

# Técnica de Corte para Objetos Deformables

## *Technique of Court for Deformable Objects*

Leonardo Rafael Fernández Ruiz, Lester Oscar Rodríguez González

Universidad de las Ciencias Informática

[{lfernandez, lorodriguez}@uci.cu](mailto:{lfernandez, lorodriguez}@uci.cu)

### Resumen

La simulación quirúrgica es una técnica prometedora para el entrenamiento de estudiantes de medicina y la planificación de cirugías. Un requerimiento importante para tal sistema de simulación es un método capaz de generar cortes en modelos deformables. Este trabajo presenta el estado de arte de las principales técnicas usadas en el mundo en el campo de la deformación haciendo énfasis en sistemas de masa resorte y elementos finitos (FEM). Además presentamos brevemente las tres técnicas fundamentales para ejecutar procedimientos de corte. El objetivo principal de este trabajo es proponer una solución para simular el proceso de corte en un modelo superficial con deformación basada en un sistema de masa resorte; tratando las interacciones con colisiones exactas, cambiando la topología de las estructuras el introducir nuevos elementos con el paso del instrumento de corte.

**Palabras clave:** Colisión, corte, sistema masa – resorte, superficial.

### Abstract

*Surgical simulation is a promising technology for training medical students and surgery planning. An important requirement for such simulation systems is a method to generate realistic cuts through soft tissue models. This work present an overview of main techniques uses in the world in the field of deformation doing emphasis in mass- spring and finite element method (FEM). Also we present and discuses a three main techniques for performance cutting procedures. The main goal this paper is propose a solution for a surface mass- spring model to simulate a virtual cutting operation; we handle interaction with exact collision detection algorithms, doing changes introducing new structures with motion of cutting tool.*

**Key words:** Collision, cutting, mass – spring, surface.

### Introducción

El corte es una manipulación o proceso común que puede ser simulado en entornos virtuales, ejemplo de esto lo constituyen, los simuladores quirúrgicos, el modelamiento de figuras, el diseño de ropas entre otras. La representación de los objetos en un entorno virtual puede ser a través de modelos superficiales o volumétricos, estos están constituidos por distintas geometrías las cuales abordaremos mas adelante en este trabajo como parte esencial para la comprensión de este trabajo.

Para lograr un nivel aceptable de realismo al realizar el corte en cuerpos blandos se necesita una solución físico – matemático que soporte las deformaciones, se han realizado disímiles estudios en este campo aportando novedosos resultados; estos ofrecen métodos fuertemente relacionados con los objetivos que se deseen alcanzar en la deformación, dados por parámetros como: rapidez, nivel de detalle en la visualización, comportamiento de los cuerpos entre otros.

Teniendo en cuenta lo anterior existen actualmente un número de técnicas que permiten la simulación del corte en mallas superficiales y volumétricas. El número de pasos intermedios para obtener un procedimiento de corte limita con frecuencia el nivel de realismo que se obtiene al aplicar un método determinado, pero en estos pasos radica la aproximación a lo que puede ser una acertada simulación el corte de mallas deformables.

Los algoritmos de corte en la simulación quirúrgica, van acoplado con la deformación y visualización de mallas. Las cuales son utilizadas para representar tanto modelos volumétricos como superficiales, dada la complejidad de aplicar un algoritmo de corte sobre un modelo volumétrico, los algoritmos de corte primeramente fueron aplicados sobre una malla superficial en [1], Basdogan y otros. Después emergen las ideas de Bruyns y Montgomery [2] introduciendo un esquema de subdivisión que mantiene más acertado la representación del corte en la superficie. Evidentemente los métodos basados en superficie, no permiten el corte en modelos volumétricos. Las investigaciones en este campo comenzaron con la idea de remover los elementos que estaban en contacto con el instrumento de corte, este fue planteado por Bro-Nielsen [3] y S. Cotin [4], más tarde retomado por Forest [5]. Los métodos más atractivos surgieron después, que son los llamados métodos de subdivisión, estos predefinen los estados posibles del corte y luego los ejecutan de acuerdo a lo que corresponda. Esto fue introducido por primera vez en el contexto médico cuando Mazura y Seifert [6], plantean el corte de una malla tetraédrica con planos predefinidos. Este algoritmo fue refinado más tarde por Mor y T. Kanade [7], abordando temas como la incisión parcial de la malla y la estrategia del corte progresivo. Finalmente Bielser [8] plantea una máquina de estados, que conserva las diferentes tipos de incisiones en una malla tetraédrica. Todos los algoritmos enunciados, tienen en común el incremento de los elementos en la malla, se ha reportado en un rango de 5 a 17 la introducción de nuevos elementos extiende los cálculos en el modelo, otro aspecto negativo es la reducción del tamaño de los tetraedros. Los problemas en la estabilidad de la deformación fueron reportados por Mor y T. Kanade [7]. Algunas de estas dificultades fueron reducidas con la adaptación que hicieron Serby y otros [9], además de Nienhuys [10]. La idea consiste en acercar los nodos que componen los ejes, al camino descrito por el instrumento de corte. Este acercamiento posibilita la incisión en la malla sin la creación de nuevos elementos, desafortunadamente surge otro problema, que es la degeneración de los elementos, cuando el instrumento de corte atraviesa la malla cerca de un nodo.

## **Metodología computacional**

### **Representación Geométrica de la Malla**

Una escena puede contener distintos tipos de objetos (nubes árboles, edificios, rocas) para los que existen una gran variedad de modelos de representación.

- Superficies poligonales
- Modelos volumétricos
- Superficies poligonales

Estos modelos se caracterizan por representar el modelo tridimensional solo en su superficie, a través de una colección de vértices y aristas, pudiendo formar a su vez polígonos.

Vértice: punto de coordenada  $(x, y, z)$

Arista: segmento de línea que une dos vértices.

Polígono: secuencia cerrada de aristas.

Existen diferentes tipos de representaciones que pueden usarse a la vez en una misma aplicación

- Explícita
- Punteros a lista de vértices
- Punteros a lista de aristas



Fig. 1: Topología de una malla poligonal.

- Cinta de triángulos para  $n$  vértices produce  $(n - 2)$  triángulos conexos.
- Abanico de triángulos para  $n$  vértices produce  $(n - 2)$  triángulos conexos.
- Malla de cuadriláteros genera una malla de  $(n - 1)$  por  $(m - 1)$  cuadriláteros para  $n$  por  $m$  vértices.

### Modelos Volumétricos

Los objetos de una escena virtual, pueden ser construidos por software para diseño (3D StudioMax, Blender, etc.), estos brindan la posibilidad de enmallar solo superficialmente. Para visualizarlos en una escena, es necesario leer la estructura del fichero, que exporta las coordenadas de los vértices de cada triángulo que conforman el modelo, materiales, luces, entre otros. En la realidad virtual están estrechamente relacionados la geometría y la informática, así es que se han creados algoritmos para generar mallas superficiales y volumétricas. Los modelos de mallas volumétricas son ampliamente difundidos para la representación de órganos y reconstrucción 3D a partir de imágenes.

Los modelos volumétricos se encuentran formados en el interior del objeto por tetraedros, hexaedros o cubos para mencionar los más comunes. Lograr esta característica implica usar algoritmos de enmallado que permitan representar al cuerpo sólido. Los principales algoritmos para este proceso se dividen en algoritmos triángulo/tetraedro y algoritmos cuadrilátero/hexaedro, por ser los primeros los más difundidos, a continuación se mencionan las categorías donde se encuentran las técnicas más usadas: Octree, Delaunay, Advancing Front.

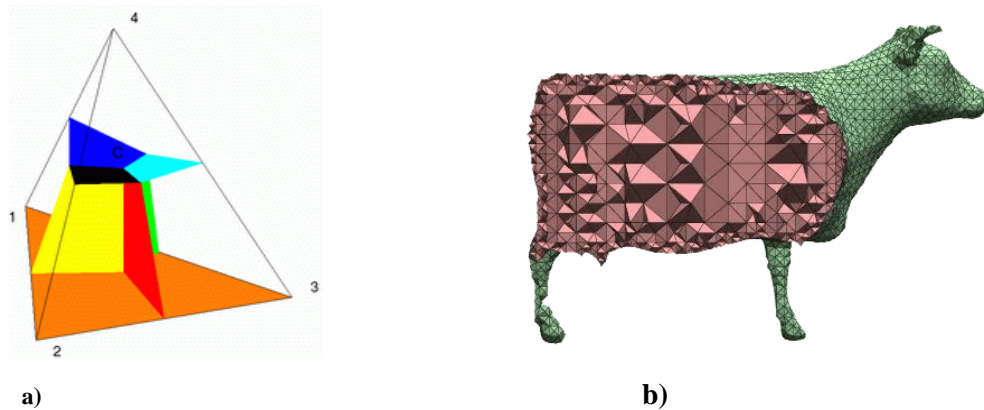


Fig. 2: a) Tetraedro b) Modelo de una vaca construido con tetraedros, algoritmo Delaunay.

### Modelos de Deformación Basados en Física

#### Sistema Masa Resorte

Es una técnica basada en física que ha sido usada amplia y efectivamente para modelar objetos blandos. El modelo físico consiste en la estructura de la red que esta conformada por nodos unidos por enlaces elásticos. La red del sistema masa resorte es mapeada en la malla geométrica haciendo coincidir la masas de los nodos con los vértices y los muelles con los lados de la malla.

#### Método de Elementos Finitos

El Método de Elementos Finitos (Finite Element Method, FEM) ha sido estudiado durante mucho tiempo, fe de ello son los trabajos de Zienkiewicz [11], Bathe [12], es uno de los más populares métodos en las Ciencias de la Computación. El método transforma la mecánica continua de la deformación en un problema individual que puede ser resuelto usando el análisis numérico.

Este método descompone el modelo en pequeños polígonos o poliedros: triángulos en 2D y tetraedros en 3D, cuyo comportamiento se especifica mediante parámetros asociados a los puntos característicos denominados nodos, en cada uno de estos elementos del campo de la deformación es expresado por una función polinomial de interpolación en cada uno de los nodos de los elementos.

### **Método Elementos de la Frontera**

El Método de Elementos de la Frontera (*Boundary Element Method*, BEM) es uno de los trabajos relacionados con la deformación de cuerpos es el realizado por James y Pai [13] usando elementos de frontera. “Constituye una alternativa interesante al método estándar de Elementos Finitos, porque el cálculo se hace en la superficie del cuerpo en lugar del volumen” [14]. El propósito de usar este método casi estático para modelar la deformación describe como los objetos interactúan con el entorno en la superficie.

### **Método Elementos Alargados**

Los modelos matemáticos para la deformación en entornos virtuales han adoptado disímiles formas. “El Método de Elementos Alargados (*Long Element Method*, LEM) ve el objeto en dos dimensiones distribuyendo los elementos llenos del un fluido incompresible. Las ventajas de este método es que el número de elementos en un orden de magnitud menos que la discretización basada en tetraedros o elementos cúbicos” [15]. En el método se asume que cada elemento está lleno con fluido. Peor al mismo tiempo cada uno de los elementos obedece la Ley Hooke el Principio de Pascal y la Ley de Conservación del Volumen son usados en condiciones límites para establecer el equilibrio.

### **Tendencias de Corte**

Una de las tareas básicas de la simulación quirúrgica es el fenómeno virtual del corte, este puede ser considerado como la interacción de un modelo virtual deformable y un cuerpo rígido, visto como herramienta de corte. En este proceso el modelo deformable es cortado y su topología geométrica sufre cambios. La mayoría de los trabajos realizados en el campo de la simulación virtual del corte, pueden ser clasificados en tres métodos fundamentales.

**Método destructivo:** Considerado en la literatura bibliográfica del tema como el primer y más antiguo método de corte, basado en el principio de destrucción, es decir consiste en eliminar el elemento que sea colisionado por la herramienta virtual de corte.

Eliminar aristas, nodos o tetraedros disminuye el número de elementos y con ello el tiempo de simulación disminuye. El método es adecuado solo para aplicaciones donde se destruye realmente el tejido, por otra parte el método viola el principio físico de la conservación de la masa, además requiere extensos procesos de refinamiento de la malla para mantener el realismo

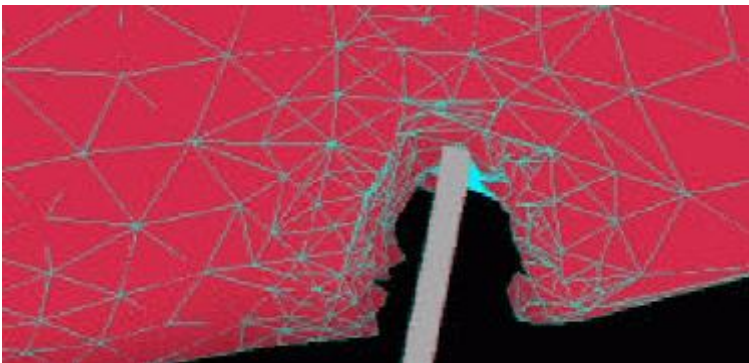


Fig. 3: Ejemplo de Corte destructivo Cotin 1998.

**Metodo de subdivisión:** El proceso basa su principio en la subdivisión de los elementos colisionados por la herramienta virtual de corte, se subdivide cada tetraedro interceptado por la herramienta de corte considerando las distintas formas en que un tetraedro pueda ser cortado. Para simular un corte progresivo mientras que la herramienta esta dentro del modelo se crean tetraedros temporales, una vez que la herramienta sale del modelo los tetraedros son destruidos y sustituidos por un conjunto de mínima cantidad de tetraedros determinado por la trayectoria de la herramienta virtual.



Fig. 4: Los 5 cortes predefinidos para el método de subdivisión A.B. Mor y Kanade 2000.

**Método de Separación:** Otra idea para simular el corte es el método de separación, ajustando la superficie de corte a nodos significativos en el modelo, este método basa el corte en el principio de separar las primitivas en vez de eliminarlas o subdividir las. En las primitivas que son colisionadas por la herramienta virtual, se duplican los nodos significantes para el corte y se procede a la separación apoyándose en estos nodos. Nienhuys describe en su las tres partes importantes del desarrollo del corte por la vía de la separación: La selección de la superficie de corte, la ruptura de los nodos y la eliminación de las degeneraciones.

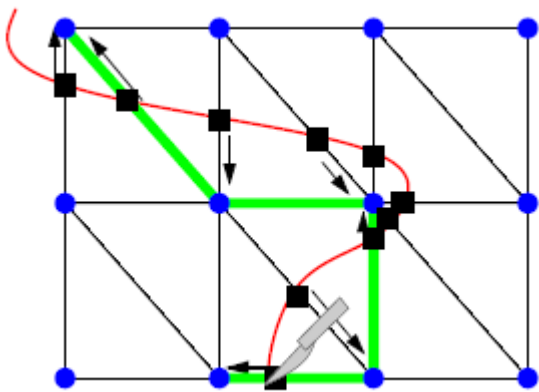


Fig. 5: Selección de los nodos cercanos a la trayectoria de la herramienta de corte.

### Soluciones Técnicas

Para darle solución al problema empleamos el método corte progresivo en modelo superficial basado en la idea que exponen Hui Zhang y otros [16].

Como su nombre lo indica se ejecuta el corte sobre una malla superficial. En el trabajo se definen términos importantes como estado de contacto y estado de penetración, el primero cuando no hay suficiente fuerza para penetrar el modelo y en el segundo cuando el instrumento de corte penetra el modelo superficial de modo que la deformación esta basada en un sistema masa - resorte.

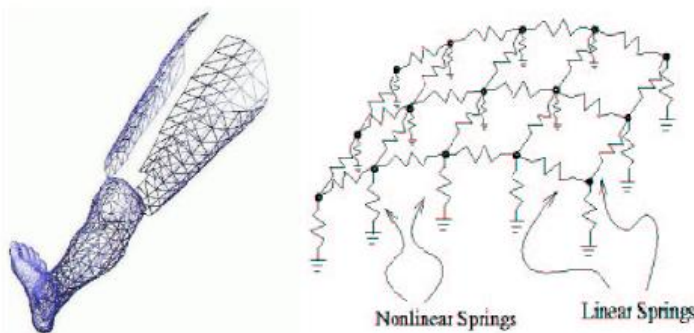


Fig. 6: Red de un sistema masa – resorte para un pierna.

El proceso de detección de colisiones se realiza localmente consultando a los triángulos vecinos de los interceptados en cada momento, garantizando así que la detención global de colisiones solo se utilice para encontrar la primera interacción; con la

intención de lograr eficacia en el funcionamiento del sistema. Basados en la fase exacta de los algoritmos de detección de colisiones se obtiene los puntos donde interactúa el instrumento de corte, reducido a termino de un segmento para comprobar interacción entre los triángulos y lados vecinos.

**Prueba de Colisiones:**

- Segmento – plano
- Segmento – segmento

El algoritmo define dos fases esenciales la primera se encarga subdividir las entidades que conforman la malla en el contacto inicial y final la segunda intermedio, maneja los cambios de la topología de la malla en el transcurso de la operación de corte.

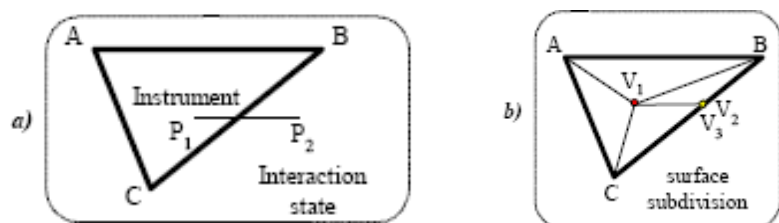


Fig. 7: Modificación de la malla estado inicial - final.



Fig. 8: Modificación de la malla estado intermedio.

**Resultados**

Los resultados se exponen en la siguiente figura como muestra los avances en esta técnica de corte.

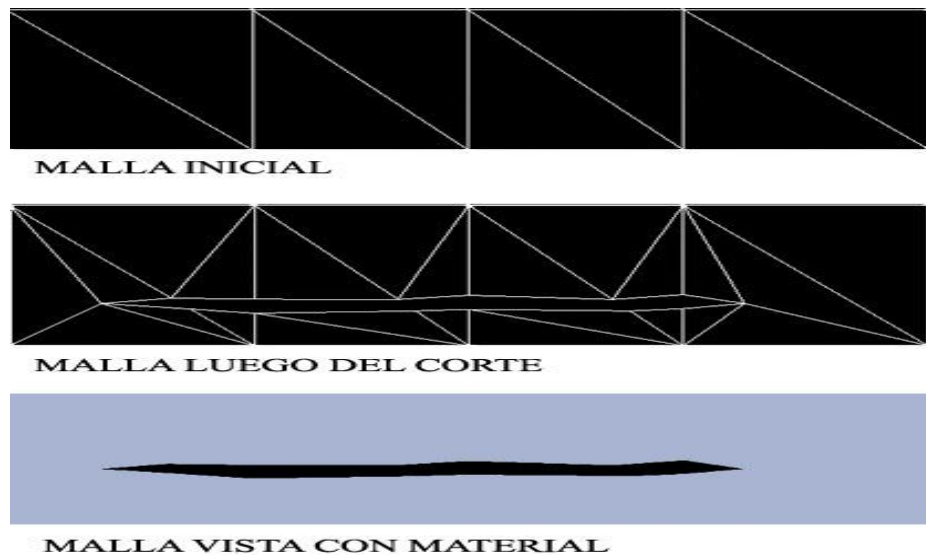


Fig. 7: Modificaciones de la malla al ejecutar el algoritmo de corte.

**Conclusiones**

El surgimiento de nuevas herramientas para los entrenamientos quirúrgicos donde la Realidad Virtual viene a insertarse como medio para alcanzar la excelencia es un hecho palpable. En el presente trabajo se arriban a conclusiones sobre los principales elementos geométricos a tener en cuenta para modelar un cuerpo en un entorno virtual, las características físicas que los pueden

convertir en un objeto deformable y las tendencias actuales respecto al tema de corte. Además, se plantea que el proceso de detección de colisiones es de vital importancia aplicado en toda su extensión para la transformación de la malla geométrica. Por tanto se promueve esta técnica para alcanzar una solución exacta de corte para modelos superficiales en 3D con comportamiento en tiempo real y factible para ser usada en simulaciones quirúrgicas.

### Referencias Bibliográficas

- [1] C. Basdogan, Chih - Hao, M.A. Srinivasan, Simulation of tissue and bleeding for laparoscopic surgery using auxiliary surfaces, in: Proc. Medicine Meets Virtual Reality, 1999, pp 38 - 44, 1999
- [2]C.D. Bruyns, K. Montgomery, Generalized intersections using virtual tools within the spring framework: Probing, piercing, cuterizing and ablating in: Proc. Medicine Meets Virtual Reality 2002 , pp 74- 78 ,2002
- [3]M. Bro-Nielsen. "Finite element modeling in medical VR". Journal of the IEEE, 86(3):490–503, 1998.
- [4]S. Cotin, H. Delingette, and N. Ayache. A hybrid elastic model allowing real-time cutting, deformations and force-feedback for surgery training and simulation. The Visual Computer, 16(8):437–452, 2000.
- [5] C. Forest – H. Delingette –N. Ayache, Cutting simulation of manifold volumetric meshes, Proceedings Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI), 2002
- [6]A. Mazura and S. Seifert. Virtual cutting in medical data. In Proc. of Medicine Meets Virtual Reality, pages 420–429., 1997.
- [7]A. Mor and T. Kanade. Modifying soft tissue models: Progressive cutting with minimal new element creation. In MICCAI Proc., pages 598–607, 2000.
- [8] D. Bielser et al. A state machine for real-time cutting of tetrahedral meshes. In Proc. of Pacific Graphics, pages 377–386, 2003.
- [9] D.Servy, M. Harders,G. Szekely. A new approach to cutting into finite element models . In MICCAI'01 Proc, paginas 425 - 433,2001
- [10] w. w. Nienhuys y A. F van der Stappen. A surgery simulation supporting cuts and finite element deformation. In MICCAI'01 Proc, paginas 153-160,2001
- [11] O.C. Zienkiewicz. The Finite Element Method. McGraw-Hill, 1977.
- [12] K. Bathe. Finite element procedures. Prentice Hall, Inc., 1996.
- [13] James, D. and Pai, D. (1999). Accurate real-time deformable objects. In Proceedings of ACM SIGGRAPH.
- [14] Andrew N, Matthias M, Richard K, Eddy B, Mark C Physically Based Deformable Models in Computer Graphics.
- [15] Costa, I. F. and Balaniuk, R. (2001b). Static solution for real time deformable objects with uid inside. In ERCIM News.
- [16] Hui Zhang, Shahram Payandeh and John Dill," Simulation of Progressive Cutting on Surface Mesh Model", Robotics and Computer Graphics Laboratories,School of Engineering Science Simon Fraser University Burnaby, BC V5A 1S6, Canada,2002