

Visualización 3D de Deformación y Corte de Objetos Virtuales basada en Descomposición Ortogonal

Gabriel Sepúlveda, Vicente Parra y Omar A. Domínguez

Resumen—Se muestra la implementación gráfica de un nuevo modelo para la renderización de fuerzas de contacto durante la interacción háptica dentro de ambientes virtuales 3D para deformación y corte de objetos virtuales con propiedades dinámicas y superficiales complejas. Se define un algoritmo simple para la triangulación de un objeto virtual, empleando algoritmos clásicos para la detección de colisiones. Se desarrolló un algoritmo para la visualización del corte de la malla triangular así como para el cálculo de las dinámicas de la malla durante el corte. Se presentan imágenes de la plataforma utilizando OpenGL y Visual C++, para la parte gráfica y el dispositivo Falcon para la retroalimentación háptica.

Palabras clave—Dispositivo háptico, renderización 3D, deformación y corte.

3D VISUALIZATION OF DEFORMATION AND CUT OF VIRTUAL OBJECTS BASED ON ORTHOGONAL DECOMPOSITION

Abstract—We present graphic implementation of a novel model for contact force rendering during the haptic interaction in 3D virtual environment. It is applied during cut and deformation of virtual objects with complex dynamic and surface properties. We define the simple algorithm for triangulation of the virtual object using the classic algorithm of detection of collisions. The algorithm is proposed that allows visualizing of the cutting triangular net as well as the calculation of the dynamics of the net during the cut. We present the corresponding images using OpenGL and Visual C++ for the graphic module and Falcon device for haptic feedback.

Index Terms—Haptic device, 3D rendering, deformation and cut.

I. INTRODUCCIÓN

DURANTE la interacción con objetos virtuales a través de dispositivos hápticos, un aspecto importante a considerar es la renderización de las fuerzas de contacto, para ello se han desarrollado numerosas teorías y algoritmos dentro de los que

destacan: el diseño de restricciones necesarias para la simulación de tejido [1], el uso de herramientas virtuales [2], el uso de elementos locales (LEM) [3]. Así como los algoritmos empleados para la generación de texturas como [4] y [5]. Pero estos algoritmos utilizados en la renderización háptica consideran relativamente poco la visualización de la tarea que se está llevando a cabo, además de necesitarse por lo menos dos de ellos para generar simultáneamente propiedades dinámicas del objeto y textura en su superficie.

Es por lo anterior que este documento presenta un nuevo algoritmo para la renderización gráfica de objetos virtuales deformables y bajo corte, utilizando como base el algoritmo de descomposición ortogonal utilizado para la generación de fuerzas de contacto a través de un dispositivo háptico [6], este algoritmo permite la generación simultánea de propiedades dinámicas y propiedades superficiales para los objetos virtuales.

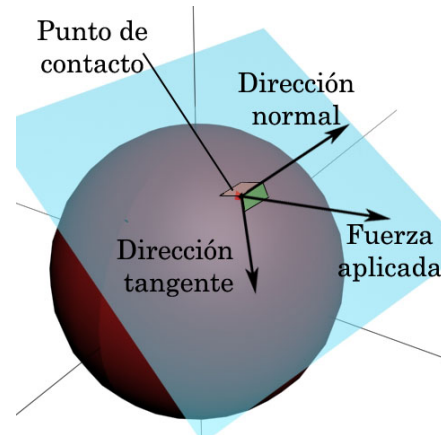


Fig. 1. Descomposición ortogonal de la fuerza aplicada a una superficie definida por una esfera en coordenadas articulares.

II. DESCOMPOSICIÓN ORTOGONAL

El algoritmo de descomposición ortogonal presentado en [6] permite la descomposición de la dinámica del dispositivo háptico en dos dinámicas independientes y ortogonales, la primera se utiliza para generar propiedades dinámicas de los objetos virtuales, tales como deformación elástica lineal y de tipo exponencial [7], esta dinámica es empleada en la renderización de las fuerza de contacto, deformación y corte de los objetos virtuales. La segunda dinámica generada por la descomposición ortogonal se emplea en la generación de fuerzas de fricción simples (viscosa-Coulomb) o avanzadas (GMS) [8]. La primera dinámica es normal al punto de

Manuscrito recibido el 20 de agosto del 2008. Manuscrito aceptado para su publicación el 3 de noviembre del 2008.

Gabriel Sepúlveda, Departamento de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV, México DF (email: gsepulveda@cinvestav.mx).

Vicente Parra, Grupo de Robótica y Manufactura Avanzada, CINVESTAV, Saltillo, México (email: vparra@cinvestav.mx).

Omar A. Domínguez, Centro de Investigación en Tecnologías de Información y Sistemas, UAEH, Pachuca, México (email: omar_arturo@uaeh.edu.mx).

contacto con el objeto virtual y la segunda es tangente al punto de contacto como se muestra en la Fig. 1.

El algoritmo de descomposición ortogonal presentado en [6] permite generar fuerzas de deformación exponencial como las presentes durante la manipulación de tejido orgánico real [7], fuerzas presentes durante el corte de una muestra de tejido [9] con una gran fidelidad al utilizar dispositivos hápticos de altas prestaciones como el Phantom Premium 1.0 de la compañía *Sensable* y con una fidelidad moderada con dispositivos como el Falcon de la compañía *Novint*.

III. MALLADO DE LA MUESTRA VIRTUAL

Para realizar caracterizaciones biomecánicas se toman muestras de tejido y sobre ellas se realizan las pruebas, para nuestros experimentos dentro de un ambiente virtual 3D se generó una muestra virtual con forma de prisma triangular (ver Fig. 6). La muestra virtual se genera a partir de un triángulo definido por sus tres vértices, posteriormente se genera un mallado por subtriangulación iterativa a partir del primer triángulo siguiendo la base del algoritmo empleado para generar el fractal de Sierpinski, en el cual cada triángulo es subdividido en tres triángulos como se muestra en la Fig. 2A y 2B (triángulos negros). El algoritmo implementado dentro de nuestra plataforma extiende el algoritmo anterior para generar el cuarto triángulo (el triángulo blanco del centro en la Fig. 2B, y así lograr una triangulación completa a partir del triángulo original.

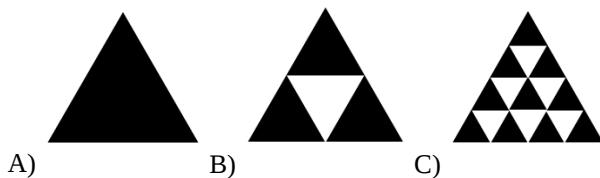


Fig. 2. Triangulación generada a partir de subtriangulación iterativa.

La muestra posee una característica denominada resolución, dicha característica permite definir el número de iteraciones que se realizará el algoritmo definiendo así la cantidad de triángulos de acuerdo a la Tabla 1.

TABLA I
CANTIDAD DE TRIÁNGULOS DE LA MALLA DE ACUERDO
A LA RESOLUCIÓN DEL OBJETO VIRTUAL

Resolución	Triángulos en la malla
1	1
2	4
...	...
i	$4^{(i-1)}$

Dentro de la estructura de la muestra virtual se definen los vértices que forman el contorno del objeto, obteniendo así los puntos a partir de los cuales se generan las paredes del objeto, generando un mallado triangular para las paredes como se muestra en la Fig. 3, el número de subdivisiones verticales depende de la resolución del objeto virtual.

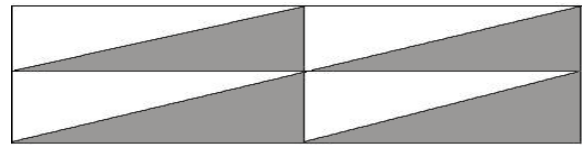


Fig. 3. Triangulación empleada en las paredes de la muestra virtual.

IV. MALLADO INERCIAL

Para generar la percepción visual de un movimiento continuo a lo largo de la superficie de la muestra virtual se generó un mallado inercial. Un mallado inercial es un conjunto de puntos a los cuales se les asigna una masa, interconectados por resortes y amortiguadores a lo largo de las aristas que los unen, como se muestra en la Fig. 4, lo anterior produce el efecto deseado: cuando un nodo de la malla es desplazado, el cálculo de la dinámica debida a los resortes y amortiguadores produce una fuerza sobre sus vecinos, la cual produce desplazamiento en ellos, por lo cual se genera el efecto que permite interpretar la malla como un cuerpo continuo y deformable.

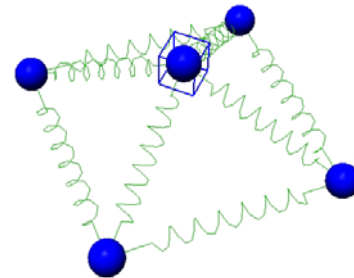


Fig. 4. Malla inercial, las esferas representan los nodos del mallado, y las conexiones representan los resortes y amortiguadores que conectan a cada uno de los nodos.

La dinámica de la malla inercial es la sumatoria de las dinámicas de cada uno de n nodos de la malla. A cada i -ésimo nodo de la malla se le asigna una masa m_i y un conjunto de valores b_{ij} y k_{ij} que representan los valores del amortiguador y del resorte respectivamente entre el nodo i y el nodo j por último la variable F_i que representa la fuerza externa aplicada sobre el nodo i , esto se representa mediante la siguiente ecuación:

$$m_i \ddot{X}_i + \sum_{j=1}^n b_{ij} (\dot{X}_i - \dot{X}_j) + \sum_{j=1}^n k_{ij} (X_i - X_j - X_{ij0}) = F_i \quad (1)$$

donde X_i , $\dot{X}_i$, $\ddot{X}_i$ representa el desplazamiento, velocidad y aceleración del nodo i en coordenadas cartesianas respectivamente, X_{ij0} representa la longitud inicial del resorte que une el nodo i con el nodo j .

Para resolver la ecuación diferencial presentada en (1) se utilizó como integrador el algoritmo de Runge-Kuta de 4º orden.

V. DETECCIÓN DE COLISIONES Y GENERACIÓN DE FUERZAS DURANTE DEFORMACIÓN

Para generar las fuerzas de contacto presentes durante la interacción utilizando un dispositivo háptico y a través del algoritmo de descomposición ortogonal como se muestra en [6] se requiere generar una ecuación implícita, la cual define una geometría con la cual se interactúa a través del dispositivo háptico, para el desarrollo de este trabajo se consideró la ecuación de un plano como la geometría de interacción descrito por la ecuación:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (2)$$

donde A, B, C, D son escalares constantes, x, y, z son las tres coordenadas cartesianas.

Para generar la geometría de interacción durante la manipulación de la muestra virtual, se requiere un algoritmo para la detección de colisiones. El algoritmo empleado para la detección de colisiones entre la herramienta virtual y el mallado es el conocido como colisión entre esfera y triángulo, este algoritmo se emplea situando pequeñas esferas a lo largo de la superficie de la herramienta que puede entrar en contacto contra el mallado, después se realiza una búsqueda exhaustiva entre los triángulos del mallado de la muestra y las esferas de la herramienta (conocidas como Proxy), cuando se detecta la colisión se procede de la siguiente forma:

1. Se realiza la detección de colisiones.
2. Se obtienen las coordenadas de los tres vértices del triángulo con el cual se generó la colisión.
3. A partir de los vértices se calcula la ecuación del plano al cual pertenece el triángulo.
4. Con la ecuación del plano se calcula la fuerza de interacción que será enviada al dispositivo háptico así como el desplazamiento debido al movimiento del operador.
5. Una vez calculado el desplazamiento del triángulo se realiza el cálculo de la dinámica de la malla de acuerdo al modelo inercial, logrando la difusión del movimiento a lo largo del mallado.

Los pasos mencionados se muestran en la Fig. 5. Es importante señalar que la fuerza calculada en el paso 4 es la fuerza de interacción normal al punto de contacto (ver Fig. 1) la cual se interpreta a través del dispositivo háptico como la dinámica del objeto virtual por ejemplo su elasticidad y su dinámica ante el corte.

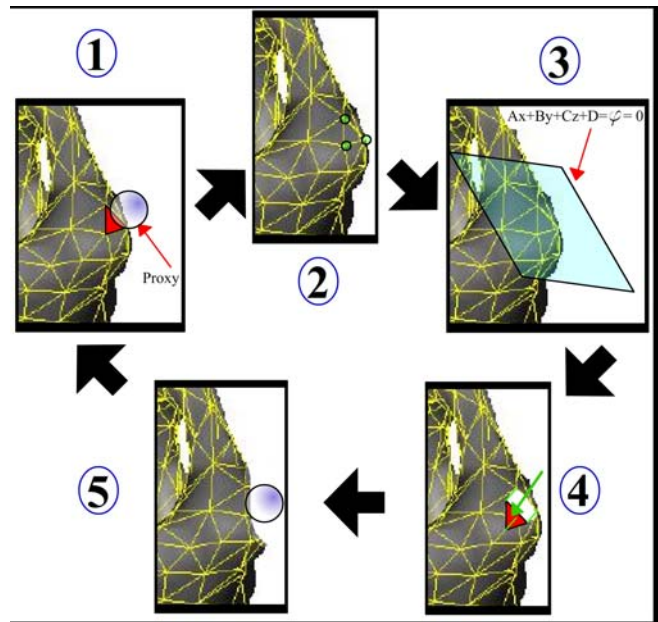


Fig. 5. Pasos para la detección de colisiones, renderización de fuerzas y deformación del mallado de la muestra virtual.

Durante la deformación de la muestra virtual debido a compresión la normal del plano apunta hacia afuera del objeto virtual, logrando con ello una fuerza en dirección contraria a la compresión percibiendo el operador rigidez o elasticidad del objeto virtual como se muestra en la Fig. 6.

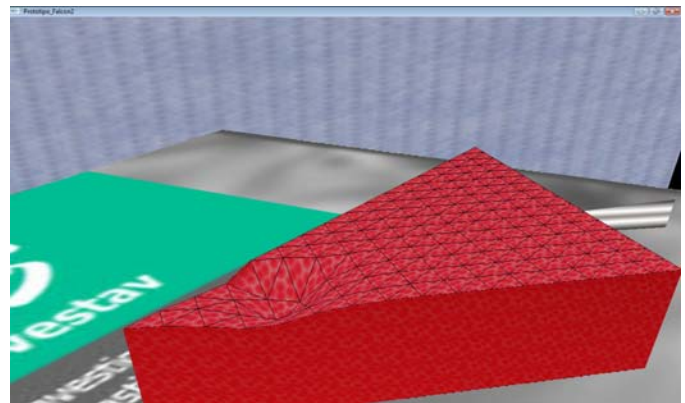


Fig. 6. Pantalla de la aplicación mostrando la compresión de la muestra virtual.

Durante la interacción en la cual se estira el mallado, lo que correspondería a tomar con unas pinzas la muestra virtual, la normal del plano de interacción apunta hacia adentro de la muestra para generar una fuerza que se oponga a la distensión, esto se muestra en la Fig. 7.

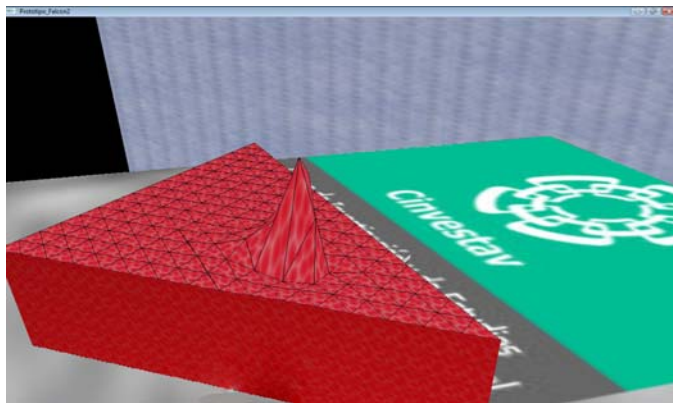


Fig. 7. Pantalla de la aplicación mostrando la distensión de la muestra virtual.

VI. ALGORITMO PARA EL CORTE

Para la renderización de las fuerzas durante el corte de la muestra virtual mediante el dispositivo háptico se emplearon los algoritmos descritos en [6], donde se muestra como ejemplo de corte la dinámica de una muestra de hígado de cerdo durante el corte. En [6] se generan las fuerzas de interacción pero no se presenta algún algoritmo que genere la misma retroalimentación de forma visual.

Para generar la visualización del corte se desarrolló un algoritmo que toma en cuenta la estructura triangular de la muestra virtual (ver Fig. 8) permitiendo cortes en dirección vertical ascendente (paralelos al eje y). El algoritmo consta de los siguientes pasos:

1. Se detecta el desplazamiento del dispositivo háptico durante la deformación de la muestra virtual hasta que se alcanza el punto de ruptura del tejido, con lo cual se cambia del modo de interacción de deformación a modo de interacción en corte.
2. Una vez en modo de interacción de corte se calcula de acuerdo al punto de contacto con la malla y a la dirección del desplazamiento una línea que define la dirección del corte Fig. 8 A.
3. Se realiza un cálculo del número de triángulos que tengan dos o más vértices a la derecha de la línea de corte, es decir que su coordenada x siempre esté a la derecha de la línea de corte. Dichos triángulos serán eliminados del mallado de la muestra virtual, como se muestra en la Fig. 8 B.
4. Una vez eliminados los triángulos del mallado se procede a recalcular el contorno del objeto para generar las nuevas paredes del objeto.

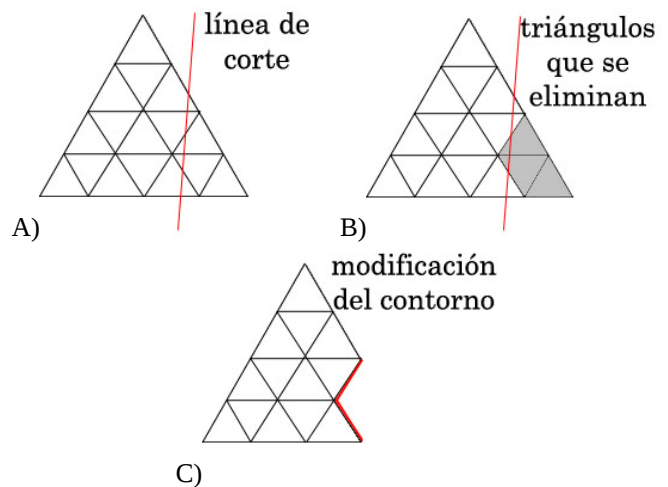


Fig. 8. Pasos realizados por el algoritmo para la visualización del corte de una muestra virtual.

El conjunto de nodos de la nueva muestra es reducido cambiando los elementos empleados en (1), al eliminar conexiones de resortes y amortiguadores. Los nodos, caras y paredes eliminados son removidos de la escena virtual. En la Fig. 9 se muestra una pantalla de la aplicación desarrollada donde se ha realizado un corte de la muestra virtual.

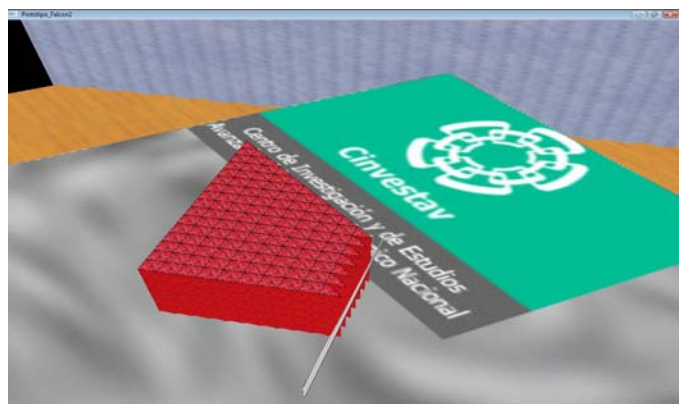


Fig. 9. Pantalla que muestra la aplicación después de haber realizado un corte.

VII. PLATAFORMA EXPERIMENTAL

La plataforma experimental empleada consta de una computadora portátil o laptop HP Pavillion dv2000 con procesador Intel Core2 Duo a una velocidad de 1.5 GHz con 2 Gb de memoria RAM y una tarjeta de video Mobile Intel 965 con un monitor LCD de 14 pulgadas. El sistema operativo es Windows Vista Ultimate. El ambiente de programación empleado fue OpenGL y sus librerías de herramientas GLU para la renderización del ambiente virtual 3D. Visual C++ 2007 como lenguaje de programación para la lógica del programa, los modelos matemáticos, los integradores empleados y las funciones de escritura de archivos.

El dispositivo háptico empleado en esta plataforma experimental fue el Falcon de la compañía Novint. La plataforma experimental se muestra en la Fig. 10.

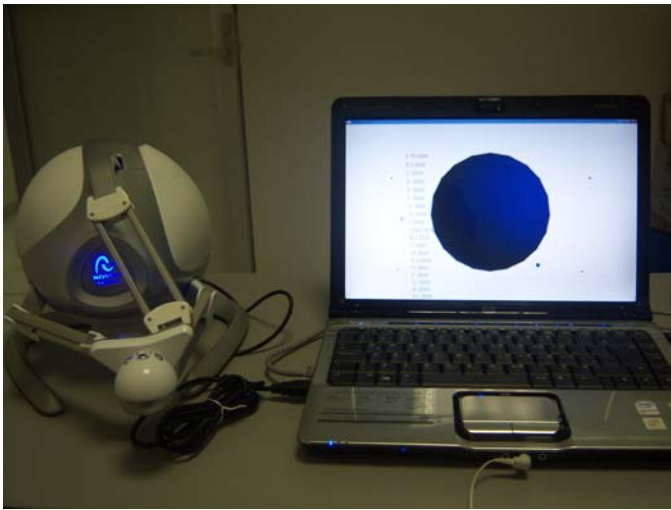


Fig. 10. Plataforma experimental, dispositivo háptico y computadora.

VIII. CONCLUSIONES

Se presentó un algoritmo para la generación de muestras virtuales de tejido a partir de una triangulación iterativa. El algoritmo permite la renderización de fuerzas de contacto mediante un dispositivo háptico así como la visualización durante interacción en deformación y corte de la muestra. El algoritmo aporta un método para generar las geometrías necesarias para emplear el algoritmo para la renderización háptica de fuerzas basado en la descomposición ortogonal. El algoritmo permite únicamente cortes verticales de la muestra virtual, por lo que debe ser modificado para permitir cortes en cualquier dirección. El algoritmo aquí presentado se puede

implementar en aplicaciones hápticas para la simulación de cirugía, entrenadores hápticos para estudiantes de medicina, así como para la interacción en mundos virtuales dinámicos.

REFERENCIAS

- [1] Oliver R. Astley and Vincent Hayward. Design constraint for haptic surgery simulation. IEEE ICRA, 2000 San Francisco CA.
- [2] Colgate, J. E., Stanley, M. C., and Brown, J. M. Issues in the Haptic Display of Tool Use. In: IEEE/RSJ, Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems, Pittsburgh, 1995, pp. 140-145.
- [3] Teeranoot Chanthasopeephan Jaydev P. Desai and Alan C. W. Lau. 3D and 2D Finite Element Analysis in Soft Tissue Cutting for Haptic Display. In: Proceedings of ICAR, 2005, pp. 360-367.
- [4] Omar Arturo Domínguez Ramírez. Design and integration of a Realistic Haptic Interface. CINVESTAV, Mechatronic Section, PhD Thesis, México, 2005.
- [5] Gianni Campion and Vincent Hayward. Fundamental Limits in the Rendering of Virtual Haptic Textures. McGill University, Montreal, Canada.
- [6] Gabriel Sepúlveda, Vicente Parra, Omar Domínguez. Nonlinear Haptic Rendering of Deformation and Cutting Based on Orthogonal Decomposition. Journal "Research in Computing Science", Vol. 35, 2008, pp. 51-61.
- [7] Iman Brouwer *et al.* Measuring In Vivo Animal Soft Tissue Properties for Haptic Modeling in Surgical Simulation. University of California, USA, 2001.
- [8] Farid Al-Bender, Vicent Lampaert and Jan Swevers. The Generalized Maxwell-Slip Model: A Novel Model for Friction Simulation and Compensation. IEEE Transaction on Automatic Control, Vol. 50, 2005, pp. 11.
- [9] Mohsen Mahvash and Vincent Hayward. Haptic Rendering of Cutting: A Fracture Mechanics Approach. McGill University, Quebec, Canada, 2001.