dichas aceleraciones tendrían altos niveles de ruido y serían bastante más imprecisas. Además, los sistemas ópticos permiten al usuario disponer de una gran libertad de movimientos, puesto que no se ve entorpecido por cables o cualquier otro dispositivo. Por último, el seguimiento individual de cada uno de los puntos permite agruparlos en sólidos rígidos para conocer sus trayectorias, pero también tratar a ciertos marcadores de manera especial, de tal manera que se puedan obtener algunos parámetros interesantes adicionales. Un ejemplo podría ser la posición de cada uno de los dedos de la mano en base al sólido rígido de la palma de la mano cuando se han marcado las puntas de los dedos. Tal grado de detalle es muy difícil de conseguir en otros sistemas en los que el elemento que actúa como seguidor es mucho más caro o aparatoso.

Como desventajas, cabe mencionar la posibilidad de la oclusión de algún marcador si cualquier objeto logra ocultarlo a la mayoría de las cámaras durante la operación, un efecto que se acentúa cuantas menos cámaras se empleen o cuanto más lejos se encuentren los puntos de ellas. También es posible que ciertos reflejos provocados por la luz de ambiente que incida en la escena puedan ser considerados por el sistema como marcadores. Esto provoca que el área de trabajo necesite poca luz incidente, suave o tenue, aunque también se puede corregir con gran efectividad con marcadores activos de L.E.D.s emisores o lámparas infrarrojas.

El sistema de cámaras incorpora un software que realiza su propia calibración y computa posteriormente las posiciones 3D de todos los marcadores, además de la posición y orientación de los sólidos rígidos que se hayan compuesto a partir de la agrupación de varios marcadores. Estos datos pueden ser escritos a disco o bien enviados mediante la red a cualquier otro ordenador en tiempo real, como en el caso descrito en este artículo. La frecuencia de actualización de los datos suele encontrarse próxima a los 100Hz, aunque no es en absoluto constante, puesto que depende de la dificultad del problema de posicionamiento de los marcadores en ese instante y de la latencia de la red.

El programa desarrollado captura los datos enviados por el sistema de cámaras, los procesa y envía a la simulación multicuerpo, donde se emplean como parámetros de entrada. En concreto, se emplean para posicionar los sólidos que representan las manos y la cabeza del usuario, de tal manera que se pueda conocer en cada instante si se produce una colisión entre éstas y cualquier parte del mecanismo, y en tal caso calcular las fuerzas de reacción que les corresponde.

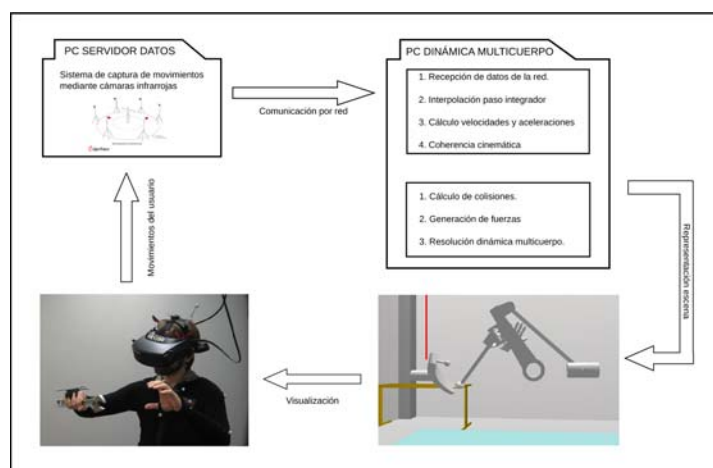


Fig. 1: Esquema general del simulador

Para introducir dichos objetos en la simulación multicuerpo es necesario conocer adicionalmente su velocidad y aceleración en todo momento. El postproceso de los datos que llegan del sistema remoto realiza esas operaciones, además del acondicionamiento de la señal, que se trata a continuación.

En primer lugar, las trayectorias de los puntos presentan ruido. Dichas perturbaciones provienen de la naturaleza del sistema de captura. La resolución y profundidad de color limitadas de las imágenes digitales captadas causa que la representación de los marcadores difiera en instantes consecutivos en unos pocos píxeles. Así, las coordenadas del punto, halladas mediante el cómputo del centroide de dichos píxeles, oscila aunque dicho punto esté inmóvil en realidad. El filtro más adecuado para este tipo de ruido, de naturaleza aleatoria, es la media móvil [3]. Los datos de posición se calculan a partir de la media de las últimas  $n$  muestras recepcionadas.

A la hora de introducir estos datos en la simulación multicuerpo, se debe verificar que se cumplan las restricciones impuestas antes de introducirlos. De lo contrario, el problema nunca convergería hacia una solución dado que se estaría introduciendo unas condiciones incompatibles. Aunque anteriormente se haya eliminado el ruido de la señal, nada garantiza que dichas coordenadas guarden las proporciones geométricas que existen entre los puntos. Se debe verificar, para los puntos que constituyen un sólido rígido, que no varíen las distancias existentes entre sí a lo largo de la simulación. Para ello se impone la consistencia cinemática [4], que aproxima gradualmente dichos puntos hasta que se satisfacen las restricciones  $\Phi$ , como se indica en la Ec.(1), donde  $\hat{\mathbf{q}}$  representa las coordenadas recién obtenidas,  $\mathbf{W}$  la matriz de peso para cada punto y  $\mathbf{q}$  las coordenadas corregidas. En este caso, el valor de  $\mathbf{W}$  es la identidad, dado que la importancia de todos los puntos es idéntica.

$$\min V(\mathbf{q}) = \frac{1}{2}(\mathbf{q} - \hat{\mathbf{q}})^T \mathbf{W}(\mathbf{q} - \hat{\mathbf{q}}) \quad \text{sujeto a } \Phi = \mathbf{0} \quad (1)$$

La resolución de este problema se lleva a cabo mediante la Ec.(2), en la que  $\Phi_{\mathbf{q}}$  es el jacobiano de las restricciones, y  $\alpha$  el penalizador aplicado al incumplimiento de éstas, y que determina el ritmo de convergencia. El criterio de parada elegido es la norma del vector  $\Phi$ , establecida en un valor máximo de  $10^{-8}$ .

$$\left[ \mathbf{W} + \Phi_{\mathbf{q}}^T \alpha \Phi_{\mathbf{q}} \right] \Delta \mathbf{q}_{i+1} = -\mathbf{W} \Delta \mathbf{q}_i - \Phi_{\mathbf{q}}^T \alpha \Phi \quad (2)$$

Las derivadas de las posiciones se calculan a partir de los datos capturados en varios instantes. La primera aproximación sería hallarlas mediante diferencias finitas, pero esta técnica conduce a valores muy irregulares en velocidades y aceleraciones. De nuevo en [4] se propone un método basado en un integrador de Newmark, pero empleado en este caso como derivador. Para realizar estos cálculos únicamente se necesita conocer el valor de las posiciones, velocidades y aceleraciones en el instante anterior; esto se refleja en la Ec. (3)

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{q}}_{n+1} &= \frac{1}{\beta \Delta t^2} (\mathbf{q}_{n+1} - \mathbf{q}_n) - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{\mathbf{q}}_n - \left( \frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{\mathbf{q}}_n \\ \dot{\mathbf{q}}_{n+1} &= \dot{\mathbf{q}}_n + \Delta t (1 - \gamma) \ddot{\mathbf{q}}_n + \Delta t \gamma \ddot{\mathbf{q}}_{n+1} \end{aligned} \quad (3)$$

Es necesario garantizar que estas derivadas son coherentes con las restricciones impuestas, de manera semejante a como se hace con las posiciones, de tal manera que  $\dot{\Phi} = \mathbf{0}$ ,  $\ddot{\Phi} = \mathbf{0}$ . Para ello se recurre a proyectarlas en el espacio de las restricciones, según la Ec. (4), donde las variables  $\hat{\dot{\mathbf{q}}}$ ,  $\hat{\ddot{\mathbf{q}}}$  indican las coordenadas no corregidas.

$$\begin{aligned} \left[ \mathbf{W} + \Phi_{\mathbf{q}}^T \alpha \Phi_{\mathbf{q}} \right] \dot{\mathbf{q}} &= \mathbf{W} \hat{\dot{\mathbf{q}}} \\ \left[ \mathbf{W} + \Phi_{\mathbf{q}}^T \alpha \Phi_{\mathbf{q}} \right] \ddot{\mathbf{q}} &= \mathbf{W} \hat{\ddot{\mathbf{q}}} - \Phi_{\mathbf{q}}^T \alpha \dot{\Phi}_{\mathbf{q}} \dot{\mathbf{q}} \end{aligned} \quad (4)$$

## DINÁMICA MULTICUERPO

El sistema mecánico simulado propuesto es un mecanismo biela-manivela tridimensional, compuesto por seis piezas móviles. Su comportamiento dinámico y su interacción con el usuario deben ser determinados rápida y eficientemente. El mecanismo se modeliza en coordenadas naturales [5], método que emplea principalmente los pares cinemáticos como parámetros de la posición del sistema. Para plantear las ecuaciones del movimiento, se emplea la formulación de *Lagrange aumentado de índice 3* [6], que consiste en resolver las ecuaciones de la dinámica con la adición de unas fuerzas de restricción cuya finalidad es preservar el cumplimiento de las restricciones impuestas en el problema.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \alpha\Phi_{\mathbf{q}}^T\Phi_{\mathbf{q}} + \Phi_{\mathbf{q}}^T\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{Q} \quad (5)$$

Siendo  $\mathbf{M}$  la matriz de masas del sistema,  $\Phi$  y  $\Phi_{\mathbf{q}}$  el vector de restricciones y su jacobiano respectivamente,  $\mathbf{q}$  el vector de coordenadas generalizadas,  $\mathbf{Q}$  el vector de fuerzas externas aplicadas,  $\alpha$  el penalizador asociado a las restricciones, y  $\boldsymbol{\lambda}$  los multiplicadores de Lagrange. Para cada instante de tiempo se realiza un proceso iterativo que converge hacia un valor de  $\boldsymbol{\lambda}_i$  compatible con las restricciones, actualizando su valor según

$$\boldsymbol{\lambda}_{i+1} = \boldsymbol{\lambda}_i + \alpha\Phi_{i+1} \quad (6)$$

La integración de la Ec. (5) se lleva a cabo mediante un integrador implícito, la regla trapezoidal de paso fijo [7]. El hecho de que dicho integrador sea iterativo permite combinar este proceso con la actualización de la Ec. (6) simultáneamente.

Las coordenadas correspondientes a la cabeza y manos del usuario son impuestas en el modelo multicuerpo mediante restricciones. De esta manera ambos procesos se interconectan.

Las fuerzas aplicadas en  $\mathbf{Q}$ , es decir, aplicadas al mecanismo, son las resultantes del contacto entre las manos del usuario con el mecanismo virtual. La detección de las colisiones se efectúa considerando unos pequeños volúmenes esféricos situados tanto en las manos del usuario como en las piezas constituyentes del mecanismo. Mediante el cálculo de las distancias entre los centros de dichos volúmenes se obtiene casi trivialmente las colisiones potenciales y el grado de indentación entre los objetos considerados.

El modelo empleado para el cómputo de las fuerzas de reacción resultantes del contacto es puntual, lineal y elástico. Se considera también una disipación viscosa de primer orden unilateral, es decir, que actúa en mayor medida cuando los cuerpos en contacto se acercan entre sí [8].

$$\mathbf{F}_{\text{radial}} = \left( -k_m \Delta x - \text{amort} \cdot c_m \left( \mathbf{v}^T \mathbf{n}_{\text{superficie}} \right) \right) \mathbf{n}_{\text{superficie}} \quad (7)$$

$$\text{amort} = \begin{cases} 1 & \text{si } \mathbf{v}^T \mathbf{n}_{\text{superficie}} \leq 0 \\ \text{hister}_{cm} & \text{si } \mathbf{v}^T \mathbf{n}_{\text{superficie}} \geq 0 \end{cases}$$

En la Ec. (7),  $k_m$  es la rigidez del contacto,  $\Delta x$  es la indentación entre los objetos,  $c_m$  es la disipación de primer orden,  $\mathbf{v}$  la velocidad relativa del punto de contacto del primer objeto considerado con respecto al segundo, y  $\mathbf{n}_{\text{superficie}}$  el vector normal perpendicular a la superficie de este último.  $\text{hister}_{cm}$  es el valor de histéresis aplicado al amortiguamiento cuando los objetos se separan. Se especifica un límite en el valor de las fuerzas de contacto, puesto que como el usuario no dispone de un sistema de retorno de fuerzas, podría atravesar cualquier objeto inadvertidamente.

La integración de las ecuaciones del movimiento se lleva a cabo en pasos de tiempo fijos, de 1 milisegundo de duración. Sin embargo, la tasa de actualización de los datos que provienen del sistema de captura no coincide en general con la frecuencia de integración. Además, el espacio de tiempo transcurrido entre la recepción de cada uno de los datos provenientes tampoco es fijo, por lo que es necesario realizar una interpolación para obtener las coordenadas de los objetos sincronizadas con el sistema multicuerpo. Actualmente se emplea una sencilla interpolación lineal entre dos muestras, aunque es posible implementar otros modelos de interpolación, puesto que el sistema de preproceso de los datos de entrada del sistema multicuerpo se realiza en un proceso independiente.

## VISUALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL

La visualización del proceso simulado tiene como objetivo la inmersión del usuario en el entorno, servir como referencia espacial para las operaciones realizadas y posibilitar la supervisión del trabajo que se realiza por parte de terceras personas. Hay varios sistemas y configuraciones de visualización para responder a todos estos requerimientos. En este proyecto se han empleado sistemas de visualización subjetiva y visualización por pantalla, siendo ambos estereoscópicos.

El sistema de visualización subjetiva consiste en un casco de realidad virtual *Virtual Research VR-1280* [9], que dispone de dos entradas de vídeo. Las imágenes que se envían al casco son las que corresponden a cada uno de los ojos del usuario, empleando para ello la información de la posición de la cabeza, que indica el punto de vista adecuado. Cuando el usuario ve las dos imágenes en las pantallas portátiles de las que dispone el dispositivo, se logra crear una sensación estereoscópica. Además, las imágenes mostradas se corresponden en todo momento con sus movimientos. Este sistema es adecuado para montajes de mecanismos de gran tamaño, en el que el usuario tenga que desplazarse prácticamente por todo el área de trabajo.

El sistema de visualización por pantalla consiste en dos proyectores con filtros de polarización cuyas proyecciones se superponen en la misma pantalla. El usuario lleva unas gafas que también incorporan filtros de polarización, de tal forma que sólo puede ver una de las dos imágenes en cada ojo. Este caso está indicado cuando el área de trabajo es reducida, o cuando hay varias personas y una de ellas lleva puesto el casco, de tal manera que puedan estar viendo la operación, tanto desde el punto de vista de éste como desde otro cualquiera. Las desventajas consisten en que los usuarios deben situarse preferentemente de frente a la pantalla, y cerca de ésta. Conforme éstos se alejan, la sensación estereoscópica se verá degradada. Es posible emplear uno solo de los proyectores, si no se necesita el efecto estereoscópico, por ejemplo en tareas de supervisión.

## CONCLUSIONES

El simulador de interacción virtual con sistemas mecánicos está en sus primeras fases de desarrollo. Actualmente es posible alterar el comportamiento de los mecanismos de una manera limitada; el usuario puede empujar con sus manos las piezas virtuales y modificar su movimiento, influyendo al resto del mecanismo. Se pretende mejorar esta interacción por medio de modelos de contacto más sofisticados entre los objetos que colisionan, dependientes de la intersección de las mallas tridimensionales que los definen y no de modelos simplificados de esferas como hasta ahora. También se pretende introducir más parámetros derivados de la posición del usuario en el entorno además de sus manos, como por ejemplo la posición de las extremidades de su cuerpo, de los dedos de cada mano o la introducción de herramientas con las que manipular el mecanismo.

De igual manera, se proyecta la incorporación simultánea de varios usuarios, e incluso su colaboración mutua en las tareas a realizar. Otro punto a desarrollar es la posibilidad de realizar tareas de montaje y desmontaje de mecanismos, en lugar de la simple interacción con ellos. Para ello se emplearán modelos de fuerza de contacto más complejos, que tienen en cuenta el rozamiento existente en las operaciones de agarre de las piezas.

## REFERENCIAS

- [1] J. Ritchie, *Virtual Environments - the Eco-Friendly Approach to Product Design?*, Product Engineering, Springer, (2005), Part 1, 77-88.
- [2] S. Jayaram et al., *Industry case studies in the use of immersive virtual assembly*, Virtual Reality 11(4), (2007), 217-228.
- [3] S.W. Smith, *The Scientist & Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, California Technical Pub., (1997), 277.
- [4] F.J. Alonso et al., *A compact smoothing-differentiation and projection approach for the kinematic data consistency of biomechanical systems*, Multibody System Dynamics, (2010), 1(24), 67-80.
- [5] J.García De Jalón et al., *Natural coordinates for the computer analysis of multibody systems*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, (1986), 56 (3), 309-327.
- [6] J. Cuadrado et al., *A Comparison in Terms of Accuracy and Efficiency between a MBS Dynamic Formulation with Stress Analysis and a Non-linear FEA Code*, Int. Journal for Numerical Methods in Engineering, (2001), 51(9), 1033-1052.
- [7] J. Cuadrado et al., *Penalty, Semi-Recursive and Hybrid Methods for MBS Real-Time Dynamics in the Context of Structural Integrators*, (2004), Multibody System Dynamics, 12(2), 117-132.
- [8] K.H. Hunt, Crossley F., *Coefficient of Restitution Interpreted as Damping in Vibroimpact*, (1975), Journal of Applied Mechanics – Transactions of the ASME, 42, 440.
- [9] Virtual Research Systems Incorporated, <http://www.virtualresearch.com/products/vr1280.htm>.