



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY®**

Campus Ciudad de México

División de investigación y posgrado

Doctorado en Ciencias de la Computación

“Desarrollo de aplicaciones virtuales de
entrenamiento médico incorporando
dispositivos hápticos”

Autor:

Eusebio Ricárdez Vázquez

Directoras de la tesis:

Dra. Juana Julieta Noguez Monroy

Dra. Lourdes Muñoz Gómez

Diciembre 2013

A mi madre

Apoyo Recibido

Esta tesis de doctorado fue realizada con el apoyo de una beca de colegiatura del 100% otorgada por el Tecnológico de Monterrey, Campus Ciudad de México, de agosto de 2009 a diciembre de 2013. También se otorgó al autor de esta tesis una licencia con goce de sueldo durante todo el periodo de estudios por parte del Comité Técnico para el Otorgamiento de Becas de Estudio, Apoyos Económicos y Licencias con goce de Sueldo (COTEBAL) del Instituto Politécnico Nacional, con el aval de las Autoridades de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Culhuacan.

Adicionalmente se recibió apoyo y colaboración de la cátedra de investigación “eLearning y modelos inteligentes” formada por profesores investigadores y estudiantes de posgrado del Tecnológico de Monterrey, Campus Ciudad de México.

Resumen

En la actualidad los ambientes virtuales de aprendizaje son herramientas ampliamente utilizadas en el ámbito académico y están presentes en prácticamente todas las áreas del conocimiento. La medicina no es la excepción, inclusive es una de las áreas en las que los ambientes de simulación presentan grandes ventajas, al evitar que el aprendizaje sea en cadáveres o seres vivos.

Se ha demostrado que un ambiente virtual es más eficaz cuando puede enviar al usuario sensaciones táctiles que permitan al usuario interactuar de forma más completa con el mismo.

En este trabajo se desarrollan las técnicas necesarias para generar un ambiente virtual de entrenamiento médico que envía al usuario sensaciones táctiles a través de dispositivos hápticos, para lo cual se modeló el instrumental quirúrgico necesario. Se propone una forma de simular piel humana con diferentes características como grosor, flexibilidad, textura, etc. Se plantea un método de generación de respuesta háptica (haptic rendering) para superficies deformables aplicado a dicha piel. Se desarrolla un hilo que posee características que le permiten fijarse a una superficie deformable, colisionar con objetos sólidos y generar nudos simples.

Como producto final de esta investigación, se muestra la integración e interacción de los diversos elementos citados anteriormente para generar el ambiente virtual de entrenamiento médico para realización de sutura: SutureHap. Las pruebas realizadas por los usuarios en el ambiente muestran que el comportamiento del mismo es cercano a un ambiente real y que puede ser usado para el entrenamiento de futuros médicos.

Palabras clave: Simulador de sutura, ambientes virtuales de aprendizaje, haptic rendering, superficies deformables, detección de colisiones.

Índice

Índice de Figuras	v
Índice de tablas.....	xi
1 Introducción.....	3
1.1 Dispositivos hápticos	4
1.2 Motivación	6
1.3 Justificación.....	7
1.4 Hipótesis.....	8
1.5 Objetivo general	8
1.6 Objetivos particulares.....	8
1.7 Organización del documento.....	9
2 Los dispositivos hápticos.....	13
2.1 Descripción y principios de funcionamiento.....	13
2.1.1 Haptic Master:.....	15
2.1.2 Dispositivo Phantom:.....	17
2.1.3 Dispositivo Falcon	19
2.1.4 Virtuouse 6D35-45	21
2.1.5 CyberGrasp y CyberForce	23
2.1.6 Cuadro comparativo.....	24
2.2 Aplicaciones de los dispositivos hápticos	25
2.3 Clasificación de los dispositivos:	27
3 Dispositivos hápticos y su interacción con los ambientes virtuales	33
3.1 Haptic Rendering	34
3.1.1 Haptic Rendering debido a la geometría del objeto.....	36

Índice

3.1.2	Haptic Rendering debido a la superficie del objeto	41
3.1.3	Haptic Rendering de objetos deformables	43
3.1.4	Haptic Rendering y el GPU.....	44
3.2	Algoritmos de detección de colisiones	45
3.2.1	Mallas poligonales.....	45
3.2.2	Espacios Volumétricos	46
3.2.3	Objetos no convexos	47
3.3	Algoritmos de control	49
3.4	Modelado virtual de piel.....	50
3.4.1	Técnica masa-resorte-amortiguador	51
3.4.2	Método de elemento finito	53
3.5	Modelado de hilo y aguja	54
3.6	Simulación de sutura	57
3.7	Arquitectura de los sistemas que involucran dispositivos hápticos.....	60
4	Trabajo relacionado	65
4.1	Hápticos en entrenamiento y aplicaciones médicas	65
4.1.1	Dispositivos hápticos en capacitación.....	65
4.1.2	Simulador de trabajos dentales.....	67
4.1.3	Neurocirugía.....	68
4.2	Aplicación de dispositivos hápticos y el GPU.....	70
4.3	Aplicaciones en sutura.....	71
4.3.1	Áreas de oportunidad en investigación para ambientes de capacitación y entrenamiento.....	76
5	Propuesta: Ambiente virtual de entrenamiento médico	81
5.1	Arquitectura de la aplicación.....	81

5.2	Cálculo de colisiones y haptic rendering para objetos deformables.	82
5.2.1	Fundamentación física del ambiente.....	85
5.2.2	Método simplificado.....	87
5.3	Modelado del hilo	92
5.4	Modelado del instrumental quirúrgico	98
5.5	Modelado de la piel.....	99
5.6	Integración del ambiente	99
5.6.1	Interacción hilo-piel.....	99
5.6.2	Incorporación de los dispositivos hápticos	100
6	Caso de estudio: SutureHap ambiente virtual para suturas.	105
6.1	Elección del ambiente de trabajo	106
6.2	Desarrollo del prototipo	107
6.2.1	Simulación	109
6.2.2	Haptic Rendering	117
6.2.3	Visual Rendering	119
6.3	Diseño de los elementos del experimento.....	122
7	Proceso de evaluación, discusión y resultados	127
7.1	Generación de haptic rendering para una superficie deformable.....	127
7.1.1	Pruebas cuantitativas.....	128
7.1.2	Pruebas cualitativas.....	131
7.1.3	Discusión	134
7.2	Evaluación del ambiente virtual de entrenamiento médico	134
7.2.1	Discusión.	140
7.3	Pruebas de hipótesis	140
8	Conclusiones y trabajo futuro.....	147

Índice

8.1	Trabajo futuro	150
9	Publicaciones derivadas de esta investigación.....	155
10	Referencias	159
11	Anexos.....	165
11.1	Requerimientos del sistema	165
11.2	Instructivo de Instalación de SutureHap.....	166
11.3	Clases principales del sistema	169
11.4	Detalle de las pruebas cuantitativas.....	172
11.5	Cuestionario de percepción del simulador de tela	185
11.6	Hoja Informativa del Participante.....	186
11.7	Manual usuario	187
	Pinza porta-aguja	194
	Pinza de disección:.....	194
	Cambio de Pinza a Tijera:	194

Índice de Figuras

Figura 2.1 Dispositivo HapticMaster de la empresa FCS Control Systems (Hayward et al., 2004).....	15
Figura 2.2 a) Desarmador colocado en efector final. b) Efector final con un grado de libertad activo y dos pasivos, utilizado para terapia. (Hayward et al., 2004).....	16
Figura 2.3 Dispositivo Phantom Omni (Sensable, 2012)	18
Figura 2.4 Dispositivo Falcon (Novint Technologies Inc, 2010)	20
Figura 2.5 Modelo CAD del dispositivo Falcon generado por sus creadores (Steve & Hillier, 2009).....	21
Figura 2.6 Dispositivo Virtuose 6D35-45 (Haption SA, 2010).....	22
Figura 2.7 Dispositivos CyberGrasp, CyberForce con una muestra de una posible aplicación.....	24
Figura 3.1 Arquitectura básica para una aplicación de realidad virtual que incorpora partes visuales auditivas y hápticas(Salisbury, Conti, & Barbagli, 2004)	34
Figura 3.2 Algoritmo de Interacción háptica, compuesto de dos partes, detección de colisiones y respuesta a la colisión (Basdogan & Srinivasan, 2002).....	36
Figura 3.3 Concepto de pared virtual con interacción de un grado de libertad. (Salisbury, Conti, & Barbagli, 2004)	37
Figura 3.4 Haptic Rendering de una esfera 3D en un ambiente virtual (Basdogan & Srinivasan, 2002)	39
Figura 3.5 Algoritmo de HR basado en interacción puntual que calcula la fuerza resultante F y el IHIP (rojo) en cada interacción a partir de la posición del HIP (amarillo). (Basdogan & Srinivasan, 2002)	40
Figura 3.6 Métodos existentes de haptic rendering de acuerdo a la forma del objeto de prueba b) Un punto, c) Un segmento de línea, d) Un objeto 3D. (Basdogan & Srinivasan, 2002).....	41
Figura 3.7 Fuerzas que actúan en el usuario durante la simulación háptica de fricción y textura. (Basdogan & Srinivasan, 2002).....	42
Figura 3.8 Intersección de un segmento de línea y un plano (Salisbury, Barbagli, & Conti, 2010).....	46
Figura 3.9 Intersección de dos triángulos (Salisbury, Barbagli, & Conti, 2010).....	46

Índice de figuras

Figura 3.10 Colisiones a)Esfera-esfera, b) AABB c) OBB (Salisbury, Barbagli, & Conti, 2010).....	47
Figura 3.11 Colisiones entre poliedros convexos (Salisbury, Barbagli, & Conti, 2010).....	47
Figura 3.12 Objeto no convexo y su descomposición en objetos convexos. (Salisbury, Barbagli, & Conti, 2010).....	48
Figura 3.13 Técnica de colisiones mediante BVH (Salisbury, Barbagli, & Conti, 2010) ...	48
Figura 3.14 Lazo cerrado formado entre el usuario y los algoritmos de HR, $x(t)$ y $F(t)$ son continuos en el tiempo, mientras que $x(K)$ y $F(K)$ son posiciones y fuerzas discretas. (Salisbury et al., 2004)	49
Figura 3.15 Malla de vértices dinámicos que se utiliza para representación de la piel. (Webster et al., 2001)	51
Figura 3.16 Estructura multicapas lattice (izquierda), deformaciones de un voxel (a) Fuerza aplicada en el extremo, (b) Fuerza normal aplicada al voxel (Lian & Chen, 2006).	52
Figura 3.17 Modelo del hilo empleado para sutura (Lian & Chen, 2006)	55
Figura 3.18 Nudos elaborados a partir del algoritmo FTL (Brown, Latombe, & Montgomery, 2004).....	56
Figura 3.19 Modelo de la aguja, el Arco TE representa la aguja (F. Shi & Payandeh, 2008)	57
Figura 3.20 Arquitectura de una aplicación que involucra dispositivos hápticos, mostrando los tres bloques principales de haptic rendering (HR) (Salisbury et al., 2004).....	60
Figura 4.1 Sistema de entrenamiento laparoscópico (Basdogan et al., 2004).....	66
Figura 4.2 Iowa Dental Surgical Simulator, se muestra la integración del monitor, el dispositivo háptico y la simulación del paciente (Thomas et al., 2001).....	68
Figura 4.3 a) Punción, b)Toma y c)Corte (Wang et al., 2007).....	69
Figura 4.4 Vistas del simulador de cirugía que utiliza PhysX (Maciel, Halic, Lu, Nedel, & De, 2009).....	70
Figura 4.5 Simulador de sutura (Webster et al., 2001)	71
Figura 4.6 Imágenes de trabajo del simulador de sutura de (Marshall et al., 2005)	72
Figura 4.7 Apariencia del simulador de sutura (Miyazaki et al., 2006).....	73
Figura 4.8 Modelo de sutura propuesto por (Lian & Chen, 2006).....	74

Figura 4.9 Malla empleada para representar piel y algunas imágenes del simulador de sutura de (Choi et al., 2012).....	75
Figura 5.1 Arquitectura propuesta del ambiente virtual de entrenamiento médico.....	83
Figura 5.2 Distribución y sincronización de procesos.....	84
Figura 5.3 Arreglo bidimensional de partículas que forman la tela que representa la piel...	85
Figura 5.4 Superficie elástica deformable (tela).....	88
Figura 5.5 Malla deformable formada por partículas conectadas entre sí por resortes y amortiguadores.....	88
Figura 5.6 Avatar del háptico con rayos saliendo del centro.....	89
Figura 5.7 Construcción de los vectores a) Contacto inicial b) Contacto de los rayos siguientes c) Movimiento de los puntos iniciales de contacto d) formación de los vectores	89
Figura 5.8 Vectores para fuerza de deslizamiento a) Contacto inicial b) Deslizamiento c) Formación de los vectores en el caso de deslizamiento.....	91
Figura 5.9 Proceso de modelado del hilo a) esferas guía b) Cápsulas auxiliares c) Modelo completo con líneas guía para colisiones d) gráfico con textura que se muestra al usuario.	93
Figura 5.10 Colisión de un par de cilindros que componen el hilo	94
Figura 5.11 Colisiones entre segmentos	95
Figura 5.12 a) Diagrama de flujo para detección de colisiones entre segmentos del hilo, b) Diagrama de flujo para manejo de colisiones de colisiones entre segmentos del hilo.	96
Figura 5.13 Detección de nudos	97
Figura 5.14 Diversos modelos de instrumental elaborados para uso en SutureHap, a) Pinza de disección estándar b) Pinza de disección con dientes c) Porta aguja d) Tijeras de Metzenbaum recta e) Tijera Metzenbaum curvaa.....	98
Figura 5.15 Modelo de la aguja para sutura sólido y en mallas.....	99
Figura 5.16 Elemento del hilo fijo a un vértice de la malla deformable que simula la piel	100
Figura 5.17 Cálculo de retroalimentación para la pinza de disección. P_i punto de contacto inicial, P_1 punto de contacto actual, d distancia entre P_i y P_1	101
Figura 6.1 Proceso de sutura real en piel de cerdo	105
Figura 6.2 Diagrama de secuencias de SutureHap	108
Figura 6.3 Diagrama de clases de SutureHap	109
Figura 6.4 Pinzas en el ambiente de PhysX.....	111

Índice de figuras

Figura 6.5 Aguja y porta aguja en diversas posiciones.....	113
Figura 6.6 Tela que representa la piel, con textura, corte y bordes.....	114
Figura 6.7 Diagrama de actividades del hilo.....	115
Figura 6.8 Diagrama de clases del hilo.....	116
Figura 6.9 Formación de un nudo.....	116
Figura 6.10 Detalle de la detección de un nudo.....	117
Figura 6.11 Cilindros auxiliares para detección de colisiones en la piel. a) Piel sin movimiento, b) Piel en movimiento.....	118
Figura 6.12 Ensamble de SutureHap.....	121
Figura 6.13 Técnicas de sutura a) sutura simple separada b) sutura simple continua.....	122
Figura 6.14 Proceso de sutura en el simulador SutureHap.....	123
Figura 7.1 Pruebas realizadas en la tela, a) Perforación b) Deslizamiento.....	129
Figura 7.2 Fuerza vs desplazamiento, ejes X, Y y Z.....	130
Figura 7.3 Desplazamiento vs fuerza con alta densidad de partículas a) Perforación de $-y$ a $+y$ b) Deslizamiento de $-x$ a $+x$	131
Figura 7.4 Usuario realizando la prueba de percepción.....	132
Figura 7.5 Apreciación de los participantes.....	133
Figura 7.6 Usuarios realizando la prueba usabilidad de SutureHap.....	135
Figura 7.7 Imágenes del video realizado por el médico.....	136
Figura 7.8 Respuestas de los usuarios al cuestionario de usabilidad.....	139
Figura 7.9 Comportamiento de las respuestas.....	139
Figura 11.1 Clases principales del simulador.....	169
Figura 11.2 Diagrama de clases auxiliares de la clase hilo.....	171
Figura 11.3 Dispositivo Phantom Omni.....	190
Figura 11.4 Detalle de la plumilla del dispositivo Phantom Omni.....	190
Figura 11.5 Colocación de los dispositivos hápticos.....	190
Figura 11.6 Pantalla de bienvenida.....	191
Figura 11.7 Pantalla principal de SutureHap.....	192
Figura 11.8 Pantalla de aviso para calibración.....	192
Figura 11.9 Pantalla principal de SutureHap con barra de tiempo.....	192
Figura 11.10 Bienvenida al simulador.....	193

Figura 11.11 Ambiente de simulación de sutura	194
Figura 11.12 Porta aguja sujetando aguja.....	195
Figura 11.13 Hilo sujetado por ambas pinzas.....	196
Figura 11.14 Elaboración de un nudo.....	197
Figura 11.15 Elaboración de un segundo nudo.....	197
Figura 11.16 Hilo en el momento del corte y después del corte.....	197
Figura 11.17 Tutorial de video	199
Figura 11.18 Video del simulador de sutura.....	200
Figura 11.19 Agradecimientos.....	201

Índice de tablas

Tabla 2.1 Especificaciones generales del Haptic Master..... 17

Tabla 2.2 Especificaciones del Phantom Omni 19

Tabla 2.3 Especificaciones del Novint Falcon.....21

Tabla 2.4 Especificaciones del Virtuose 6D35-45.....22

Tabla 2.5 Cuadro comparativo de diferentes dispositivos hápticos.....24

Tabla 3.1 Modelo de pasos a seguir para la aplicación de sutura en una herida o laceración existente (Berkley, Turkiyyah, Berg, Ganter, & Weghorst, 2004).....59

Tabla 4.1 Comparativo de los sistemas de capacitación y entrenamiento mostrados76

Tabla 7.1 Precepción del usuario de SutureHap 138

Capítulo 1.

Introducción

1 Introducción

Cada vez la sociedad se encuentra más cerca de que sean realidad las series de ciencia ficción de hace algunas décadas, puesto que ya han llegado los días en que los médicos practican procedimientos quirúrgicos únicamente frente a una computadora. Esto es posible gracias a los grandes avances tecnológicos de las computadoras y los procesadores gráficos. En México ya se cuenta con diversos tipos de simuladores comerciales, en los cuales los futuros médicos practican complejas intervenciones quirúrgicas antes de enfrentarse a un paciente vivo.

Una simulación computacional, puede ser una opción para reducir costos y mitigar cuestiones éticas, así como mejorar el tiempo y la calidad de la enseñanza hacia los alumnos.

En un futuro cercano, quizá no sea posible que el entrenamiento de los futuros médicos sea enteramente virtual, pero la simulación puede representar una parte importante de la formación que facilite al estudiante el acercarse a las situaciones reales.

En este trabajo de investigación se plantea el desarrollo de un laboratorio virtual de aprendizaje que incorpora dispositivos hápticos, enfocado en el área médica. Mediante el cual se trata de facilitar la formación y capacitación de los estudiantes, contribuir a la organización de la información, de los experimentos o prácticas y los resultados de los mismos.

Se trató de generar una simulación lo suficientemente cercana a la realidad con el fin de estrechar la diferencia entre los ambientes virtuales y la realidad misma.

1.1 Dispositivos hápticos

A lo largo de la vida diaria, los seres humanos interactúan con el medio ambiente por medio de sus sentidos. Uno de ellos, el sentido del tacto, permite en muchas ocasiones percibir sensaciones muy finas que no pueden ser captadas por los otros sentidos. Por otra parte, en los últimos años se ha intensificado el uso de las computadoras, las cuales están presentes prácticamente en todas las actividades humanas. Sin embargo, la interacción entre el humano y las máquinas se ha centrado principalmente a cuestiones visuales y auditivas, mientras que el ámbito de las sensaciones táctiles ha quedado relegado, ya que los dispositivos destinados a ser usados con las manos, tales como ratones, teclados o pantallas táctiles, se utilizan exclusivamente para ingresar información.

Para cubrir esta área, surgen las interfaces hápticas, que permiten ahora que los equipos de cómputo envíen al usuario sensaciones táctiles o kinestésicas. En el ámbito de la psicología y fisiología experimentales, se emplea la palabra háptico¹ para describir la habilidad de percibir el ambiente a través de la exploración activa, usando nuestras manos, así como palpar un objeto para sentir su forma y las propiedades de los materiales que lo conforman (Robles-De-La-Torre, 2006), así mismo, las palabras háptico o hápticos² son usadas generalmente para referirse a todas las sensaciones relativas al tacto, incluida la habilidad de detectar la posición y movimiento de las extremidades. (Hayward, Astley, Cruz-hernandez, Grant, & Robles-De-La-Torre, 2004)

De acuerdo con (Hayward et al., 2004) la idea de usar el tacto como medio de comunicación proviene de los años 1985 y 1999, cuando se consideraba que los canales de comunicación podían ser mejorados a partir de combinar diversos patrones simples. Así como un mouse permite deslizarse pixel por pixel sobre una pantalla gráfica, se planteó la posibilidad de enviar información al usuario a través de un dispositivo táctil tal y como lo hace el mouse.

¹ Háptico: Del griego *ηαπτο* Tocar, sentir, Háptica: relativo a háptico.

² Ninguna de las dos palabras está reconocida por la Real Academia Española

De esta forma, es posible que se envíe al dispositivo háptico, pixel a pixel, la información de formas, profundidades y texturas. Este mecanismo, en ocasiones recibe el nombre de “display háptico” (Hayward et al., 2004)

Al mismo tiempo, de la misma forma que es posible la grabación de señales de video o audio, también se plantea la posibilidad de grabar y posteriormente reproducir señales táctiles o kinestésicas, lo cual expande las posibilidades de los dispositivos de cómputo.

Todos los objetos, naturales o artificiales, pueden clasificarse en inertes o activos, en otras palabras animados o inanimados. Los objetos inertes o pasivos se caracterizan por solamente disipar o recibir algún tipo de energía, mientras que los activos pueden proporcionar algún tipo de energía. Acorde a este hecho, es posible establecer la existencia de dos clases de dispositivos hápticos, pasivos y activos, que comparten la propiedad de ser programables.

Los dispositivos pasivos están preparados y pueden ser programados para disipar energía. Por ejemplo, recibir una fuerza, que será una función de la posición y el tiempo. Existen diferentes subcategorías, algunas que dependen de restricciones que involucran la velocidad y otras que involucran propiedades como la elasticidad, creando la posibilidad de percibir un elemento más duro o más blando.

En los dispositivos activos, el intercambio de energía entre el usuario y la máquina, depende de la función de retroalimentación y control que se aplica. Se identifican dos categorías principales: la primera donde los actuadores son como una fuente de fuerza y lo que se mide es la posición y la otra donde los actuadores se comportan como una fuente de posición y entonces se mide la fuerza. La primera categoría se denomina isotónica (la fuerza no cambia con la posición) y la segunda se conoce como isométrica (la posición no cambia con la fuerza). Se dice entonces que para los dispositivos isotónicos, corresponde una impedancia³ que produzca la simulación correspondiente, mientras que para los isométricos corresponde una admitancia⁴. En general, para reproducir diversos ambientes,

³ Impedancia: Relación entre la magnitud de una acción y la de su respuesta producida en un sistema físico.

⁴ Admitancia: Inverso de la impedancia.

se prefieren los dispositivos activos sobre los pasivos (Barbagli & Salisbury, 2003; Basdogan et al., 2004).

Asimismo, es conveniente mencionar que los dispositivos hápticos se caracterizan por ser bidireccionales, añadiendo una fuerza de retroalimentación como respuesta. Es decir, al mismo tiempo pueden enviar y recibir información y contentarla en un solo dispositivo. Lo anterior establece una diferencia muy importante contra la mayoría de los dispositivos unidireccionales que utilizamos normalmente para interactuar con las computadoras, tales como teclados y pantallas.

Los dispositivos hápticos se han utilizado en diferentes áreas y son de diferentes tipos. En principio, podemos definir un dispositivo háptico como aquél que le permita al usuario interactuar con un ambiente virtual y percibir sensaciones táctiles del mismo. Cuando un dispositivo háptico tiene el mismo número de sensores⁵ y actuadores⁶, se dice que es actuado o completamente actuado. Cuando solo tiene sensores pero no actuadores se le llama no actuado y cuando tiene más sensores que actuadores, se le conoce como bajo actuado o sub actuado. Es más fácil conseguir dispositivos sub actuados que completamente actuados y existen trabajos que plantean diferentes formas de compensar dichas deficiencias (Barbagli & Salisbury, 2003).

1.2 Motivación

Actualmente, las computadoras se encuentran inmersas en prácticamente todas las áreas de nuestro ámbito. Dependiendo de la aplicación, existen diversas formas de interacción con ellas. Actualmente el intercambio de información a través de medios táctiles se encuentra poco desarrollado. Los ejemplos más cercanos consisten en dispositivos que se limitan a vibrar como respuesta a una situación que específica. Este intercambio de información táctil puede efectuarse mediante dispositivos hápticos de una forma más completa y variada y permitirá el desarrollo de nuevas aplicaciones de las computadoras, orientadas sobre todo a “mundos virtuales”.

⁵ Sensor: Dispositivo que detecta una determinada acción externa (temperatura, presión, etc.) y la transmite de forma adecuada.

⁶ Dispositivo que produce una acción (normalmente mecánica), a partir de una señal eléctrica.

La incorporación de los dispositivos hápticos, presenta una serie de retos interesantes, tanto desde el punto de vista electrónico como computacional debido a que permite utilizar un paradigma de interacción diferente al que estamos acostumbrados. La motivación de realizar este trabajo, es pasar del uso de estos dispositivos en actividades lúdicas, a su uso para fines más serios, principalmente en áreas de aprendizaje.

En particular, es necesario actualizar y reformar las prácticas tradicionales de enseñanza aprendizaje en el campo de la medicina. Las reformas legales y la defensa a los derechos humanos y de los animales han causado que la forma de enseñar a los alumnos evolucione día con día. Una práctica común es utilizar animales como perros o ratas para el entrenamiento de los nuevos médicos. Recientemente se han usado maniquís para enseñar diversas técnicas y procedimientos quirúrgicos que pueden poner en peligro la vida de los animales o de los seres humanos. Actualmente se tiende a utilizar ambientes virtuales, en los que pueden simularse diversas situaciones de riesgo, como el que se utiliza actualmente en el Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán, que permite a los médicos practicar cirugías endoscópicas. Sin embargo, muchos de los ambientes virtuales brindan retroalimentación al usuario solamente a través de audio y video. Los simuladores existentes están diseñados para cirugías particulares.

1.3 Justificación

En el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), campus ciudad de México (CCM), se ofrece la carrera de medicina, En dicha carrera es importante que desde los primeros semestres, los alumnos adquieran diversas habilidades y competencias, principalmente aquellas que tengan que ver con incisiones, disecciones y suturas. Sin embargo, como se comentó en el párrafo anterior, las reformas legales regulan las prácticas con animales y cadáveres, situación que dificulta el desarrollo de las tareas de entrenamiento y por ende la obtención de competencias de los alumnos.

Para dar solución a esta problemática, se propone la creación de un ambiente virtual de entrenamiento médico, reforzado con dispositivos hápticos que permita a los alumnos realizar prácticas cercanas a la realidad.

Lo anterior implica investigar y desarrollar métodos y modelos computacionales innovadores que permitan la integración de un ambiente virtual con retroalimentación de fuerzas, simulando las tareas que debe realizar un médico para adquirir las competencias de sutura.

Este ambiente debe permitir la posibilidad de intercambiar el tipo de experimento a realizar e incorporar dispositivos hápticos, con el fin de presentar una modalidad innovadora al mercado nacional. Se utilizará como caso de estudio la realización de suturas.

1.4 Hipótesis

La integración de dispositivos hápticos, permitirá la creación de un ambiente virtual de aprendizaje para entrenamiento médico, tal que el estudiante perciba de manera realista los elementos involucrados en la tarea de sutura.

Los participantes podrán percibir el ambiente virtual con hápticos para el entrenamiento de tareas de sutura cercano a la percepción de un ambiente real.

1.5 Objetivo general

Desarrollar modelos y técnicas computacionales que permitan construir ambientes virtuales de entrenamiento médico incorporando dispositivos hápticos, para adquirir habilidades de sutura.

1.6 Objetivos particulares

- Modelar los principales componentes de la tarea de sutura (piel, pinzas, aguja, hilo, etc.)
- Desarrollar nuevas técnicas para la detección de colisiones de objetos deformables y su respectiva generación de haptic rendering.
- Optimizar el uso de los recursos computacionales para mejorar el desempeño y tiempo de respuesta del ambiente háptico (uso de GPU).
- Integrar todos los elementos necesarios para contar con un ambiente virtual de aprendizaje para entrenamiento médico con dispositivos hápticos.
- Desarrollar como caso de estudio el ambiente de entrenamiento médico para un caso de sutura.

1.7 Organización del documento

Este documento se encuentra organizado de la siguiente forma:

En el capítulo 2, se detallan los principios de funcionamiento de los dispositivos hápticos, sus principales características y diversas formas de clasificarlos. También se describen algunos de los dispositivos más utilizados en el desarrollo de aplicaciones y se enlistan de forma genérica las áreas en las que se aplican los dispositivos hápticos.

En el capítulo 3, se muestra los principios teóricos físicos y matemáticos, necesarios para el desarrollo de aplicaciones, así como algunos de los algoritmos existentes para el modelado de nuestro caso de estudio y los aplicables en el ámbito de las gráficas computacionales. Se describe además la arquitectura más empleada en la construcción de aplicaciones que involucran desarrollos computacionales con dispositivos hápticos. Así como las características que deben ser tomadas en cuenta para la construcción de dichas aplicaciones.

El capítulo 4 muestra el trabajo relacionado con esta propuesta, donde se describen algunas de las aplicaciones que han sido desarrolladas y que tienen usos prácticos.

El capítulo 5 contiene la propuesta principal de este documento, que consiste en la integración de los componentes de un ambiente virtual de aprendizaje que incorpora dispositivos hápticos. También se describen otros aportes de este trabajo, entre los que se destaca un algoritmo para la detección de colisiones entre un dispositivo háptico y una superficie flexible y las técnicas empleadas para la generación de respuesta háptica así como el uso de librerías de PhysX configuradas para modelar la piel del ser humano

En el capítulo 6 se muestra el desarrollo del caso de estudio SutureHap, incluyendo las características consideradas para la elección del ambiente de desarrollo empleado y los avances hasta el momento.

El capítulo 7 contiene la evaluación y análisis de las pruebas realizadas para validar las diferentes etapas de construcción de SutureHap.

El capítulo 8 presenta las conclusiones y el trabajo futuro a realizar y en el capítulo 9, se muestran las publicaciones derivadas de esta investigación.

Capítulo 2.

Los dispositivos hápticos

2 Los dispositivos hápticos

En este trabajo se plantea la integración de dispositivos hápticos en ambientes virtuales de aprendizaje, por lo que se considera importante conocer los diferentes tipos de dispositivos hápticos, sus características principales y principios de su funcionamiento. En este capítulo se hará un breve análisis de aquellos que serán de utilidad en el marco de este trabajo de investigación.

2.1 Descripción y principios de funcionamiento

Un dispositivo háptico ideal, es aquél en el que un usuario no pudiera distinguir entre estar tocando un objeto en el mundo real o en el mundo virtual (Massie, 1993). Las superficies duras, tales como paredes, se sentirían con la misma dureza que en la vida real. Las esquinas serían percibidas inclusive con filos y el usuario sería capaz de distinguir superficies con diversas texturas.

Por otra parte, un dispositivo háptico real, posee una cierta cantidad de fricción, la cual no solamente agrega ruido al sistema, sino que a largo plazo y en casos extremos, puede fatigar al usuario. El dispositivo en sí, posee cierto grado de inercia, la cual puede no representar problema si el usuario lo mueve en forma lenta, pero, si lo hace de forma rápida, la inercia del sistema puede generar una sensación indeseable, similar a estar

arrastrando un peso adicional y también puede limitar la velocidad máxima a la que el dispositivo responda.

Un dispositivo real, se debe balancear correctamente, a fin de compensar las diferentes fuerzas externas, incluyendo la gravedad. Deberá contar con mecanismos que proporcionen la reacción suficiente a una estimulación y una sensación de esfuerzo suficiente para simular superficies duras (Massie, 1993). La resolución debe ser alta, a fin de proporcionar con gran detalle las posibles texturas del ambiente virtual y el área de movimiento deberá ser lo suficientemente grande, a fin de simular de forma la más real el espacio de trabajo.

Existen dos variaciones fundamentales en el control de los dispositivos hápticos: control por impedancia y control por admitancia. Difieren no solamente en el tipo de control, sino en la estructura mecánica (Q., Lammertse, Frederiksen, & Ruitter, 2001) y ambos tienen pros y contras.

Control por impedancia: En estos dispositivos, el usuario mueve el dispositivo y éste reacciona con una fuerza cuando se encuentra un objeto virtual. Desde el punto de vista del dispositivo, esto significa un desplazamiento como entrada y una fuerza de reacción como salida. Lo anterior implica que el usuario inevitablemente sienta la masa y la fricción del dispositivo. Los dispositivos con control por impedancia, son ligeros y manejables, normalmente alimentados con motores de corriente directa (CD). Los principales ejemplos de este tipo de control son los construidos por la empresa Sensable⁷ y corresponde a la familia Phantom[®]. Más adelante se describirá uno de los dispositivos de esta familia.

Control por admitancia: En este tipo de control, cuando el usuario ejerce una fuerza sobre el dispositivo, este reacciona con un desplazamiento proporcional a la misma, esto es, fuerza como entrada y desplazamiento como salida. Este tipo de control, siempre considera libertad en el diseño mecánico del dispositivo, ya que el desplazamiento y la inercia pueden reducirse mediante servo mecanismos. Por esta razón, los mecanismos de este tipo son bastante más robustos que los controlados por impedancia y son capaces de desplazarse con mucha fuerza y rigidez.

⁷ <http://www.sensible.com> consultado en octubre de 2009.

Debido a lo anterior, se prefiere el uso de estos dispositivos en aplicaciones industriales, tales como simuladores de vuelo. Sin embargo debido a su complejidad, existen pocos dispositivos hápticos con este tipo de control, ya que normalmente son muy voluminosos y deben tener un cuidadoso diseño para poder interactuar de forma segura con los seres humanos debido a su fuerza y rigidez. Un ejemplo de estos dispositivos, es el HapticMaster de la empresa FCS Control Systems (ahora Mog Corporation)⁸

A continuación, se realizará una breve descripción de algunos dispositivos hápticos que son utilizados en diversas investigaciones. Cabe mencionar que algunos de ellos fueron utilizados en la realización de este trabajo.



Figura 2.1 Dispositivo HapticMaster de la empresa FCS Control Systems (Hayward et al., 2004)

2.1.1 Haptic Master:

Este dispositivo utiliza un algoritmo de control por impedancia. La fuerza de interacción es medida a partir de un modelo virtual que calcula el vector posición, velocidad y aceleración (PVA) del objeto contactado. A partir de la fuerza, el modelo virtual define el espacio en el que interactúa el objeto (fuerza de gravedad, fricción del ambiente, etc.) y las propiedades del objeto en cuestión (masa, rigidez, fricción, etc.). El modelo virtual normalmente contiene una masa diferente de cero para evitar aceleraciones infinitas y disminuir la inestabilidad. Este vector PVA, sirve como referencia para alimentar al controlador

⁸ <http://www.moog.com/products/haptics-robotics/> consultado en noviembre de 2009.

Los dispositivos hápticos

proporcional derivativo (PID)⁹ que controla al robot. Este controlador, puede suprimir la masa del manipulador en un factor de seis y cancelar la fricción interna del sensor de fuerza.

El hardware de este dispositivo está compuesto principalmente por el brazo y la unidad de control. El Haptic Master se muestra en la Figura 2.1. En el extremo final del brazo, pueden colocarse diferentes efectores, fijos o hasta con tres grados de libertad, que se pueden usar para la simulación de diversos objetos virtuales. Tal como se muestra en la Figura 2.2.

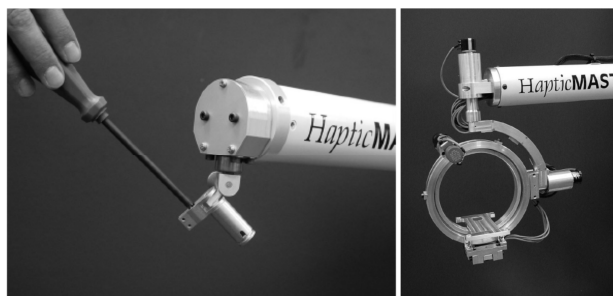


Figura 2.2 a) Desarmador colocado en efector final.

b) Efector final con un grado de libertad activo y dos pasivos, utilizado para terapia. (Hayward et al., 2004)

Las especificaciones generales de este dispositivo, de acuerdo al fabricante, se muestran en la Tabla 2.1. Para su incorporación a los ambientes virtuales, este dispositivo utiliza HapticAPI, librerías diseñadas para trabajar con C++ y se conecta con la computadora mediante una interfaz Ethernet.

De la Tabla 2.1, se describirán a continuación los parámetros más importantes:

Volumen de trabajo o espacio de trabajo: Corresponde a la dimensión que puede alcanzar el dispositivo considerando los tres ejes coordenados, se mide en m³ o simplemente se proporcionan las longitudes máximas que alcanza por cada eje.

Resolución: Indica el movimiento mínimo que puede ser detectado o efectuado por el dispositivo háptico. Se indica en submúltiplos de metro o en puntos por pulgada.

⁹ Mecanismo de control por retroalimentación

Fuerza: Es la fuerza que el dispositivo puede oponer, como una combinación de sus actuadores en un punto determinado. La fuerza nominal, es con la que el dispositivo trabaja normalmente. Se le llama fuerza pico ó máxima a la que el dispositivo puede presentar por breves periodos de tiempo.

Velocidad máxima: Representa la velocidad con la que el dispositivo puede desplazarse o puede ser desplazado, considerando que la inercia debe ser compensada para conseguir simulaciones más óptimas.

Tabla 2.1 Especificaciones generales del Haptic Master

Especificación	Valor:
Volumen de trabajo	80 (l)
Resolución del efector final sin carga	4-12 μm
Rigidez mecánica del efector final (sin carga) ¹	
Dirección -X	400 N/mm
Dirección -Y	0.7 N/mm
Dirección -Z	41N/mm
Fuerza nominal/pico	100/250 N
Inercia mínima	2 (Kg)
Velocidad máxima del efector final sin carga	1.6 m/s
Máxima aceleración/desaceleración	10/50 (m/s) ²
Sensibilidad de la fuerza	0.01 (N)
¹ Medida con 1 Kg. de carga en el centro del área de trabajo	

2.1.2 Dispositivo Phantom:

Este dispositivo, comercializado por la empresa Sensable¹⁰, fue originalmente desarrollado por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), (Massie, 1993). Se trata de un dispositivo de escritorio que provee una interfaz que manifiesta fuerza entre el usuario y la computadora, está controlado por un algoritmo de control de impedancia. Actualmente existen varias variantes de este dispositivo (Phantom Omni, Phantom Desktop, Phantom Premium, Phantom Premium 6DOF), lo que cambia es el efector final. Puede ser una pluma

¹⁰ www.sensable.com, ahora Geomagic: www.geomagic.com/en/products/phantom-omni/overview

o un dedal donde el usuario agarra la pluma o inserta su dedo en el dedal que está conectado al mecanismo del dispositivo, para retroalimentar ahí las sensaciones e interactuar con objetos sólidos.



Figura 2.3 Dispositivo Phantom Omni (Sensable, 2012)

Su constitución mecánica consta de tres motores de CD conectados a una transmisión y codificadores de posición para las coordenadas x,y,z . El torque de los motores es transmitido por una serie de cables pre-tensados que reducen la rigidez del dispositivo, gracias a su ligera construcción de aluminio. Asimismo, los tres ejes coinciden en un sólo punto, de tal forma que se elimina el torque en ese punto, existiendo solo fuerza. Lo anterior permite establecer un solo punto de contacto en el mundo virtual, aumentando la sensación del ambiente virtual. La Figura 2.3 muestra el dispositivo Phantom Omni.

Este dispositivo ha tenido gran aceptación y uso por parte de diversos investigadores y aplicaciones. Sus especificaciones se muestran en la Tabla 2.2.

Para el desarrollo de las aplicaciones que involucran a este dispositivo, se cuenta con la plataforma de desarrollo OpenHaptics toolkit, soportado por la propia empresa Sensable©. Opera sobre las plataformas de Windows®, Linux y Mac OS®, empleando de forma nativa Open GL para el entorno gráfico. Sus librerías están originalmente diseñadas para utilizarse con Visual C++ o gcc dependiendo del sistema operativo. El fabricante recomienda el uso de tarjetas aceleradores gráficas para mejorar el desempeño del dispositivo. El costo aproximado de este dispositivo es de 2400 dólares americanos.

Para la aplicación que se presenta en este trabajo, se utilizan dos dispositivos de este tipo.

Tabla 2.2 Especificaciones del Phantom Omni

Especificación	Valor:
Espacio de trabajo Retroalimentado	~6.4 W x 4.8 H x 2.8 D in. > 160 W x 120 H x 70 D mm.
Área de la base del Dispositivo	6 5/8 W x 8 D in. ~168 W x 203 D mm.
Peso	3 lbs. 15 oz.
Rango de movimiento	Movimiento de la mano pivoteando sobre la muñeca
Resolución	> 450 dpi. ~ 0.055 mm.
Fricción	< 1 oz (0.26 N)
Máximo esfuerzo nominal (brazos en posición ortogonal)	0.75 lbf. (3.3 N)
Máxima Fuerza continua (24 hrs.)	> 0.2 lbf. (0.88 N)
Rigidez	Eje X > 7.3 lbs. / in. (1.26 N / mm.) Eje Y > 13.4 lbs. / in. (2.31 N / mm.) Eje Z > 5.9 lbs. / in. (1.02 N / mm.)
Inercia (masa aparente sugerida)	~0.101 lbm. (45 g)
Fuerza de retroalimentación	x, y, z
Sensores de posición [con el mango tipo lápiz]	x, y, z (codificadores digitales) [Pitch, roll, yaw (\pm 5% potenciómetros lineales)]
Interfaz	IEEE-1394 FireWire® port: 6-pin to 6-pin
Plataformas soportadas	Intel o AMD-based PCs
Librerías de desarrollo	OpenHaptics® Toolkit
Aplicaciones	Investigación FreeForm® Modeling™ system, ClayTools™ system

2.1.3 Dispositivo Falcon

Este dispositivo fabricado por la empresa Novint Technologies Inc.¹¹(Figura 2.4) está enfocado principalmente para utilizarse con juegos. Sin embargo, el fabricante brinda como kit de desarrollo una serie de librerías para utilizarse en plataforma Windows, utilizando como lenguaje de programación Visual C++. El manejo gráfico se hace por medio de OpenGL, lo que permite utilizarlo para desarrollar aplicaciones propias.

¹¹ www.novint.com



Figura 2.4 Dispositivo Falcon (Novint Technologies Inc, 2010)

Este dispositivo pertenece a la familia de control por impedancia, ofrece 3 grados de libertad (3-DOF) con una configuración tipo robot-delta¹² y permite intercambiar la empuñadura para colocar diversos dispositivos. Actualmente solo se cuenta con una esfera y una pistola, pero están en desarrollo otras. Se conecta a la computadora mediante una interfaz USB. Los controladores son proporcionados por el fabricante, lo que permite una comunicación y actualización a frecuencias efectivas entre 800Hz y 1KHz.

De acuerdo a (Steve & Hillier, 2009), cuenta con tres motores Mabuchi® RS-555PH-15280, que son monitoreados por codificadores de 320 líneas por vuelta. Estos motores están acoplados a un cilindro de 14.25 mm de diámetro con un cable enrollado; el cual corre hacia los extremos de las piernas de robot y comprime un resorte hacia el lado interno de las mismas. Este arreglo, permite disminuir la fricción y aumentar la fuerza de actuación del mecanismo.

¹² Robot construido a partir de paralelogramos que crea una plataformas móvil (Bonev, 2012)

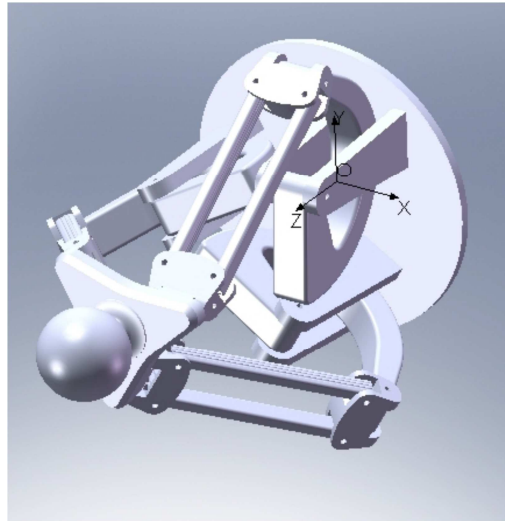


Figura 2.5 Modelo CAD del dispositivo Falcon generado por sus creadores (Steve & Hillier, 2009)

Las especificaciones de este dispositivo, pueden observarse en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Especificaciones del Novint Falcon

Especificación	Valor:
Área de trabajo	4" x 4" x 4"
Fuerza máxima	2 Lbs.
Resolución	>400 dpi
Tamaño	9" x 9" x 9"
Peso	6 lbs.
Interfaz	USB 2.0
Consumo de potencia	30 W

El costo aproximado de este dispositivo es de 200 dólares. En este trabajo de investigación también se utilizó este dispositivo para las pruebas iniciales debido a su bajo costo y se desarrollaron algunas propuestas para la modificación del mismo a fin de aumentar los grados de libertad, que pueden permitir su uso en los ambientes de entrenamiento médico. Sin embargo, por razones de tiempo no fueron desarrolladas.

2.1.4 Virtuose 6D35-45

Se trata de un dispositivo de 6 grados de libertad (6DOF), mostrado en la Figura 2.6, el cual está diseñado específicamente para trabajar en ambientes virtuales. De acuerdo a su fabricante¹³ es el único en el mercado que brinda retroalimentación completa en los 6

¹³ <http://www.haption.com>

Los dispositivos hápticos

grados de libertad. Su espacio de operación corresponde al de un brazo humano. Está compuesto por dos articulaciones principales fijas a una base rotatoria, en la cual el segundo segmento termina con una “muñeca” articulada que permite rotar sobre los tres ejes concurrentes, brindando la posibilidad de intercambiar el actuador final para colocar diferentes tipos de herramientas. En este actuador, se encuentran además tres botones que pueden interactuar con la interfaz gráfica.

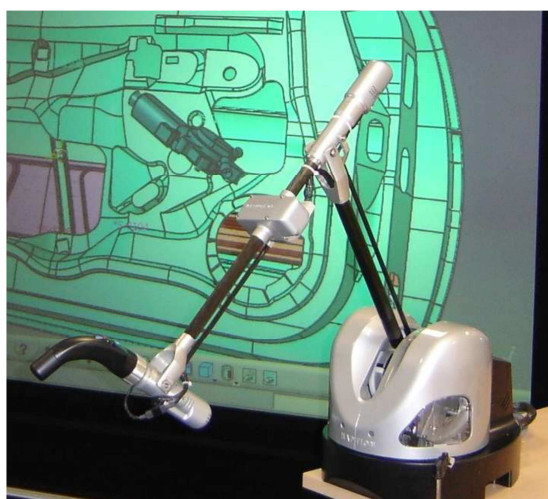


Figura 2.6 Dispositivo Virtuose 6D35-45 (Haption SA, 2010)

Para el desarrollo de aplicaciones gráficas, el fabricante ofrece tres soluciones de software

Tabla 2.4 Especificaciones del Virtuose 6D35-45

Especificación	Valor:
Área de trabajo	450 mm
Torque máximo/continuo	3 / 1 Nm
Fuerza de retroalimentación (continua/pico)	
Eje – 1	5 /15 N.m
Eje – 2	3.1 /9.3 N.m
Eje – 3	3.1 /9.3 N.m
Eje – 4	0.79/2.37 N.m
Eje – 5	0.79/2.37 N.m
Eje – 6	0.79/2.37 N.m
Fuerza máxima/continua	35/10 N
Resolución	6×10^{-3} mm

Virtuose API: Proporciona la funcionalidad para los dispositivos hápticos, IPSI API incluyendo una solución para la detección de colisiones e IPP Core and IPP Human, que permiten el desarrollo de aplicaciones para interacción física entre humanos y objetos. Todos ellos para plataformas Windows y Linux. En el caso de los dos primeros, la programación se realiza por medio de lenguaje C++, mientras que el último, cuenta con su propia interfaz de programación visual. Este dispositivo se conecta con la computadora mediante una interfaz Ethernet.

Este dispositivo pertenece también a la clasificación de los controlados por impedancia. Su diseño “balanceado” permite reducir los efectos de la fricción y los problemas de inercia. En la Tabla 2.4 se muestran sus especificaciones.

2.1.5 CyberGrasp y CyberForce

Mención aparte merecen los dispositivos de la empresa CyberGlove Systems¹⁴, quienes fabrican los dispositivos más complejos para interacción con mundos virtuales. El primero de ellos CyberGrasp® consta de un guante que posee cinco sensores de posición y cinco actuadores, uno para cada dedo, lo cual permite al usuario percibir sensaciones táctiles en la mano completa, brindando la posibilidad de sujetar objetos, percibir su forma y cambiarlos de sitio, en la Figura 2.7 se puede observar este dispositivo. Por otro lado, el dispositivo CyberForce®, consta de un dispositivo CyberGrasp® sujeto a un brazo adicional que permite además de generar retroalimentación para cada dedo, retroalimentación para tres grados de libertad adicionales, proporcionando además la posibilidad de limitar el movimiento en el espacio de trabajo del ambiente virtual. Este dispositivo lo podemos observar en la Figura 2.7 así como la muestra de una posible aplicación, donde se necesita retroalimentación háptica.

¹⁴ <http://cyberglovesystems.com>



Figura 2.7 Dispositivos CyberGrasp, CyberForce con una muestra de una posible aplicación.

Para el uso de estos dispositivos, es necesario generar rutinas de retroalimentación háptica que consideren varios puntos de contacto y de retroalimentación. Por lo cual, es muy amplia la gama de aplicaciones que se puede realizar con ellos, una desventaja de este tipo de dispositivos es el costo, el cual asciende aproximadamente a 200,000 dólares, que lo hace prohibitivo para muchas de las aplicaciones académicas.

2.1.6 Cuadro comparativo

Con el fin de mostrar algunas diferencias y similitudes, que sirvieron como referencia para la toma de decisiones en la solución de esta propuesta de investigación, en la Tabla 2.5 se muestra un cuadro comparativo de las principales características de los dispositivos hápticos descritos anteriormente.

Tabla 2.5 Cuadro comparativo de diferentes dispositivos hápticos

Especificación	HapticMaster	Phantom omni	Novint Falcon	Virtuose 6D35-45
Volumen de trabajo (mm)	80x10 ⁶	160 x 129 x 70	101x101x101	150x150x150
Fuerza de retroalimentación Nominal / Pico	100/200N	0.88 / 3.3 N	2 Lbs.	35 / 10 N
Resolución (mm)	4-12x10 ⁻³	≈55	≈63.5	6
Tipo de control	Admitancia	Impedancia	Impedancia	Impedancia
Incorporación al ambiente virtual	HapticAPI C++	Open Haptics C++	Novint SDK C++	Virtuose API C++
Interfaz	Ethernet	IEEE1394 Firewire	USB 2.0	Ethernet
Grados de libertad	Hasta 6	3	3	6
Precio aproximado en Dólares americanos	No disponible	2400	190	122750

Del cuadro comparativo mostrado en la Tabla 2.5, se puede observar que las principales diferencias radican en el número de grados de libertad, la resolución y la fuerza que pueden oponer. Como se puede observar, la diferencia en precio es significativa. Es importante resaltar que su incorporación al ambiente virtual para todos los dispositivos presentados, se hace por medio de lenguaje C++ y que todos presentan sus propias librerías de desarrollo.

2.2 Aplicaciones de los dispositivos hápticos

Los dispositivos hápticos, tienen aplicación en diversas áreas del conocimiento. Estos están principalmente asociados a interfaces gráficas, enfocados a crear ambientes de realidad virtual y con la misión de remplazar los diferentes controles que se operan mediante el teclado o el ratón. Algunos ejemplos recientes de las diversas áreas en la que se pueden utilizar los dispositivos hápticos son:

Video juegos: Los juegos por computadora han creado situaciones cada vez más reales, que involucran diversos tipos de escenarios y ahora, están aprovechando las ventajas de los dispositivos hápticos. La empresa Novint Technologies Inc¹⁵ ofrece el dispositivo Falcon, enfocado principalmente a diversos juegos que involucran manejo de fuerzas, tales como lanzamientos de baloncesto, boliche, tenis de mesa o incluso las fuerzas relacionadas al disparo de un arma. Este dispositivo permite percibir por ejemplo, el peso del balón de básquet o la sensación de inercia del mismo al moverlo. Otro dispositivo que puede considerarse dentro de esta categoría es el denominado Wii de la empresa Nintendo[®], cuyo mando inalámbrico permite detectar aceleraciones y generar vibraciones, permitiendo de esta forma que el usuario interactúe a través del sentido del tacto.

Artes y creatividad: Los Músicos y artistas visuales han incrementado el uso de las computadoras. No obstante, ellos prefieren utilizar principalmente las manos y por esta razón, los dispositivos hápticos tratan de incrementar las posibilidades de comunicación con las computadoras en estas disciplinas. En la música, los avances de herramientas de síntesis en tiempo real, han incrementado la demanda de controladores interactivos que estaban restringidos por las interfaces MIDI¹⁶ existentes (Hayward et al., 2004) o en las

¹⁵ Novint Technologies Inc. www.novint.com consultada en abril de 2010.

¹⁶ Musical Instrument Digital Interface (Pissano, 2006)

artes gráficas, especialmente en la animación, se desarrollaron algunos trabajos como el de (O'Modhrain, 2000), denominado "Physical Modeling". Recientemente y gracias a la capacidad de cómputo actual, existen trabajos mucho más complejos que involucran sensaciones táctiles, como el denominado "Tine Bech" (Frame, 2010) donde se desarrolló la escultura sonora interactiva *Echidna* que emite sonido propio al ser tocada, o los trabajos que se realizan en la universidad de Birminham¹⁷, donde se experimenta con sensaciones táctiles que pueden aplicarse en museos.

Operación de vehículos: Existen controladores hápticos disponibles comercialmente para el control de automóviles, una muestra de esto es el iDrive©, utilizado en algunos vehículos BMW¹⁸, que permiten controlar diferentes funciones auxiliares, tales como el aire acondicionado, limpiadores y ajustes de la suspensión, entre otros. El control consta de un solo mando giratorio que utiliza retroalimentación háptica, permitiendo al usuario utilizar el control sin verlo.

Educación y capacitación: En ambientes peligrosos, donde hay equipo costoso o donde hay insumos con baja disponibilidad, tales como pacientes quirúrgicos, se pueden emplear ambientes de simulación utilizando hápticos. Particularmente en el caso de cirugías, existen diversas investigaciones y desarrollos. Como por ejemplo en (Thomas, Johnson, Dow, & Stanford, 2001), donde se emplean dispositivos hápticos para entrenamiento de futuros dentistas o en (Miyazaki, Yoshimoto, Sakaguchi, Sano, & Fujimoto, 2006) donde se emplean los dispositivos hápticos integrados a un ambiente virtual para el entrenamiento médico.

Rehabilitación: En esta área se han llevado a cabo varios estudios enfocados a la rehabilitación de diversas partes del cuerpo. Muchos de ellos para personas con deficiencia de movimiento de las extremidades superiores (Adamovich, Qiu, Talati, Fluet, & Merians, 2008) ó para rehabilitación de personas con hemiplejia (Merians, Fluet, Qiu, & Adamovich, 2009), En algunos casos, inclusive se han elaborado hápticos especializados para la rehabilitación de lesiones específicas (Kan, Hoey, & Mihailidis, 2008).

¹⁷ <http://www.biad.bcu.ac.uk/research/site/pages/projectsHaptics.php>

¹⁸ http://www.bmw.com/com/en/insights/technology/technology_guide/articles/idrive.html

2.3 Clasificación de los dispositivos:

Existen varias formas de clasificar los dispositivos hápticos. Dependiendo de su aplicación, grados de libertad, funcionamiento, etc. (Bello, 2006) los organiza en grandes grupos, relacionados con la aplicación o con la forma de interacción, pantallas táctiles, exoesqueletos y dispositivos estacionarios, guantes y dispositivos usables, interacción puntual y dispositivos para aplicaciones específicas. En el caso de este trabajo, nos enfocaremos exclusivamente a la clasificación de acuerdo a su uso, la cual se enlista a continuación.

Teclado programable: Uno de los primeros ejemplos de la implementación de un teclado retroalimentado, es el Clavier Rétroactif Modulaire un proyecto encabezado por Cadoz (1990), el cual consiste de un teclado similar al de un piano que provee una retroalimentación de fuerza controlada por computadora en cada una de sus 16 teclas (Cadoz et. al. 1990). Este trabajo está enfocado a la investigación musical.

Exoesqueletos¹⁹: Los dispositivos exoesqueleto, desarrollados por (Bergamasco et al., 1994), incorporaron diversas observaciones biomecánicas del cuerpo humano. Para hacerlos funcionales, los investigadores utilizaron diversas técnicas para mejorar el funcionamiento de los motores, reducir la fricción y métodos sofisticados guiar los cables y permitieron retroalimentar sensaciones hacia los brazos y manos de la persona que lo usa.

Dispositivos para asir o aferrar: Uno de los primeros dispositivos diseñados para este efecto fue el desarrollado por Howe en 1992, que consiste en un dispositivo de dos grados de libertad, diseñado para dos dedos. Los dedos del usuario interactúan unilateralmente con el dispositivo en el lado interno de las orillas, generando una pinza de precisión. Existen actualmente dispositivos para la mano completa tales como el Cybergrasp. Sin embargo, su uso está enfocado principalmente a aplicaciones de realidad virtual, por lo que se incluye preferentemente en ese rubro.

Interacción puntual: El dispositivo Phantom[®], que es muy popular en las investigaciones, es un ejemplo de esta familia, aunque existen diversas variantes. Generalmente al usuario

¹⁹ Del griego “Exo” (fuera) dispositivo que permite sostener al cuerpo desde fuera de él. <http://www.exoesqueleto.com.es>

se le presenta un asa o un dedal. Este dispositivo incorpora al mismo tiempo tres actuadores y tres sensores, cada uno de ellos para un grado de libertad, el diseño está basado en un eje tipo cabrestante, lo cual evita el uso de engranes y permite amplificar el torque de pequeños motores de CD, con un importante incremento del efecto de amortiguación e inercia, el diseño inicial se describe en (Massie, 1993) y está disponible actualmente de forma comercial a través de la empresa Sensable Technologies²⁰.

Ratones aumentados: Este tipo de ratón fue descrito por Akamatsu (1994), es en general un dispositivo de forma y tamaño similar a un ratón para computadora, pero que incluye dos funciones hápticas, un freno electromagnético que permite programar las fuerzas de fricción y el otro es un transductor que proporciona sensaciones vibro-táctiles, este tipo de dispositivos, se pueden utilizar principalmente para explorar superficies con diferente textura.

Dispositivos para juegos: En 1992, Adelstein y Rosen, muestran un ejemplo de un Joystick con dos grados de libertad y retroalimentación de fuerza. A partir de este trabajo se han diseñado otros dispositivos tipo joystick. Actualmente se encuentran disponibles diversos dispositivos derivados de esta propuesta como el control del XBOX 360^{©21} o el mando del Nintendo Wii^{©22}, los cuales retroalimentan al jugador por medio de vibraciones para representar diferentes situaciones dentro de un juego de video.

Para realidad virtual: Existen diversos dispositivos de este tipo. Sus orígenes se remontan a 1992 en un trabajo presentado por Burdea, que presenta una serie de pistones colocados en los dedos de la mano, de tal forma que presentan oposición a abrir y cerrar la mano. Actualmente el principal exponente de esta tecnología, es Cybergrasp de la empresa VRLOGIC²³, (antes Immersion) que brinda retroalimentación de fuerza en todos los dedos y permite ubicar la posición de la mano en tres dimensiones.

Dispositivos isométricos (o controlados por admitancia): Existen pocos ejemplos de este tipo de dispositivos, pero uno de los más representativos es el Haptic Master (el cual se

²⁰ www.sensable.com

²¹ Marca registrada por Microsoft Corporation,

²² Marca registrada de Nintendo

²³ <http://www.vrlogic.com/html/immersion/cybergrasp.html>

describió anteriormente), de la empresa FCS Control Systems, que consta de un brazo robótico y una unidad de control que permite generar hasta seis grados de libertad en un dispositivo que permite retroalimentar fuerzas de magnitudes bastante considerables.

Capítulo 3.

Dispositivos hápticos y su interacción con los ambientes virtuales

3 Dispositivos hápticos y su interacción con los ambientes virtuales

Las aplicaciones de realidad virtual (VR) simulan escenarios reales o virtuales con los cuales los usuarios pueden interactuar y percibir los efectos de sus acciones en tiempo real. Idealmente los usuarios deben interactuar con el escenario a través de los cinco sentidos. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, las aplicaciones actuales de realidad virtual están limitadas solo al sentido de la vista, sentido auditivo, excepcionalmente al olfato y más recientemente al sentido del tacto. En la Figura 3.1 se muestra la estructura de una aplicación de VR que incorpora los tres sentidos mencionados anteriormente (Salisbury, Conti, & Barbagli, 2004). A continuación se describen los elementos principales que contiene una aplicación de este tipo.

Motor de simulación: Es el encargado de calcular el comportamiento del ambiente virtual a través del tiempo.

Algoritmos de representación visual, auditiva y háptica: Son los encargados de calcular las gráficas del ambiente virtual, sonido y respuesta de fuerza que se presentaran al usuario.

Transductores: Dispositivos que se encargan de convertir las señales eléctricas generadas en los impulsos adecuados para cada sentido; vista, tacto y oído.

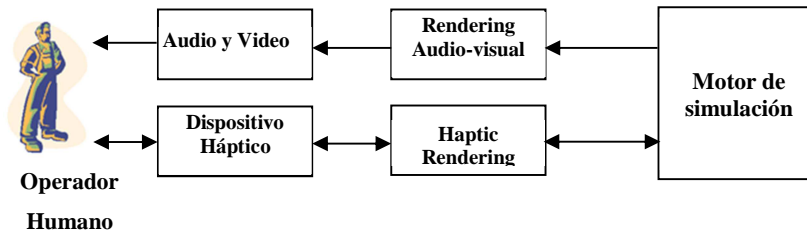


Figura 3.1 Arquitectura básica para una aplicación de realidad virtual que incorpora partes visuales auditivas y hápticas (Salisbury, Conti, & Barbagli, 2004)

En el caso del dispositivo háptico, el usuario normalmente sujeta o usa dicho dispositivo, de acuerdo al tipo de dispositivo utilizado y es el encargado de enviar las sensaciones táctiles. Para el sentido de la vista, el transductor es la pantalla de la computadora y para el sentido del oído, las bocinas de la computadora a través de la tarjeta de audio. Es importante señalar que el dispositivo háptico es bidireccional ya que la comunicación entre el dispositivo y el usuario se realiza por un único punto de contacto, en ambos sentidos. Como puede observarse en la Figura 3.1, existe un bloque encargado de conectar al motor de simulación con los dispositivos responsables de enviar las señales visuales y auditivas al operador humano. Asimismo, existe un bloque separado denominado *haptic rendering* que se encarga de interpretar las señales enviadas por el motor de simulación y convertirlas en sensaciones táctiles a través de un dispositivo háptico. Para facilitar su entendimiento, en la siguiente sección, se dará un tratamiento particular de este bloque, ya que representa una parte fundamental del proceso de síntesis de las sensaciones táctiles en una aplicación computacional.

3.1 Haptic Rendering

Los seres humanos percibimos el contacto con los objetos reales a través de sensores localizados en la piel, articulaciones, tendones y músculos. En (Salisbury et al., 2004) se establece una distinción simple entre la información táctil que es aquella percibida por los sensores de la piel y la información kinestésica, que se adquiere a través de las articulaciones. Normalmente la información que percibimos es una combinación de ambas.

Para hacer posible la interacción con objetos virtuales, se han desarrollado experimentos que evalúan como es la percepción de los humanos de un objeto real cuando se hace a través del dedo desnudo a cuando se explora dicho objeto por medio de una sonda sujeta

con la mano (Klatzky & Lederman, 2008). Los resultados indican que interactuar con objetos virtuales por medio de una sonda rígida, es un método efectivo que permite apreciar sus principales propiedades para identificación y discriminación. Se sugiere además que si la sensación es reforzada con acciones visuales y auditivas, se reduce ampliamente la diferencia de sensaciones entre utilizar una sonda y los dedos. De acuerdo a estos resultados y con el fin de facilitar las interacciones de fuerzas y sensaciones que se pueden reproducir por medio de un dispositivo háptico, se genera una simplificación a partir de considerar que el contacto con los objetos virtuales solamente es puntual. Lo que hace que frecuentemente los dispositivos hápticos cuenten con un mango especial que permite que el usuario lo sujete o introduzca su dedo, dicha interacción puntual puede ser representada por un *Avatar*, a veces también llamado “haptic cursor” (cursor háptico) o “Haptic Interface Point” (HIP).

Haptic Rendering (HR) puede definirse como el proceso mediante el cual los usuarios pueden sentir y manipular los objetos virtuales usando dispositivos hápticos. Los algoritmos para HR permiten realizar el cálculo e interacción de las fuerzas entre la representación de la interfaz y los diferentes objetos que se encuentran en el interior del ambiente virtual. Asimismo, los algoritmos de HR aseguran que el dispositivo háptico envíe de forma correcta al usuario las fuerzas que intervienen en el mundo virtual.

Podemos definir a un *Avatar* como la representación virtual de la interfaz háptica por medio de la cual el usuario físico interactúa con el mundo virtual. La elección del avatar dependerá de lo que queremos simular y de las capacidades del dispositivo. El usuario controlará la posición del avatar dentro del mundo virtual y a partir de ahí, serán enviadas al usuario las fuerzas de reacción de acuerdo a los diferentes contactos que se efectúen entre el avatar y los objetos del mundo virtual.

La geometría del avatar y el tipo de contactos serán los responsables de estas fuerzas. Para las aplicaciones se pueden elegir diferentes tipos de avatar, ya sea volumétrico o puntual.

A partir de esta simplificación, en (Salisbury, 2004) se plantean dos técnicas principales para el cálculo de fuerzas: fuerzas debidas a la geometría del objeto y fuerzas debidas a las propiedades de la superficie del objeto.

3.1.1 Haptic Rendering debido a la geometría del objeto

El objetivo principal de esta técnica, es recrear la interacción de fuerzas que percibirá un usuario cuando toca la superficie de un objeto libre de fricción y textura. Esta interacción de fuerzas dependerá exclusivamente de la forma geométrica de dicho objeto y del avatar que entre en contacto con el mismo dentro del ambiente virtual. En general, puede considerarse que el número de grados de libertad necesarios para describir la interacción de fuerzas entre el avatar y el objeto virtual tiene una correspondencia directa con el dispositivo háptico que se esté utilizando, por lo que el avatar debe coincidir con el dispositivo que se utilice.

En general, los algoritmos de HR se componen de dos partes principales: (a) detección de colisiones y (b) Respuesta a la colisión (Figura 3.2). El algoritmo funciona de la siguiente forma: Cuando el usuario manipula el cursor háptico, se detecta una nueva posición y orientación. Si se detecta una colisión con el objeto virtual, se calcula y envía una interacción de fuerzas, basándose en las reglas preestablecidas para el tipo de colisión producida, enviando al usuario la sensación táctil apropiada para la forma y/o detalles de la superficie del objeto en cuestión. La frecuencia de actualización de la fuerza enviada al usuario debe ser del orden de 1Khz. para evitar vibraciones indeseadas o superficies demasiado blandas (Basdogan & Srinivasan, 2002).

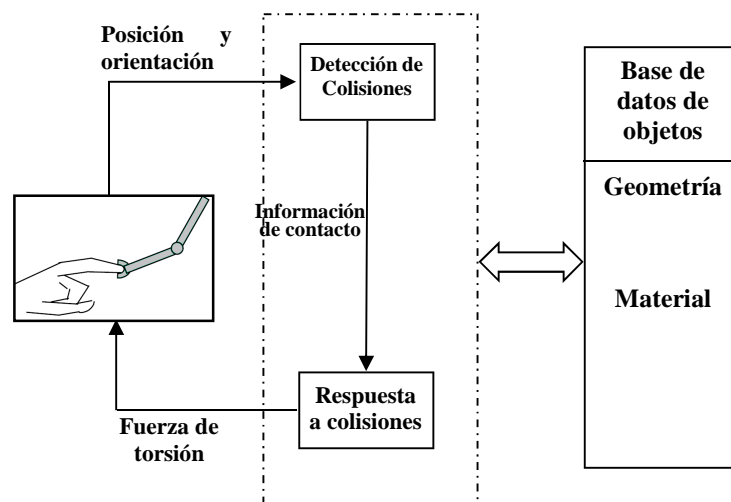


Figura 3.2 Algoritmo de Interacción háptica, compuesto de dos partes, detección de colisiones y respuesta a la colisión (Basdogan & Srinivasan, 2002)

De acuerdo a los grados de libertad de interacción, la fuerza de retroalimentación que se aplica presenta diversas características. En el caso de un grado de libertad (1-DOF), el dispositivo, medirá la posición del usuario y aplicará una fuerza solamente en un eje. Algunos de los ejemplos que se pueden considerar como 1-DOF son: la perilla de una puerta que gira, una tijera de corte o el émbolo de una jeringa cuando se inyecta líquido a un paciente.

El avatar correspondiente en el caso de una tijera, puede ser un par de puntos que se desplacen exclusivamente sobre un eje, sobre el cual se ejercerá la acción de la fuerza, simulando la que se aplicaría sobre los dedos índice y pulgar.

No obstante que las aplicaciones de los dispositivos de 1-DOF son muy limitadas, este tipo de interacción fundamental permite plantear el problema básico de representación háptica; la representación de una pared virtual, esto es, crear el comportamiento de fuerzas que se presentaran cuando se hace contacto con un objeto que es infinitamente rígido, que sirve frecuentemente como punto de referencia para estudios de estabilidad (Colgate & Brown 1994)(Adams & Hannaford 1999).

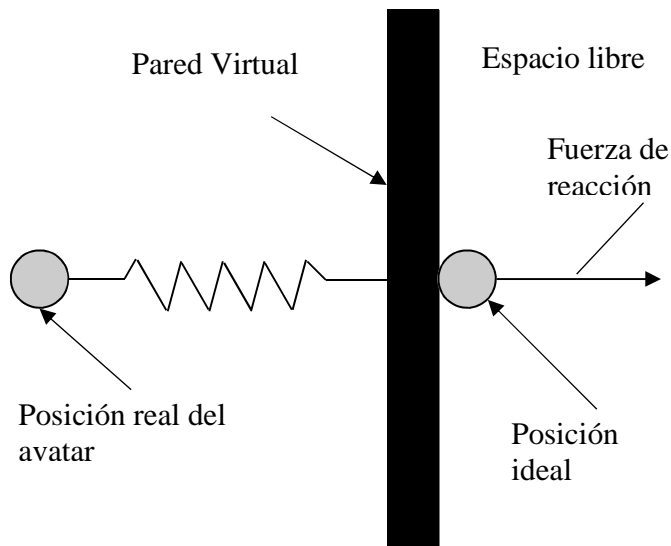


Figura 3.3 Concepto de pared virtual con interacción de un grado de libertad. (Salisbury, Conti, & Barbagli, 2004)

La naturaleza discreta de los dispositivos hápticos provoca que el avatar siempre penetre el objeto virtual con el que tiene contacto. La parte positiva de esto, es que el algoritmo de force-rendering utiliza la información referente a la distancia de penetración como base

para sus cálculos. Sin embargo, dicha penetración produce efectos indeseables tales como vibraciones, en la Figura 3.3 se muestra la representación de una pared virtual, donde se asume que el avatar se mueve a lo largo del eje x , si hacemos que $x < x_w$ represente la pared, el algoritmo de representación háptica, estará definido por:

$$F = \begin{cases} 0 & x > x_w \\ K(x_w - x) & x \leq x_w \end{cases}$$

Donde:

F es la fuerza de reacción.

K es la rigidez del objeto (idealmente muy grande).

En el caso de interacción con dos grados libertad (2-DOF), existen diversos ejemplos en nuestra vida diaria, tal como el uso de un ratón para interactuar con la computadora. Sin embargo, en la mayoría de los casos se utiliza este tipo de interfaces para interactuar con ambientes virtuales de tercera dimensión (3D), con la finalidad de reducir complejidad y costos. En este caso, se utilizan en muchas ocasiones modelos de interacción de tres grados de libertad (3-DOF) restringidos, que pueden interactuar con superficies de dos dimensiones, por lo tanto, se procederá a hacer una descripción más detallada de la interacción con tres grados de libertad.

En el caso de 3-DOF, se considera un avatar que puede ser expuesto a fuerzas resultantes en cada uno de los ejes en el espacio. Normalmente se utiliza la representación de una pequeña esfera que será la que entre en contacto con el objeto virtual. Para calcular la interacción de dichas fuerzas con objetos 3D virtuales, los algoritmos de HR utilizan información acerca de que tanto penetra dicho avatar en el objeto virtual, tal como ocurre en el caso de 1-DOF. Sin embargo, el cálculo de la dirección de la fuerza resultante es más complejo que para el caso de 1-DOF. Los casos más simples, consideran simplemente la descomposición vectorial de las fuerzas en cada eje, sin considerar las posiciones previas del avatar.

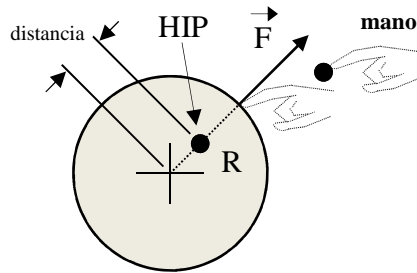


Figura 3.4 Haptic Rendering de una esfera 3D en un ambiente virtual (Basdogan & Srinivasan, 2002)

Para describirlo, se puede considerar una esfera rígida con una superficie libre de fricción, colocada en el origen de un espacio virtual 3D, tal como se aprecia en la Figura 3.4. En este caso el usuario solo puede interactuar con la esfera a través del cursor háptico que llamaremos punto de interacción háptico (Haptic Interaction Point, HIP), el cual corresponde en el mundo real a tocar la esfera con la punta de una vara. El dispositivo háptico permanecerá pasivo mientras no exista ningún contacto con la esfera, y no reflejará ninguna fuerza hacia el usuario.

Cuando se hace contacto con el objeto virtual, el HIP penetra la esfera en el punto de contacto, lo cual provoca que se calcule y refleje una fuerza hacia el usuario proporcional a la profundidad de la penetración, dado que no existe fricción. La fuerza resultante, será normal a la superficie de la esfera.

La magnitud de la fuerza se calcula de manera similar al caso de 1-DOF, debido a que se trata de una superficie rígida. Es decir:

$$F = k\Delta x$$

Donde k es el coeficiente de rigidez y Δx es la profundidad de la penetración. Si el coeficiente k es de un valor bajo, puede dar la sensación de un material muy blando, mientras que un valor muy alto, puede generar vibraciones indeseables.

Este método, si bien es muy sencillo de implementar, presenta fallas cuando se trata de calcular las fuerzas resultantes en objetos pequeños, delgados o con formas muy complejas, los cuales pueden ser fácilmente traspasados sin retroalimentar ningún tipo de fuerza. Para compensar estos problemas se han creado diversos algoritmos que mejoran la percepción de este tipo de interacción puntual, como el desarrollado por (Zilles & Salisbury, 1995), en el

cual mediante cálculos geométricos, se calcula la posición entre el HIP y el lugar en el que idealmente debería encontrarse en la superficie del objeto, este punto, se conoce como Ideal Haptic Interface Point (IHIP) (también llamado good-object, proxy point o surface contact point)(Basdogan & Srinivasan, 2002). La Figura 3.5 muestra la concepción básica de este algoritmo. Cuando se pasa de HIP_2 a HIP_3 , se proyecta una fuerza F_3 , sobre la superficie superior de la figura. Sin este algoritmo, el sentido de la fuerza sería hacia la derecha, dado que el punto HIP_3 se encuentra más cerca de ese extremo de la figura. El efecto de este algoritmo, se aprecia mejor si al usuario solo se le muestran los puntos IHIP.

Así como se desarrolló la técnica anterior para figuras regulares, se han desarrollado trabajos que permiten la interacción puntual con poliedros, NURBS, superficies implícitas y objetos volumétricos (Zilles & Salisbury, 1995).

Las técnicas de interacción puntual vistas hasta ahora, solamente involucran un punto de contacto. Sin embargo, existen otras propuestas de interacción, en las cuales, el punto de interacción no es solamente un punto, sino un segmento de línea o un objeto 3D, tal como muestra la Figura 3.6.

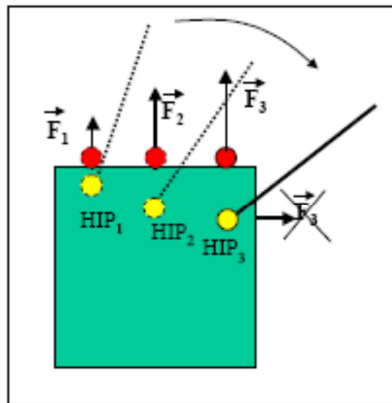


Figura 3.5 Algoritmo de HR basado en interacción puntual que calcula la fuerza resultante F y el IHIP (rojo) en cada interacción a partir de la posición del HIP (amarillo). (Basdogan & Srinivasan, 2002)

Cuando se modela la sonda de prueba como un segmento de línea, debe tomarse en cuenta su orientación y deben registrarse las colisiones entre la línea finita y los objetos. Esta aproximación permite al usuario tocar simultáneamente varios objetos. Por esta razón, además de la respuesta de fuerza, también es necesario simular respuestas de torque, lo cual no es posible con aproximaciones puntuales (Figura 3.6c).

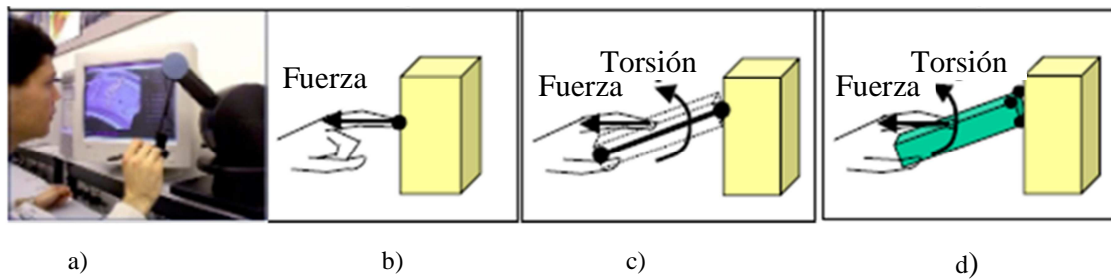


Figura 3.6 Métodos existentes de haptic rendering de acuerdo a la forma del objeto de prueba b) Un punto, c) Un segmento de línea, d) Un objeto 3D. (Basdogan & Srinivasan, 2002)

Esta forma de representación, considera el paso intermedio entre la interacción puntual y la interacción entre objetos 3D. Esta técnica es útil cuando el objeto que sujeta el usuario puede ser representado por segmentos de recta, como en manejo de instrumentos quirúrgicos y laparoscópicos. Cuando esto no es posible, se debe utilizar una representación 3D. Sin embargo, este tipo de representación consume muchos recursos computacionales, debido a que pueden existir varios puntos de contacto entre los objetos.

3.1.2 Haptic Rendering debido a la superficie del objeto

En muchas ocasiones, es necesario presentar al usuario los detalles de las superficies y no solamente la forma de los objetos. En gráficas computacionales se utilizan en ocasiones diferentes tipos de sombreado o iluminación para resaltar la forma o las aristas de los objetos. En HR se pueden aplicar técnicas similares con el fin de transmitir las sensaciones hápticas al usuario. Por ejemplo, en (Ho & Basdogan, 1997) se efectúan una serie de cálculos de las normales en cada vértice de acuerdo al promedio de las resultantes de los polígonos vecinos, considerando los diferentes ángulos, para que cuando se realice en cálculo en tiempo real, sea posible detectar los puntos de colisión que dividan el triángulo de contacto en tres sub-triángulos.

La simulación háptica de los detalles de fricción y textura mejoran significativamente el realismo de los mundos virtuales, puesto que la fricción es casi imposible de evitar en el mundo real y las superficies sin fricción se pueden sentir como hielo cuando son exploradas con los dispositivos hápticos (Basdogan & Srinivasan, 2002). De la misma forma, la mayoría de las superficies reales están cubiertas por algún tipo de textura que permite a nuestro sentido del tacto diferenciarlas entre sí.

Una textura háptica es una combinación de variaciones a pequeña escala de la superficie geométrica del objeto, así como sus propiedades adhesivas y de fricción. Una forma de representar textura y fricción de forma háptica, puede hacerse al modificar y crear pequeñas perturbaciones en el vector de fuerza que se envía al usuario, a partir de usar las propiedades y geometría del material que se explore.

La diferencia principal entre fricción y textura del material para efectos hápticos, consiste en que el modelo de fricción crea solo fuerzas tangenciales normales para la superficie en dirección opuesta al movimiento de la sonda. Mientras que el modelado de textura puede crear tanto fuerzas normales como tangenciales en cualquier dirección, como muestra la Figura 3.7, en donde la fuerza que se envía al usuario es la suma de los vectores normal, tangencial y de fricción:

$$F_{\text{usuario}} = F_n + F_t + F_f$$

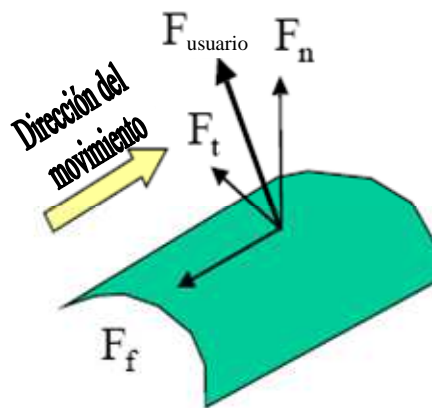


Figura 3.7 Fuerzas que actúan en el usuario durante la simulación háptica de fricción y textura. (Basdogan & Srinivasan, 2002)

Para el cálculo de la fuerza normal, puede utilizarse el mismo cálculo descrito anteriormente que fue empleado para el caso del ejemplo de la esfera, es decir $F_n = k\Delta x$. Para el caso de la fricción, se debe crear un vector de fuerza de la forma $F_f = \mu F_n$, donde μ es el coeficiente de fricción, que a su vez está compuesto por el coeficiente estático y dinámico.

Para la simulación de texturas, es necesario cambiar la magnitud y dirección del vector normal de fuerza usando el gradiente de textura en el punto de contacto.

Utilizando estos principios ha sido posible la simulación de diversos efectos de textura, como el caso del trabajo de (Salisbury, Brock, Massie, Swarup, & Zilles, 1995), en el que simulan fricción estática y dinámica, con el fin de que el usuario perciba con un dispositivo háptico el fenómeno que ocurre cuando se intenta mover un objeto con cierta masa sobre una superficie con fricción (stick-slip effect); de igual forma, también (Green & Salisbury, 1997) consiguieron simular el efecto de desplazarse sobre un papel de lija.

El despliegue gráfico y la percepción de texturas en ambientes virtuales, ha requerido profundas investigaciones, principalmente por el hecho de que las texturas en los ambientes reales vienen en diferentes formas. Debido a que las texturas se han estudiado profundamente en los ambientes gráficos, se han aprovechado con éxito estos principios para las texturas hápticas. En este caso, se parte de construir un “campo de textura” a partir de un mapa de imagen 2D. En el área de gráficas, una textura puede crearse a partir de texels²⁴ 2D con un solo color o intensidad de gris, en textura háptica, este texel se representara como una altura variable, para lograr la representación de la textura. En primera instancia se mapea esta imagen 2D sobre la figura que se desea representar, que puede ser un polígono, un plano, una esfera, etc. y posteriormente se accede a cada uno de los texels que representan las diferentes alturas sobre la superficie definida previamente.

3.1.3 Haptic Rendering de objetos deformables

Los objetos deformables han sido estudiados ampliamente en el ámbito de las gráficas computacionales. Sin embargo, al añadir la retroalimentación háptica, se hace necesario estimar la forma que puede tomar el objeto, así como la magnitud y dirección de las fuerzas que deben ser reflejadas al usuario a través de un dispositivo háptico.

Existen dos técnicas principales para caracterizar la deformación de las superficies (Basdogan & Srinivasan, 2002). Modelos deformables basados en características geométricas y modelos basados en la Física. En el caso de los basados en geometría, el objeto o el espacio alrededor de él es deformado con base en manipulaciones geométricas, controladas por el usuario. En el caso del modelado basado en la Física, las técnicas de deformación involucran movimiento e interacciones dinámicas. Las técnicas geométricas

²⁴ Texel: Unidad básica de representación de textura usada en el área de gráficas computacionales

son más fáciles de implementar y consumen menos recursos, pero no necesariamente simulan las características mecánicas de la deformación. Las técnicas basadas en la física, forzosamente tiene que simular el comportamiento de los objetos deformables, pero consumen mayor cantidad de recursos computacionales, haciendo difícil su implementación en aplicaciones de tiempo real. En éstas últimas, se tiende a utilizar enfoques híbridos, a fin de conseguir los mejor de ambas técnicas (Basdogan & Srinivasan, 2002).

Para el caso de los modelos deformables basados en geometría, las técnicas que destacan son: Basado en vértices y basado en Spline, mientras que en el caso de los modelos físicos se tiene: basado en partículas, elementos finito y esferas finitas o “meshless”.

La problemática principal de la modelación de los objetos deformables estriba en la complejidad de los sistemas dinámicos. La tendencia actual, dado el crecimiento de los sistemas de cómputo, es retomar los modelos físicos, principalmente los basados en partículas y derivar la complejidad de cómputo hacia el GPU²⁵ (Altomonte, Zerbato, Botturi, & Fiorini, 2008).

Un ejemplo de esta tendencia, puede verse en (Zhang, Li, Wang, & Ma, 2008), donde se muestra un algoritmo para detección rápida de colisiones que utiliza el GPU para dicha detección.

3.1.4 Haptic Rendering y el GPU

El crecimiento de la capacidad de cómputo de los procesadores y la utilización de GPU para cómputo genérico (GPGPU) con algoritmos paralelos, ha motivado que se retomen y modernicen técnicas que se había abandonado o descartado por falta de capacidad en los procesadores, por ejemplo en (Kılıç, Koçak, Konukseven, & Mumcuoğlu, 2006) se utiliza la capacidad del GPU, para generar haptic rendering y detectar colisiones por medio del envío de rayos (ray-casting). En el mismo sentido, (Courtecuisse et al., 2010) plantean el uso del GPU para simular en tiempo real deformaciones en tejidos blandos, con la posibilidad de realizar cortes e interactuando con dispositivos hápticos, el caso de estudio

²⁵ GPU.- Unidad de procesamiento gráfico (Graphics Procecesing Unit)

planteado es un sistema de entrenamiento para cirugía laparoscópica de extracción parcial de hígado.

3.2 Algoritmos de detección de colisiones

Existen diversos algoritmos que permiten la detección de colisiones dentro de los ambientes virtuales. Este tipo de algoritmos pertenece al campo de estudio de las gráficas computacionales y las mismas técnicas pueden aplicarse a los sistemas que involucran dispositivos hápticos. Los algoritmos para detección de colisiones nos permiten:

- Determinar si dos objetos han colisionado y comparten el mismo espacio
- Determinar la distancia que los separa
- Determinar la profundidad de penetración
- Definir el o los puntos que se encuentran en contacto.

Considerando que el área de detección de colisiones constituye por si misma una área de investigación y que solo seremos usuarios de los algoritmos, solo se mencionaran las técnicas principales que pueden ser útiles para HR sin profundizar en los principios que las rigen.

3.2.1 Mallas poligonales

Cuando se trabaja con mallas poligonales, los principales casos son:

Intersección de un segmento de línea con un triángulo, en este caso es necesario encontrar el punto de intersección que es común a la línea y al plano formado por el triángulo, descartando si el punto está fuera del segmento. Se sugiere el uso de coordenadas baricéntricas para determinar si el punto está dentro o fuera del triángulo. (Figura 3.8)

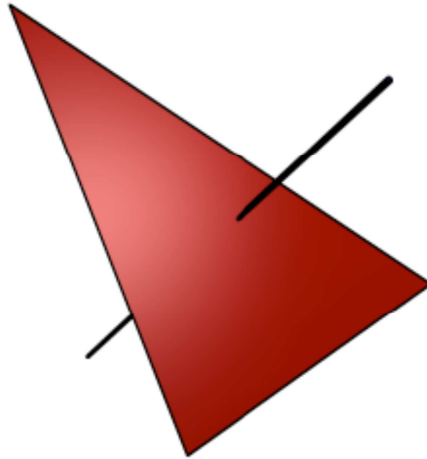


Figura 3.8 Intersección de un segmento de línea y un plano (Salisbury, Barbagli, & Conti, 2010)

Intersección entre dos triángulos, es necesario considerar que triángulos se intersectan. Si alguno de ellos cruza el plano formado por el otro, hay que calcular si existe coincidencia de espacio entre los vértices que forma cada uno de los triángulos. Si es así, hay que determinar el intervalo de la línea que forma la intersección. (Figura 3.9)

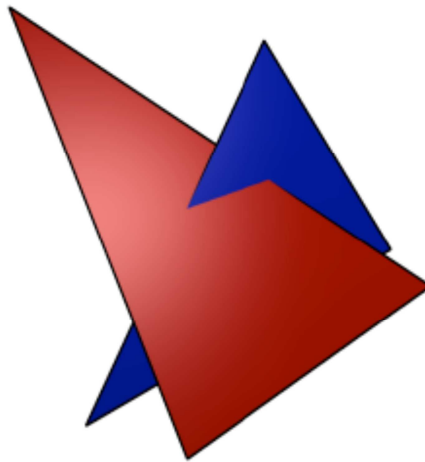


Figura 3.9 Intersección de dos triángulos (Salisbury, Barbagli, & Conti, 2010)

3.2.2 Espacios Volumétricos

Cuando se trata con espacios volumétricos, los principales casos están representados por la intersección entre esferas (sphere-sphere) y entre cubos (box-box). Para los cubos, se tiene varios casos: ejes alineados AABB (Axis-Aligned Bounding Box) y ejes orientados OBB (Oriented Bounding Box), lo cuales se observan en la Figura 3.10.

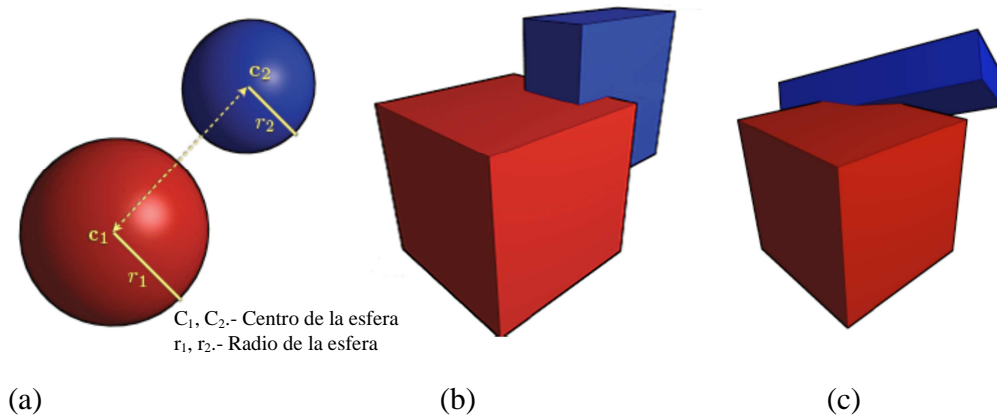


Figura 3.10 Colisiones a)Esfera-esfera, b) AABB c) OBB (Salisbury, Barbagli, & Conti, 2010)

Colisiones entre poliedros: cuando trabajamos con poliedros complejos, normalmente se considera que estos están formados por mallas. El caso más sencillo es cuando sabemos que los poliedros son convexos, para este fin, se hace la descomposición de cada una de sus caras para convertirlos en planos, buscando colisiones entre vértices y caras o entre aristas y caras. (Figura 3.11)

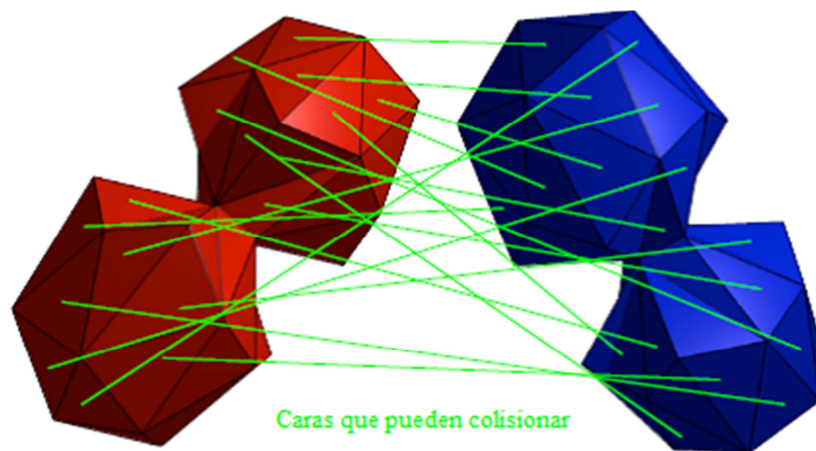


Figura 3.11 Colisiones entre poliedros convexos (Salisbury, Barbagli, & Conti, 2010)

3.2.3 Objetos no convexos

Cuando se trabaja con objetos no convexos, se emplean diferentes técnicas. Una de ellas consiste en la descomposición de la figura en partes que son sean convexas, será necesario aplicar la técnica anterior.

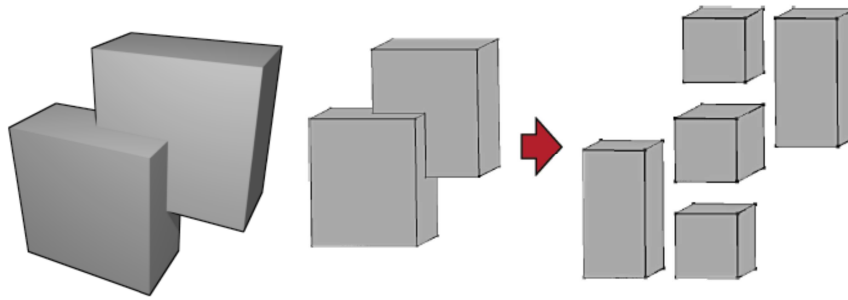


Figura 3.12 Objeto no convexo y su descomposición en objetos convexos. (Salisbury, Barbagli, & Conti, 2010)

Sin embargo, para figuras más complejas o irregulares, se utiliza la técnica de envolventes jerárquicos volumétricos BVH (Bounding Volume Hierarchies), cuyo principio fundamental consiste en delimitar la figura irregular dentro de figuras regulares conocidas y subdividir los espacios dentro de ésta para aproximar de forma más precisa su colisión (Figura 3.12). Las figuras regulares que principalmente se utilizan son esferas o paralelogramos y consiste en una ampliación de las técnicas mostradas anteriormente cuando se trató el caso de figuras formadas por mallas.



Figura 3.13 Técnica de colisiones mediante BVH (Salisbury, Barbagli, & Conti, 2010)

Ahora bien, para el caso de las aplicaciones que involucran hápticos, también es necesario el uso de algunas técnicas de detección de colisiones enfocadas principalmente a la detección continua, puesto que se trata de casos en los que puede existir interpenetración visual o los objetos se mueven demasiado rápido, lo cual puede producir inestabilidad. Estas técnicas pueden usarse tanto para mallas como para envolventes volumétricas. En ellas se considera la posición y orientación del avatar en intervalos discretos de tiempo y es necesario asumir que el movimiento arbitrario del objeto está sujeto a interpolación, continuidad y rigidez. Se pueden entonces definir ecuaciones que describan el movimiento entre dos posiciones para cuerpos rígidos, basándose en los ángulos de rotación.

3.3 Algoritmos de control

Como parte de los componentes de la arquitectura de aplicaciones que involucran hápticos, se incluye en la sección de HR lo relativo a algoritmos de control, considerando que cuando el usuario se encuentra interactuando con el dispositivo háptico en una aplicación, se forma un sistema de lazo cerrado entre el usuario, el dispositivo háptico y los algoritmos de HR. Tal como se observa en la Figura 3.14

No obstante que en este trabajo no se planea hacer aportaciones en el área de control, es necesaria su inclusión. En muchas ocasiones no es posible aplicar las fuerzas en el dispositivo háptico tal como se calculan, debido principalmente a las limitaciones intrínsecas del dispositivo al no ser ideal. Se pueden presentar casos en los que al enviar las fuerzas al dispositivo, alguno de los mecanismos de retroalimentación se sature al sobrepasar su capacidad, o bien, la inercia y fricción propias del dispositivo interfieran en la reacción que se pretende enviar.

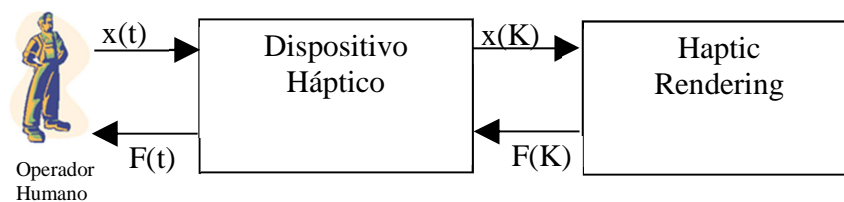


Figura 3.14 Lazo cerrado formado entre el usuario y los algoritmos de HR, $x(t)$ y $F(t)$ son continuos en el tiempo, mientras que $x(K)$ y $F(K)$ son posiciones y fuerzas discretas. (Salisbury et al., 2004)

Es importante recordar que tanto los sensores como los actuadores, son dispositivos discretos; mientras que el usuario envía la posición y debe percibir la retroalimentación de forma continua, por lo que debe establecerse la compensación necesaria para evitar problemas de estabilidad.

Se han hecho diferentes propuestas para solucionar este problema, como el caso de (Colgate & Brown, 1994) que para el problema de la pared virtual, muestran analíticamente la relación que existe entre el máximo esfuerzo que puede ser enviado, el nivel de amortiguamiento mecánico de un dispositivo, el nivel de amortiguamiento digital y la velocidad de respuesta del actuador del dispositivo. En dicha relación se demuestra que el dispositivo puede ser inestable para ciertas frecuencias de actualización generando

vibraciones indeseables, también muestran que la inclusión de amortiguamiento digital limita dicha inestabilidad.

A partir del trabajo de (Colgate & Brown, 1994), se proponen dos técnicas principales para limitar el comportamiento inestable de los dispositivos hápticos. La primera involucra el uso de un amortiguamiento virtual que limite el flujo de energía entre el ambiente virtual y el usuario, mediante el concepto de “acoplamiento virtual” (virtual coupling), consistente en la implementación de un sistema resorte-amortiguador, el cual limita la impedancia máxima que el dispositivo háptico pueda enviar, este método permite mejorar la estabilidad. Sin embargo, presenta problemas cuando se intenta enviar fuerzas de magnitudes grandes (Salisbury et al., 2004).

La segunda técnica consiste en aumentar la frecuencia de actualización de la retroalimentación háptica a partir de acelerar el procesamiento de los algoritmos de HR, gráficas, dinámica del experimento y colisiones, ya sea a partir de dividir el procesamiento en hilos con diferentes prioridades, el uso de procesadores de mayor capacidad o la optimización de los diversos algoritmos de acuerdo al experimento que se trate (Basdogan & Srinivasan, 2002). La división en hilos que trabajen a diferentes prioridades ha sido la técnica mas utilizada en el caso de las aplicaciones médicas, puesto que los algoritmos necesarios involucran objetos deformables y no son fácilmente escalables.

Otro aspecto importante para la construcción de aplicaciones que involucren hápticos, es la integración de todos los elementos o componentes dentro de una arquitectura que facilite el desarrollo de las mismas. En la sección 3.7, se muestra una arquitectura utilizada para el desarrollo de aplicaciones.

3.4 Modelado virtual de piel

El principal problema de representar piel en los ambientes de simulación es que se trata de una superficie deformable. Existen dos técnicas principales para representarla: la primera de ellas es como un arreglo de masas, resortes y amortiguadores, también conocido como vértices dinámicos, la segunda es el tratamiento a través del Método de Elemento Finito.

3.4.1 Técnica masa-resorte-amortiguador

Esta técnica, tal como se describe en (Webster, Zimmerman, Mohler, Melkonian, & Haluck, 2001) consiste en la construcción de una serie de *partículas* con masa, conectados entre sí mediante una red de resortes y amortiguadores. Cada punto de masa, es conectado a cada uno de sus vecinos mediante estos resortes-amortiguadores libres de masa. Las fuerzas internas y externas actúan a través de los resortes. Cada resorte tiene una longitud mayor que cero. Su longitud original se calcula en el momento de la inicialización. La dinámica de las $M \times N$ masas son calculadas de la siguiente forma: se considera que cada masa se encuentra en el punto P en un tiempo t , esto es, $P_{i,j}(t)$, donde $i = 1 \dots M$ y $j = 1 \dots N$. La dinámica del sistema se rige a partir de la primera ley de Newton $F_{i,j} = ma_{i,j}$, donde m es la masa de cada punto $P_{i,j}$ y $a_{i,j}$ la aceleración causada por la fuerza $F_{i,j}$. Los puntos de masa de los extremos de la malla se encuentran anclados a fin de evitar comportamientos indeseables. (Figura 3.15)

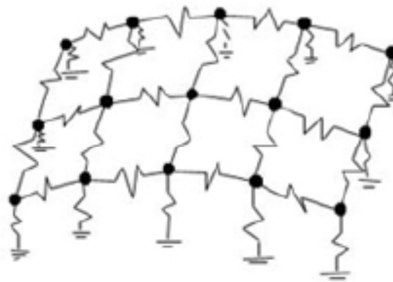


Figura 3.15 Malla de vértices dinámicos que se utiliza para representación de la piel.
(Webster et al., 2001)

Las fuerzas de contacto se calculan mediante un software de simulación y se generan los desplazamientos de tejido. Los cálculos de la fuerza de la resistencia del tejido se realizan de acuerdo a la profundidad de inserción de la aguja y el ángulo dependerá del ángulo de inserción de la misma. Este arreglo permite hasta 6 grados de libertad de movimiento con algunas restricciones. Sin embargo, para poder transmitirlos al usuario, es necesario el uso de un dispositivo con tales características.

En (Lian & Chen, 2006), se hace una extensión del método anterior, considerando a cada unión de la malla como una estructura cúbica (voxel) y se considera que cada una de ellas está sujeta a diversas deformaciones, tal como se aprecia en la Figura 3.16. En este caso, la tarea se centra en calcular la magnitud de la deformación de cada punto a partir del cálculo del módulo de Young.

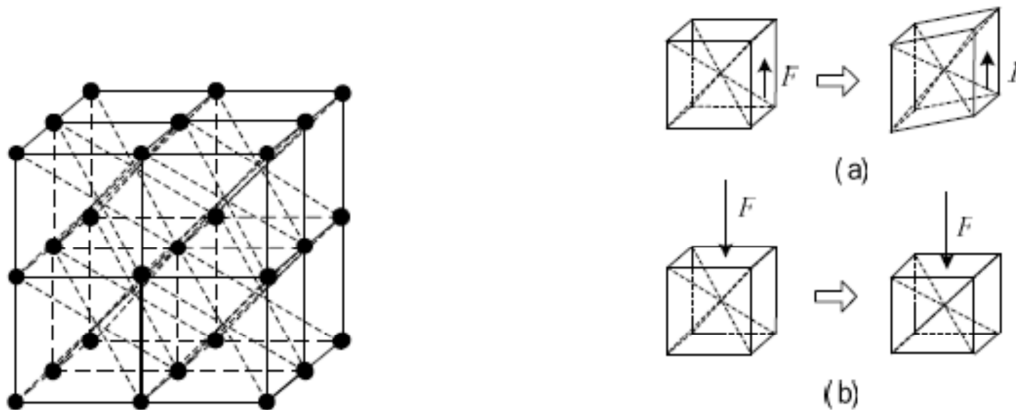


Figura 3.16 Estructura multicapas lattice (izquierda), deformaciones de un voxel (a) Fuerza aplicada en el extremo, (b) Fuerza normal aplicada al voxel (Lian & Chen, 2006).

De forma genérica, esta técnica, consiste de una serie de puntos de masa (nodos), conectados mediante enlaces elásticos, aproximando de esta forma la geometría del tejido, a través de una malla que define explícitamente la forma del objeto. De esta forma, se obtiene una discretización de las ecuaciones de movimiento del objeto. En cada nodo N , existe una ecuación que define la fuerza ejercida en N por los nodos conectados con él. Usualmente, se consideran fuerzas lineales y elásticas, pero también se pueden utilizar resortes no lineales. En cada resorte se encuentra asociado un amortiguador para ayudar a simular el comportamiento viscoso-elástico. La sumatoria de las fuerzas puede ser utilizada para resolver mediante métodos numéricos la ecuación dinámica de movimiento en cada nodo.

El problema principal que presenta esta técnica, dado que se trata de una aproximación, es que la malla que se crea está diseñada “a la medida” del problema que se trate, dificultando la posibilidad de modelar diversos tipos de tejido.

Para lograr una mejor aproximación, puede ser útil incrementar el número de masas y resortes que se emplean para la simulación, sin embargo, esto plantea mayor cantidad de ecuaciones y por consiguiente mayor tiempo de procesamiento, así como problemas de estabilidad.(Brown, 2004)

La parte favorable de la técnica es que es relativamente rápida y fácil de implementar y permite representar una gama muy amplia de objetos, incluyendo el tejido de la piel y órganos humanos.

3.4.2 Método de elemento finito

El modelo básico del Método de Elemento Finito (FEM, Finite Element Method), consiste en aproximar la solución del problema continuo de un sólido dividiéndolo en elementos discretos. Mediante esta técnica se intenta encontrar los puntos de desplazamiento que coloquen al objeto en equilibrio, a partir de sus condiciones iniciales, fuerzas externas y propiedades del material.

Cada elemento finito tiene un número de puntos nodo, y el desplazamiento de estos puntos representan las incógnitas del sistema. El desplazamiento de los puntos dentro de cada elemento se define mediante funciones de interpolación basadas en los desplazamientos nodales.

La tensión o esfuerzo dentro de cada elemento se calcula a partir de estos desplazamientos y a través de las propiedades del material, así como la deformación en cada elemento.

La presión en los bordes entre los elementos, junto con las fuerzas externas, conduce a una relación entre las fuerzas y los desplazamientos nodales, que dan las condiciones para el equilibrio. El nivel de aproximación para la configuración real de equilibrio depende del número y forma de los elementos y las funciones de interpolación. (Brown, 2004)

El método más común para encontrar el equilibrio consiste en minimizar la energía potencial, la cual puede ser descrita en términos de la energía de transformación y el trabajo externo hecho en el objeto. Para poder aplicar este método, es necesario que los elementos a considerar sufran deformaciones simples, a fin de obtener una matriz simple basada en constantes de deformación propias de los materiales de que se trate. Considerando las características de los elementos y las funciones de interpolación, la minimización se reduce a resolver el sistema lineal $\mathbf{KU} = \mathbf{F}$ donde \mathbf{K} es la matriz de esfuerzo, \mathbf{U} el desplazamiento nodal y \mathbf{F} la suma de fuerzas en cada nodo.

Si se conocen los parámetros de amortiguamiento y se colocan en la matriz \mathbf{C} y se calcula la matriz de masas \mathbf{M} , las ecuaciones de deformación están dadas por:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} = F$$

Este método es válido solamente para pequeñas deformaciones y desplazamientos cortos del objeto a partir de su posición original (Brown, 2004).

Dentro de los trabajos que utilizan este método, se puede destacar el de (Berkley, Turkiyyah, Berg, Ganter, & Weghorst, 2004), quienes desarrollan un método que aplica restricciones a los modelos elásticos lineales. Su metodología enfatiza el uso de modelos de alta resolución, múltiples puntos de contacto, preprocesamiento rápido y se adapta a los cambios dinámicos de las condiciones de contorno. Estos autores, consideran que no es necesario tomar en cuenta los efectos dinámicos para los procesos de sutura, y centran su trabajo en el análisis lineal en tres dimensiones.

(Berkley et al., 2004), generan su trabajo a partir de la ecuación lineal que despreja los efectos dinámicos, estos es:

$$Kd = f$$

Donde K es una matriz de esfuerzo de $n \times n$ y d y f son vectores que representan el desplazamiento nodal y la fuerza, respectivamente. En el caso de la piel y particularmente para el trabajo de sutura, consideran que los vectores d y f son conocidos después de que el usuario hace contacto con el modelo que representa la estructura del tejido. Para la solución de las matrices, emplean una matriz inversa de esfuerzo pre-calculada, en tiempo de ejecución y cuando se hace contacto con el objeto virtual, se genera el conjunto de matrices que deben ser resueltas para definir el comportamiento de cada elemento finito. Se plantean además ciertas restricciones para mejorar la percepción del usuario y la resolución del experimento.

Este tipo de técnica, permite generar representaciones más reales del comportamiento del tejido, pueden hacerse representaciones genéricas, no necesariamente a la medida. Sin embargo, su uso se ve restringido a la capacidad de cómputo con que se cuente, debido principalmente al tamaño de las matrices que se generan.

3.5 Modelado de hilo y aguja

Adicionalmente, el hilo y la aguja utilizados para las operaciones de sutura presentan características particulares que deben tomarse en cuenta para poder representarlos de forma

virtual. En el caso del hilo, generalmente se representa como un sistema de masa resorte de alta rigidez, (Lian & Chen, 2006) como se observa en la Figura 3.17, donde los nodos N_0 a N_{n-1} representan elementos de masa y las líneas entre cada par de esferas representan resortes que las interconectan. Inicialmente, el movimiento del hilo está restringido al movimiento de la aguja. Cuando se realiza la sutura, las restricciones cambian, mientras que un extremo se restringe al movimiento de la aguja, el extremo contrario está restringido por las propiedades del tejido en cuestión.

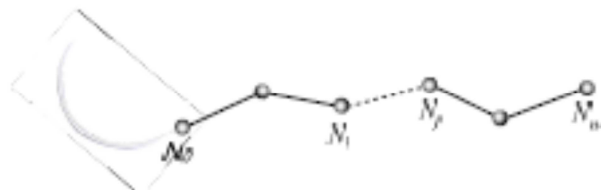


Figura 3.17 Modelo del hilo empleado para sutura (Lian & Chen, 2006)

Algunos autores, como el caso de (F. Shi & Payandeh, 2008), consideran que para simular de mejor forma las características mecánicas del hilo, tales como estiramiento, compresión, flexión y torsión, es necesario agregar al modelo las fuerzas derivadas de la fricción, así como considerar resortes y amortiguadores de torsión además de los lineales. El comportamiento se calcula aplicando el método tratado anteriormente de masa-resorte.

Ahora bien, es necesario efectuar una adecuada detección de colisiones para poder simular no solamente el comportamiento del hilo, sino también la posibilidad de hacer nudos con él. Sin embargo, con el método planteado anteriormente, los resortes que unen cada uno de los segmentos de las masas, no se consideran sólidos, por lo que cuando el hilo se interseca, es atravesado por sí mismo generando una situación falsa.

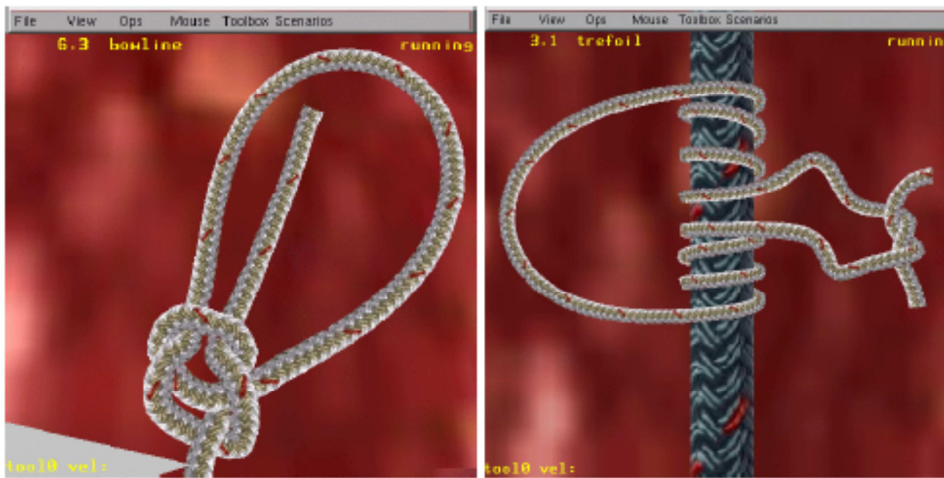


Figura 3.18 Nudos elaborados a partir del algoritmo FTL (Brown, Latombe, & Montgomery, 2004)

En (Brown et al., 2004), se muestra un algoritmo llamado “sigue al líder” (FTL), a través del cual se plantea la forma de generar una cuerda sin necesidad de utilizar resortes conectando a las masas entre sí, en cambio se definen pequeños segmentos conectados entre sí por articulaciones de dos grados de libertad. Mediante el algoritmo FTL, es posible crear una cuerda que mantiene su longitud prácticamente constante aun cuando se intente estirar al jalarla de ambos extremos, la Figura 3.18 muestra algunos resultados de este trabajo.

En el mismo trabajo (Brown et al., 2004), muestra un algoritmo de detección de colisiones basado en BVH que agrega algunos factores de restricción, para detectar y corregir las posibles colisiones que se generen entre los segmentos propios del hilo y/o algún objeto sólido externos al mismo. A partir de estos mecanismos, es posible la creación de nudos.

En el caso de la aguja, (F. Shi & Payandeh, 2008) plantean como innovación, la representación de un arco que es una forma cercana a la forma real de la aguja utilizada por los médicos para sutura, ya que anteriormente se representaba de forma recta. Esta aproximación se muestra en la Figura 3.19, en donde el punto O es en centro del arco, que marca el origen de las coordenadas relativas a dicho arco, los puntos T y E son las puntas inicial y final de la aguja respectivamente, r es el radio del arco TE. \hat{y} es el vector unitario tangente al arco TE en el punto T, de tal forma que si se conoce el ángulo α de la punta hacia p, se puede conocer la posición de cualquier punto P sobre la aguja.

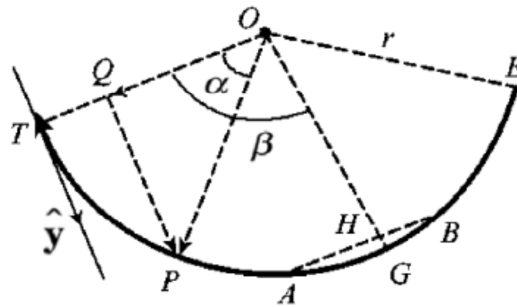


Figura 3.19 Modelo de la aguja, el Arco TE representa la aguja (F. Shi & Payandeh, 2008)

3.6 Simulación de sutura

En las secciones anteriores se han presentado diversos procedimientos que son útiles para el desarrollo de un simulador de sutura, a continuación, se describirán algunos procesos adicionales que deben ser considerados como caso de estudio en esta propuesta para representar el comportamiento de los dispositivos hápticos que se involucren en estas tareas.

En el trabajo de (Webster et al., 2001), se muestra un simulador de sutura, con una muy buena simulación de piel, sin embargo, no se muestra el proceso de sutura. Se retomará éste trabajo en la sección 4.3.










Ahora bien, en (Brown, 2004) aunque se muestra un proceso de sutura con elaboración de nudos y simulación de piel, queda como trabajo futuro el agregar la sensación háptica. Destacaremos ahora el trabajo de (Berkley, Turkiyyah, Berg, Ganter, & Weghorst, 2004), quienes plantean nueve pasos a seguir para la correcta sutura de una herida, los cuales pueden observarse en la Tabla 3.1, donde a es el punto de entrada, b es el punto de salida de la herida, c es el punto siguiente de salida de la herida y d es el punto de salida final. De acuerdo a estos pasos, (Berkley et al., 2004) plantean las características que deben cumplirse para conseguir una correcta simulación de sutura, que se detallan a continuación:

- **Deformación precisa y retroalimentación de fuerza:** Cada paso de la Tabla 3.1, provocará una deformación en la piel y una serie de fuerzas resultantes. Se requieren por lo tanto modelos de alta resolución para apreciar de manera correcta el comportamiento y la reacción de las diferentes fuerzas involucradas.

- **Contacto en cualquier superficie del modelo:** Esto es necesario porque una forma de medir el desempeño del estudiante es midiendo la distancia entre los puntos de sutura.
- **Límites y condiciones variables:** Las suturas pueden modelarse como resortes rígidos que solo soportan tensión. El modelado de estos resortes, puede hacerse mas eficiente para la computadora si se tratan como si fuesen fuerzas externas en lugar resortes modelados por medio de matrices.
- **Puntos de contacto múltiples:** Cuando se aplica una sutura, la aguja entra en un punto y sale en otro, esto provoca que deben definirse al menos dos puntos de desplazamiento en el modelo de inserción de la aguja. La operación de sutura involucra además dos herramientas, el porta aguja y una pinza que sujeta la piel. Esta segunda herramienta requiere al menos un punto de contacto adicional, provocando que existan al mismo tiempo al menos tres puntos de contacto.
- **Preprocesamiento rápido:** Debe utilizarse un preprocesamiento para poder manejar de manera eficiente el modelo de alta resolución que se utilice y pueda ser resuelto en tiempo real.

Dispositivos hápticos y su interacción con los ambientes virtuales

Tabla 3.1 Modelo de pasos a seguir para la aplicación de sutura en una herida o laceración existente
(Berkley, Turkiyyah, Berg, Ganter, & Weghorst, 2004)

<p>Paso 1:</p> 	<p>Si la fuerza normal aplicada a la superficie de la piel excede la máxima definida, la aguja estará en posibilidad de pasar a través de la superficie de la piel. La rotación de la aguja causará un punto de entrada y resbalará a lo largo su eje. El desplazamiento en el punto de entrada y la deformación del tejido serán determinados por el desplazamiento de la aguja.</p>
<p>Paso 2:</p> 	<p>Cuando la aguja sale por el lado de la herida, se crea un punto de salida. La rotación de la aguja provoca que esta se deslice a través del punto de salida a lo largo del eje de la aguja.</p>
<p>Paso 3:</p> 	<p>La aguja es soltada por el porta aguja y sujeta nuevamente desde la parte interna de la herida</p>
<p>Paso 4:</p> 	<p>La aguja es jalada completamente a través de la piel. La aguja cruzará completamente los puntos de entrada y salida, las deformaciones causadas tomaran sus lugares definitivos.</p>
<p>Paso 5:</p> 	<p>La aguja es empujada hacia adentro de la herida en el lado opuesto al que se inició, generando un nuevo punto de entrada, volviendo a crear un nuevo punto de desplazamiento</p>
<p>Paso 6:</p> 	<p>La aguja es empujada hacia la piel, Si la fuerza aplicada excede la especificada, la aguja perforará la piel y generará un punto de salida.</p>
<p>Paso 7:</p> 	<p>La aguja es soltada y sujeta nuevamente desde fuera de la superficie de la piel.</p>
<p>Paso 8:</p> 	<p>La aguja es jalada completamente a través de la piel, cruzando los puntos de entrada y salida, generando las deformaciones correspondientes.</p>
<p>Paso 9:</p> 	<p>Se hace un nudo y se jala la sutura, cerrando la herida.</p>

3.7 Arquitectura de los sistemas que involucran dispositivos hápticos

De acuerdo a Salisbury (Salisbury, Conti, & Barbagli, 2004), se pueden identificar diversos componentes en la arquitectura de los sistemas que involucran hápticos, la cual se muestra en la Figura 3.20.

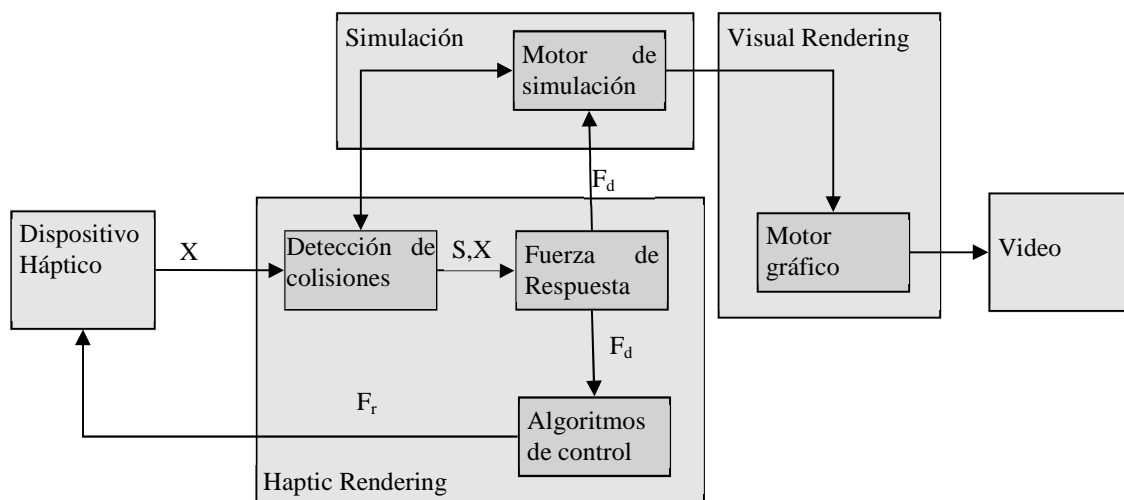


Figura 3.20 Arquitectura de una aplicación que involucra dispositivos hápticos, mostrando los tres bloques principales de haptic rendering (HR) (Salisbury et al., 2004)

De acuerdo a la Figura 3.20, la secuencia de eventos es la siguiente:

- Recuperación o lectura de la posición de la interfaz háptica a partir de sus sensores.
- Cálculo de la posición del avatar en el ambiente virtual a partir de la información de los sensores.
- Detección de colisiones por medio de los algoritmos especializados, los cuales emplean la información de las posiciones de los objetos y avatares para reportar las posibles colisiones y penetraciones.
- Cálculo de las fuerzas de interacción entre los objetos virtuales y avatares involucrados en cada una de las colisiones.
- Envío de la fuerza de respuesta hacia el háptico, resultado de aplicar los algoritmos de colisión y respuesta de fuerza.

En la Figura 3.20 además podemos observar los módulos correspondientes al motor de simulación y el motor gráfico. En el caso de la simulación, las aplicaciones deben contener

y cuidar el comportamiento físico de los objetos, a fin de que la respuesta gráfica y háptica correspondan de forma cercana a la realidad, para esto, se debe generar un “mundo virtual”, el cual contendrá a todos los objetos pertenecientes a la simulación, manteniendo la comunicación entre las instancias con el fin de mantener un comportamiento congruente. En esta sección, también se prepara y acondiciona la información para enviar la información correspondiente al motor gráfico, el cual será el responsable del control del dispositivo de video.

En el motor gráfico se plantea un reto importante, debido a que las imágenes de video se actualizan a una frecuencia de nominal de 30Hz. Por esta razón se han desarrollado trabajos que plantean la separación en computadoras diferentes de los componentes principales, es decir HR, Visual Rendering y Simulación, conectados a través de una red local (Antilla, 1998).

Para la parte gráfica, actualmente se hace uso de las características de los procesadores gráficos de video GPU, para reducir la carga de trabajo del procesador principal, al liberarlo del cálculo de vértices, superficies, líneas, rotaciones, iluminación y traslaciones. Inclusive, considerando que en ocasiones la simulación háptica requiere mayor cantidad de procesamiento que la parte gráfica, Shi (Shi H. F., 2008) envía al GPU parte del cálculo de simulación háptica, permitiendo que se completen correctamente las operaciones de simulación de objetos deformables.

Los métodos modernos de programación y el desarrollo actual de los procesadores, permiten que todos los componentes residan en un solo equipo y cada uno de los componentes utilice un hilo de ejecución diferente, a fin de no interferir con las diferentes frecuencias de actualización de los dispositivos hápticos y gráficos.

En resumen, se puede destacar que de acuerdo a diversos estudios realizados, la frecuencia con la que se deben repetir estas acciones con la finalidad de que las sensaciones táctiles sean percibidas de la mejor forma es del orden de 1 Khz., principalmente para la correcta percepción de texturas en superficies.

Se pueden utilizar frecuencias más altas, lo que dará como resultado sensaciones más nítidas, mientras que frecuencias menores pueden provocar problemas de percepción. Sin

embargo, es importante tener en cuenta que frecuencias de actualización altas, pueden implicar altos costos computacionales.

Para la sección de HR, se pueden identificar tres componentes principales que son:

Algoritmos de detección de colisiones: Los cuales detectan la interacción y colisión entre objetos y avatares en el ambiente virtual. Permiten obtener información acerca de dónde, y cuándo ocurren las colisiones y a través de ellos se obtienen diversas mediciones respecto a las mismas, tales como penetración ó áreas de contacto que se producen.

Algoritmos de respuesta de fuerza: Se encargan de calcular la respuesta de fuerza entre los objetos virtuales y los avatares cuando se produce una colisión, la fuerza aproximada debe ser lo más cercano posible a lo que ocurre en el mundo real. Estos algoritmos ejercen su acción sobre la posición de los avatares y los objetos virtuales, se encargan de enviar vectores de fuerza y torque que se aplican al dispositivo háptico.

Algoritmos de control: Se encargan de mejorar el control del dispositivo háptico procurando reducir el error entre las fuerzas ideales y las que realmente se aplican al dispositivo. Los parámetros de entrada de estos algoritmos son las fuerzas y torques deseados, a partir de los cuales, se calculan los vectores que se envían al dispositivo háptico.

En el capítulo siguiente, se mostrará el trabajo relacionado con esta investigación.

Capítulo 4.

Trabajo relacionado

4 Trabajo relacionado

A continuación, se presenta un resumen de diversos trabajos que utilizan dispositivos hápticos y ambientes virtuales, se muestran diversas aplicaciones de los dispositivos hápticos en el ámbito de la medicina, entrenamiento y uso profesional. Se describen tanto los desarrollos en hardware como en software, mostrando diversas soluciones, desde análisis matemáticos sencillos, hasta cuestiones de inferencia basados en modelos probabilísticos. En el aspecto del hardware se incluyen en este estudio dispositivos comerciales, dispositivos adaptados y diseños propios.

4.1 Hápticos en entrenamiento y aplicaciones médicas

En primer lugar se analizaron diversos trabajos relacionados con los hápticos utilizados en el entrenamiento de los estudiantes de medicina, tratando de incorporar diversas áreas, tales como laparoscopia, odontología, etc., los cuales se describen a continuación:

4.1.1 Dispositivos hápticos en capacitación

En (Basdogan et al., 2004) se habla de las bondades del uso de los dispositivos hápticos, así como de las características que se pueden adicionar a la capacitación. Se resalta la “grabación háptica” que permite a un instructor registrar mediante dispositivos hápticos y

Trabajo relacionado

el software adecuado, las sensaciones que un estudiante percibe durante una acción particular. Por ejemplo una intervención quirúrgica y puede mostrar al estudiante lo que debe esperar en el mundo real. Como se muestra en la Figura 4.1 en una aplicación para laparoscopia, se otorga un énfasis especial al sistema de entrenamiento que utiliza dos dispositivos hápticos Phantom; mientras que en el software, se destacan algunas funciones especiales como la detección de colisiones. De igual manera se incluye un modelo de objetos deformables que es utilizado para modelar órganos internos, y se utiliza el modelo de elemento finito para esta representación.

En este trabajo se enfatiza que con la tecnología y dispositivos comerciales actuales, no es posible simular de manera correcta los diversos procedimientos médicos, pero es posible modificarlos para ser utilizados en aplicaciones específicas. Se destaca que el uso de simuladores que involucren realidad virtual, resultan ser más efectivos que la práctica en pacientes.

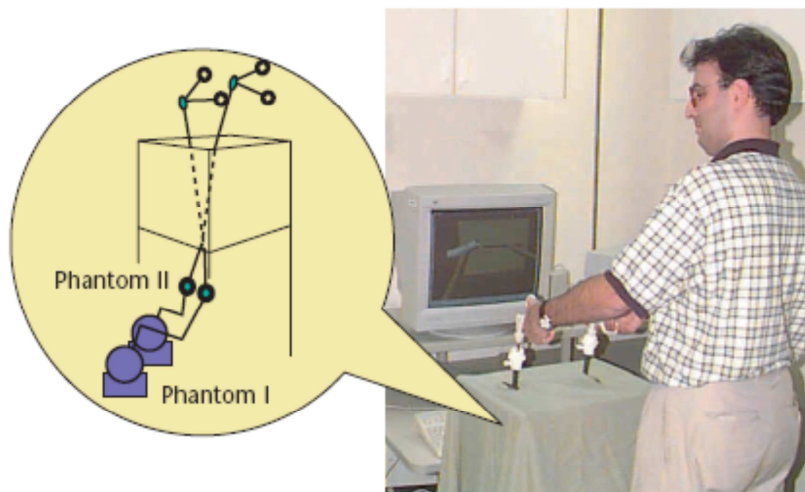


Figura 4.1 Sistema de entrenamiento laparoscópico (Basdogan et al., 2004)

En esta aplicación de (Basdogan et al., 2004), se demuestra la gran utilidad del uso de los dispositivos hápticos en el entrenamiento médico e introducen una nueva área de oportunidad en investigación a través de la “grabación háptica”, para permitir recrear diferentes situaciones que es difícil mostrar cuando se utilizan pacientes. En este trabajo, se muestra un caso en que la cirugía laparoscópica implica una alta complejidad en el hardware y software, ya que debe ser bastante precisa en la simulación de las diversas áreas

del cuerpo humano. Cabe mencionar que actualmente existen diversos dispositivos comerciales que abordan este tipo de cirugías (Kyoto Kagasu CO., 2009).

4.1.2 Simulador de trabajos dentales

Otra aplicación que plantea el desarrollo de un simulador para trabajos dentales, que involucra un dispositivo háptico es la desarrollada por (Thomas et al., 2001). En ésta se señalan las ventajas de uso de un simulador que le permite al instructor mostrar de manera más objetiva las condiciones que presentan las diversas manifestaciones de la caries.

La Figura 4.2 muestra el sistema que consta de una computadora, un monitor, un dispositivo de retroalimentación de la fuerza (háptico) y el software correspondiente. Los componentes están integrados a un modelo plástico que simula al paciente. El monitor despliega una sección de dos dientes. El dispositivo háptico consiste de un joystick con el dispositivo de retroalimentación (Immersion Corp. Impulse Engine 2000), el cual aporta una fuerza opositora cuando el cursor se mueve sobre la superficie de los dientes. Dicho dispositivo háptico, consta de dos grados de libertad.

El software consta de dos hilos de ejecución: uno de ellos se encarga de la detección de la intersección con el diente respectivo, la determinación de la región de contacto y la respuesta en fuerza que se le va a presentar al usuario; mientras que el otro hilo se encarga del trazado en pantalla y la ubicación del cursor. El software es capaz de mostrar diversas zonas de una pieza dental y enviar las retroalimentaciones necesarias al usuario.

Se evalúan tanto la percepción del usuario con respecto al software, así como la sensación enviada por el háptico. Dentro de los resultados, se señala la necesidad de aumentar los grados de libertad del dispositivo háptico, a fin de mejorar las sensaciones, tal como los solicitan los usuarios del sistema. Asimismo, se muestran diversas sugerencias que pueden apoyar a los futuros desarrolladores de sistemas apoyados en hápticos.

En este caso, la aplicación es dedicada exclusivamente a trabajos dentales y se indica que principalmente se trata de identificar las piezas que presenten algún tipo de caries. Las áreas de oportunidad son muy extensas, ya que existen múltiples acciones que pueden realizarse en el área dental. Por ejemplo, no solamente la percepción de algún tipo de caries, también puede se puede intentar enseñar alguna técnica empleada para eliminarlas

y/o curarlas, o bien, se puede entrenar la forma de colocar los diferentes tipos de prótesis. Inclusive, se indica que dentro de su trabajo futuro se debe atender la necesidad de mejorar las sensaciones hápticas y aumentar el grado de libertad de las mismas.

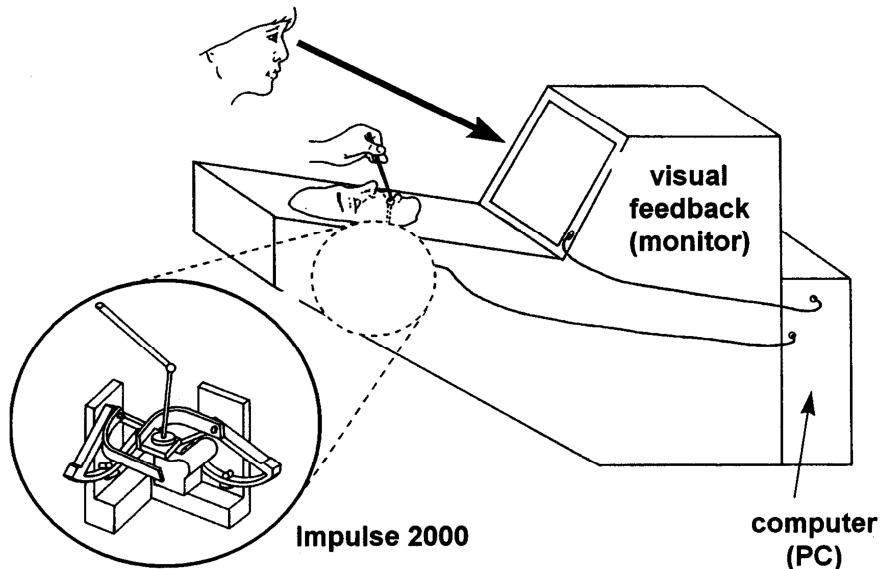


Figura 4.2 Iowa Dental Surgical Simulator, se muestra la integración del monitor, el dispositivo háptico y la simulación del paciente (Thomas et al., 2001)

En (Coles, Meglan, & John, 2011), se muestra un resumen de aplicaciones de dispositivos hápticos en diversas áreas de la medicina, en las cuales se utilizan varios dispositivos hápticos incluido el Novint Falcon de bajo costo. Así como dispositivos creados expresamente para aplicaciones particulares o bien elaborados a través de modificar los dispositivos existentes. Entre las áreas que se incluyen se encuentra la palpación, inserción de agujas, inserción de catéteres, sutura, laparoscopia, endoscopia, procedimientos endovasculares y artroscopia. Lo cual demuestra la versatilidad e importancia de incluir este tipo de dispositivos en la capacitación de los médicos.

4.1.3 Neurocirugía

Una aplicación de mayor complejidad se muestra en (Wang et al., 2007) en el que considera que al añadir dispositivos hápticos modernos, se aumenta la complejidad en el software que se utilice para trabajar con los mismos. Plantean el uso de hápticos para el desarrollo de un simulador de neurocirugía. Por esta razón, este trabajo requiere de un ambiente de simulación complejo, debido al reto que representa la presentación de órganos

deformables y tejidos blandos dentro de la realidad virtual. Se utiliza el método del elemento finito para estas simulaciones. Se plantean una serie de escenarios virtuales que muestran la punción, la toma (pellizcar) y el corte de superficies blandas como la piel o tejidos. De manera sobresaliente se plantea el problema que representa el corte de la piel, debido a que al tratarse de una superficie deformable, en el momento de realizar el corte, se convierte en dos superficies, que además están en contacto entre sí, tal como se ilustra en la Figura 4.3. Para el desarrollo de este trabajo los autores utilizaron un dispositivo háptico Phantom Omni, como el descrito en la sección 2.1.2.

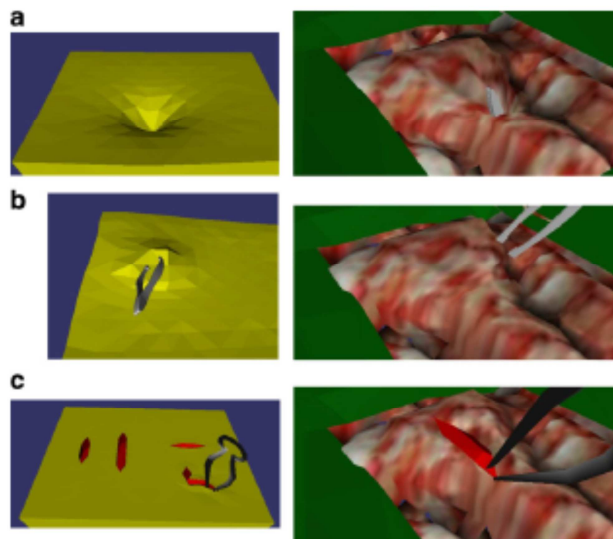


Figura 4.3 a) Punción, b)Toma y c)Corte (Wang et al., 2007)

Los principales problemas que se presentan debido a la técnica de modelado utilizada, son derivados de la gran cantidad de cálculos que se necesitan sobre todo para las operaciones de corte. Como se mencionó anteriormente, al hacer un corte se generan nuevas superficies, que a su vez forman nuevas estructuras dentro de la simulación de realidad virtual, haciendo que las operaciones matemáticas necesarias se multipliquen. Esto implica serios problemas, sobre todo si se desea trabajar en tiempo real. Las soluciones que proponen los autores de esta aplicación como trabajo futuro para resolver estos problemas pueden ser el uso de más de un dispositivo háptico, así como una reformulación de las ecuaciones utilizadas para el modelado y representación de las superficies virtuales y la solución de dichas ecuaciones por medio de cómputo paralelo.

4.2 Aplicación de dispositivos hápticos y el GPU

Ahora bien, dentro del ámbito de las aplicaciones médicas, pero ahora incorporando además el uso del GPU, podemos mencionar el trabajo de (Maciel, Halic, Lu, Nedel, & De, 2009) que se muestra en la Figura 4.4, se presenta un sistema simulador de cirugía que utiliza la biblioteca PhysX de NVIDIA, la cual permite la simulación virtual de objetos respetando las propiedades y leyes de la física.

En el citado trabajo, se realiza la simulación del proceso de cirugía laparoscópica de colocación de una banda gástrica, se emplean características propias de PhysX, que permiten la modelación de órganos tales como hígado, estómago, esófago y objetos rígidos como el instrumental médico necesario para dicha cirugía. El diseño del sistema está basado en un patrón MVC (Model View Controller), que permite aislar a cada elemento de la simulación para tener los tiempos adecuados a cada elemento, esto es, dispositivos hápticos, motor de simulación física y detección de colisiones, así como aislarlos del proceso de despliegue, que además utiliza estrategias de aceleración (Shaders).

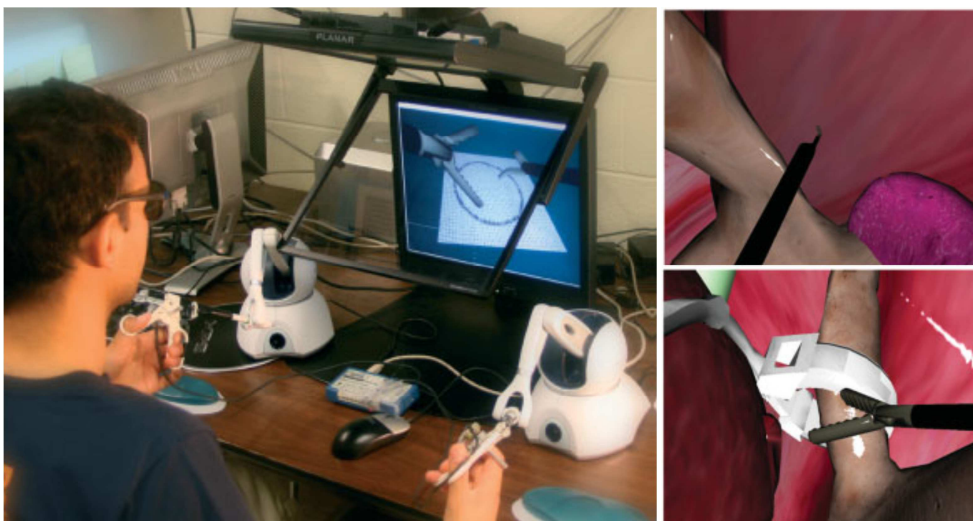


Figura 4.4 Vistas del simulador de cirugía que utiliza PhysX (Maciel, Halic, Lu, Nedel, & De, 2009)

La incorporación de este tipo de motores de física, permite a los diseñadores centrarse más en la generación de la respuesta háptica de los objetos y dejar a los motores de física el comportamiento general de la simulación. En el caso particular de PhysX, permite además que los objetos deformables y telas sean simulados en el GPU a través del uso de CUDA, liberando al programador de esta tarea.

4.3 Aplicaciones en sutura

Considerando que el foco de interés en este trabajo de investigación es sobre ambientes virtuales para el entrenamiento en tareas de sutura de heridas, se identificaron varios trabajos que plantean un sistema con un dispositivo virtual o físico que permita enseñar a los estudiantes de medicina la forma correcta de realizar suturas. El primer trabajo importante a citar es el de (Webster et al., 2001). En este trabajo, un porta-agujas es conectado al dispositivo háptico y su representación gráfica, así como la de la aguja, sutura y la piel virtual, se muestran y actualizan en tiempo real. El simulador incorpora varios elementos importantes, tales como el modelado en tiempo real de la piel deformable tejidos y material de sutura. Se realiza una grabación en tiempo real del estado de actividad durante los trabajos de la sutura. La Figura 4.5 muestra el ambiente de entrenamiento, donde pueden verse las partes principales y la respuesta que corresponde a las fuerzas de la deformación de la piel y las inherentes al hilo.

El software registra la posición y orientación del Phantom y todos los objetos gráficos en 3D (aguja, hilo de sutura, porta agujas), entonces las técnicas de sutura pueden ser reproducidos para mostrar al usuario qué hacer en las sesiones de entrenamiento.



Figura 4.5 Simulador de sutura (Webster et al., 2001)

En el mismo sentido, en (Marshall, Payandeh, & Dill, 2005), se muestra un prototipo de simulador de sutura, en el cual se muestra como realizar suturas en mallas deformables compuestas de triángulos, en este trabajo se propone la creación de un nodo adicional en el punto donde se inserta la aguja, también se muestra un método que permite la generación de respuesta háptica a partir de la forma como el hilo se alarga y se propone una técnica para la elaboración de nudos. Sin embargo, no se incluye el empleo de ambas manos para esta labor y está pensado para el trabajo en órganos internos del cuerpo. De acuerdo a las

Trabajo relacionado

opiniones de los médicos que han asesorado este trabajo, es indispensable el uso de ambas manos para la sutura, situación que nos permite resaltar uno de los aportes de este trabajo. Algunas figuras del trabajo de (Marshall et al., 2005) pueden observarse en la Figura 4.6.

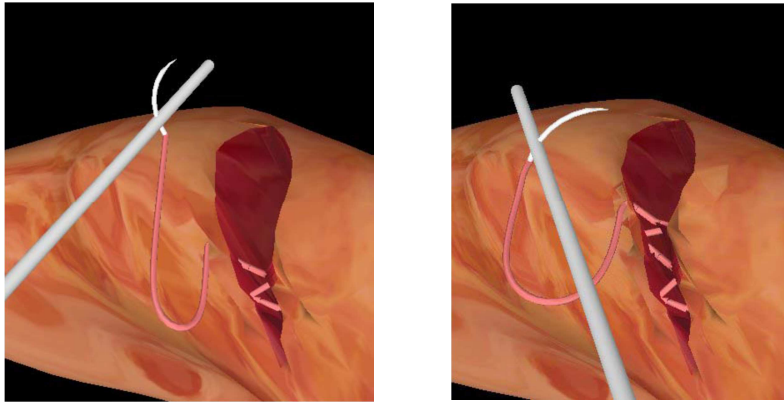


Figura 4.6 Imágenes de trabajo del simulador de sutura de (Marshall et al., 2005)

El trabajo de Miyazaki (Miyazaki et al., 2006), muestra el desarrollo de un simulador para sutura oculta o enterrada (buried suture), en el cual se empleó un dispositivo háptico, Phantom 1.5/6 DOF²⁶. El software utilizado fue Visual C++ con OpenGL²⁷ (Open Graphics Library), para el trazado 3D y Touch SDK (Sensable, 2012), para el control del háptico sobre Windows XP, la Figura 4.7, ilustra la apariencia del prototipo, incluyendo el dispositivo háptico.

Para el modelado de la piel, se simuló un tejido blando con un modelo de tres elementos, basado en el modelo Lattice²⁸, considerando un sistema masa, resorte, amortiguador.

En el modelado del hilo se considera un objeto flexible, ligero, delgado. Aproximado al comportamiento de un resorte continuo. Se define un modelo para cada una de las interacciones: Pinzas y tejido, hilo y tejido, aguja y tejido y tejido con tejido.

Se simulan los procesos de sutura interna (oculta) mediante el software, y se evalúa el efecto sobre la superficie de la piel, a partir de la precisión que tengan los puntos de la sutura.

²⁶ Op. Cit. <http://www.sensable.com/>

²⁷ <http://www.opengl.org>

²⁸ Modelo utilizado para el despliegue de gráficas en 3D (Hibbard, Dyer, & Paul, 1994)



Figura 4.7 Apariencia del simulador de sutura (Miyazaki et al., 2006)

Como trabajo futuro de esta aportación, se habla de que es necesario calibrar el comportamiento del háptico para que las sensaciones que produce sean congruentes con las reales. Así mismo, solo se utiliza una mano en el háptico y la otra en un teclado, sería deseable que ambas manos fueran utilizadas en el ambiente de simulación.

En este trabajo se utilizó el dispositivo háptico comercial Phantom Desktop y a partir de él se desarrolló la interfaz gráfica, que es el aporte fundamental del trabajo planteado. Se señala que el trabajo esencial está dedicado a la simulación de los diferentes componentes, tales como el hilo, la aguja y las diferentes texturas de piel. Los autores reconocen sus deficiencias para el uso del háptico e incluso plantean la necesidad de utilizar dos dispositivos similares en conjunto.

Ahora bien, en (Lian & Chen, 2006) se muestra otra propuesta de simulador de sutura, en este caso, la piel también se simula mediante un modelo masa-resorte-amortiguador, basado en voxels que permiten controlar la deformación de la piel. Para el modelo del hilo, se emplea un modelo similar al expuesto por (Brown et al., 2004), pero para reducir la complejidad de cálculo, se considera de alta rigidez y se restringe el movimiento a aguja en primera instancia y posteriormente a la piel con la que entra en contacto. La retroalimentación háptica se calcula mediante “penalti method”, en el caso del contacto entre hilo-piel y para el hilo, se basa principalmente en la tensión que alcanza el mismo al momento de estar sujeto a la piel. Para este simulador, las herramientas utilizadas fueron VC++, OPENGL para la parte gráfica y GHOST para haptic rendering, el dispositivo

háptico empleado fue el Phantom Desktop[®]. La Figura 4.8 muestra algunas imágenes de este simulador.

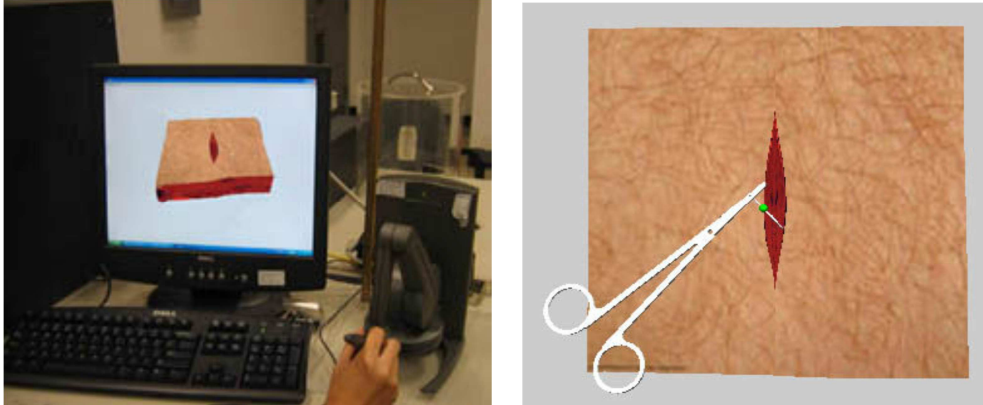


Figura 4.8 Modelo de sutura propuesto por (Lian & Chen, 2006)

En esta misma dirección podemos mencionar el trabajo de (Hans Fuhun Shi & Payandeh, 2009) en el cual se presenta un modelo de nudos y suturas basado en un ambiente de entrenamiento virtual (VTE). Se incluye una aproximación de una simulación en tiempo real de objetos lineales deformables (DLOs), con retroalimentación visual y de fuerza. Se hace énfasis especial en las propiedades mecánicas de un hilo real, tales como estiramiento, compresión, elasticidad y torsión y se muestra como es la propagación de fuerzas a lo largo de la sutura cuando el usuario lo jala con una o dos manos.

El usuario puede practicar las técnicas de sutura básica en dicho simulador, las heridas son modeladas con base en un sistema masa resorte. Se simulan también los instrumentos involucrados en el proceso, así como las colisiones entre los tejidos blandos y la aguja. Como parte de este trabajo, que puede considerarse una aplicación novedosa es el uso de la unidad de procesamiento gráfico (GPU) para la realización de los cálculos de los objetos deformables.

Finalmente, en el trabajo de (Choi, Chan, & Pang, 2012) se elabora un simulador de sutura que emplea para el modelado virtual el motor de física PhysX de la empresa Nvidia, en el cual, la piel es simulada a partir de segmentos rígidos unidos mediante articulaciones propias del simulador que generan un sistema de masa-resorte-amortiguador, en esta aplicación el hilo se genera también dentro del mismo ambiente por medio de segmentos con forma de cápsulas conectadas entre sí por articulaciones esféricas que permiten

mantener unidos a los segmentos entre sí. La aguja es de forma recta simulada también mediante capsulas.

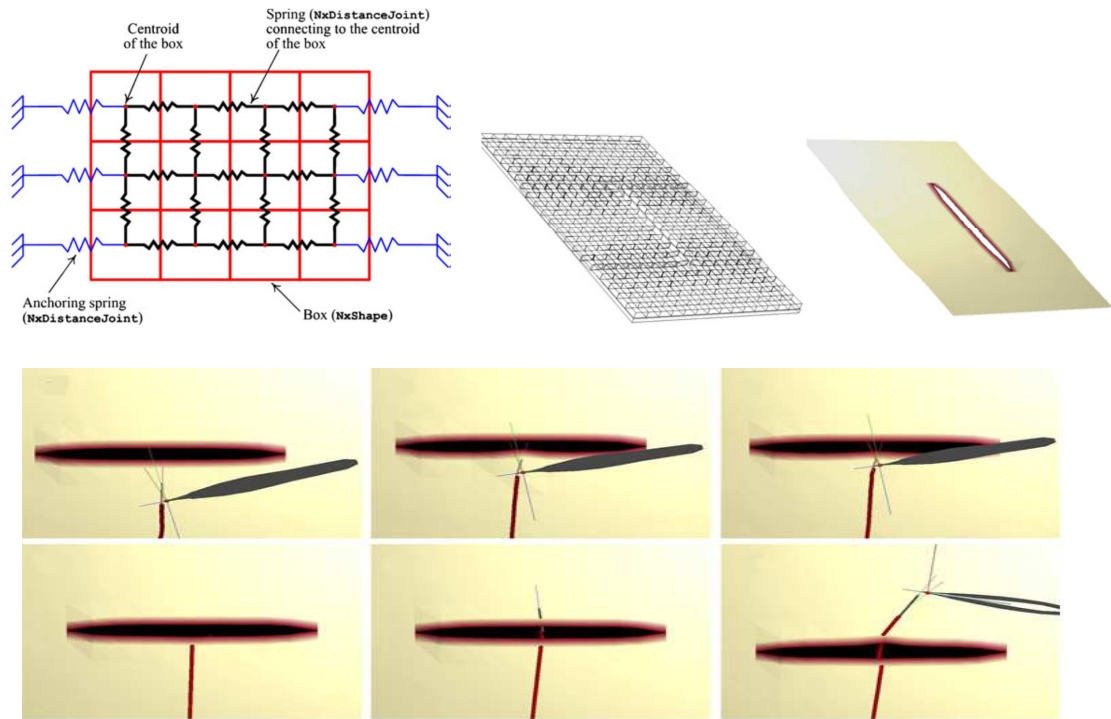


Figura 4.9 Malla empleada para representar piel y algunas imágenes del simulador de sutura de (Choi et al., 2012)

Para la interacción piel-hilo-aguja proponen su propio algoritmo que permite la sujeción de la aguja y el hilo en la piel conforme estos perforan y avanzan a lo largo de la misma. Algunos aspectos de este trabajo se muestran en la Figura 4.9. Los autores plantean que el hilo construido de esta forma es inestable cuando se somete a una tensión considerable y consiguen corregir parcialmente dicha inestabilidad. Sin embargo, consideran como necesario efectuar mayor cantidad de pruebas e inclusive hacerlas con profesionales del área de la salud. En la Tabla 4.1 se muestra un cuadro comparativo de los trabajos presentados anteriormente, para las áreas de sutura

En secciones posteriores retomarán algunos especializados en labores de sutura, como los casos de (Brown, 2004), que realiza una tesis específicamente de sutura o (H.F. Shi, 2008), quien elabora también un simulador que involucra técnicas de sutura de piel humana.

Trabajo relacionado

Tabla 4.1 Comparativo de los sistemas de capacitación y entrenamiento mostrados

Trabajo	(Webster et al., 2001)	(Marshall et al., 2005)	(Miyazaki et al., 2006)	(Lian & Chen, 2006)	(Hans Fuhan Shi & Payandeh, 2009)	(Choi et al., 2012)
Tipo de modelo de piel	Masa-resorte-amortiguador	Masa-resorte-amortiguador	Masa-resorte-amortiguador	Masa-resorte-amortiguador	Masa-resorte-amortiguador	Masa-resorte-amortiguador
Dispositivo háptico empleado	Phantom 1.5	Phantom 1.5	No definido	Phantom Desktop	Phantom Omni Phantom Desktop	Phantom Omni (2)
Empleo de ambas manos	No	No	No	No	Solo para anudar	Si
Tipo de simulación	Geométrica	Geométrica	Geométrica	Geométrica	Geométrica	Física
Uso de GPU	No	No	No	No	Si	A través de PhysX

4.3.1 Áreas de oportunidad en investigación para ambientes de capacitación y entrenamiento

Después de analizar el trabajo relacionado y de acuerdo al cuadro comparativo de la Tabla 4.1, pueden identificarse diversas áreas de oportunidad en las que se pueden desarrollar o complementar los trabajos existentes, las cuales se describen a continuación:

Puede observarse que solamente dos de los trabajos mostrados hacen uso de las capacidades de cómputo del GPU y uno de ellos lo utiliza a través de PhysX. Así mismo, en ninguno de los casos se muestra la posibilidad de utilizar diferentes tipos de hilo, aguja o piel.

En ninguno de los casos queda claro el proceso de integración o la metodología empleada para incorporar el dispositivo háptico en el sistema, ni se incluyen rutinas o mecanismos que permitan evaluar el trabajo o desempeño de los usuarios.

En algunos de los trabajos, se habla de retroalimentación háptica (haptic rendering), pero no se observan los detalles particulares de las técnicas empleadas.

Adicionalmente en el trabajo de (Webster et al., 2001) si bien presentan una muy buena simulación del proceso de sutura la tarea se lleva a cabo con una sola mano. De acuerdo a la opinión de los médicos que asesoran este trabajo, el procedimiento no es el adecuado, ya

que la sutura debe realizarse utilizando una pinza de disección al mismo tiempo que la porta aguja, es decir, se deben utilizar ambas manos.

En el trabajo de (Choi et al., 2012), se presenta una idea similar a la de esta investigación, sin embargo, es importante notar que las diferencias principales radican en el tipo de piel utilizada, el modelado del hilo, la forma de la aguja, el método de detección de colisiones entre la malla deformable y la aguja y la interacción aguja-piel-hilo.

En el siguiente capítulo, se mostrará la propuesta principal de este trabajo, un ambiente virtual de entrenamiento médico.

Capítulo 5.

**Propuesta: Ambiente virtual de
entrenamiento médico.**

5 Propuesta: Ambiente virtual de entrenamiento médico

Considerando la problemática planteada en la sección 1.3 y que como se mencionó anteriormente se ha demostrado que los ambientes virtuales de entrenamiento que incorporan dispositivos hápticos, representan una alternativa importante para la capacitación de futuros médicos. En este trabajo se propone el desarrollo de un ambiente virtual de entrenamiento médico que apoye en la adquisición de competencias para labores de sutura. El ambiente que se propone debe ser capaz de generar sensaciones parecidas a las producidas en una operación de sutura real.

Para integrar esta propuesta, fue necesario desarrollar los siguientes elementos:

- a) Método de cálculo de colisiones con objetos deformables (piel) y generación de fuerza de retroalimentación (haptic rendering).
- b) Modelado del hilo e interacción del mismo en el mundo virtual.
- c) Modelado del instrumental médico utilizado para sutura
- d) Integración de todos los componentes en un ambiente que mantenga de forma correcta las interacciones de la física clásica.

5.1 Arquitectura de la aplicación

Este trabajo se basa en la arquitectura propuesta por (Salisbury et al., 2004), tal como se describió en la sección 3.7 Figura 3.20. Sin embargo, de acuerdo a los componentes que se necesitan para un ambiente virtual de este tipo, se hizo una adaptación de dicha propuesta,

la cual se muestra en la Figura 5.1. A continuación se desglosa cada uno de los bloques que componen esta arquitectura:

Simulación.- Una característica importante de este ambiente es la forma en cómo se simula la piel, debido a que se comporta como una superficie flexible y elástica. Para el núcleo de la simulación donde se crea el mundo virtual que responde a las leyes de la física clásica, se utiliza PhysX[®] (NVidia, 2012) versión 2.84. Este motor de física, es capaz de simular comportamiento de una tela en el GPU y manejar de manera propia las colisiones entre los objetos. En esta aplicación la tela será configurada para asemejar las propiedades de la piel. Sin embargo, la piel simulada no envía información de las colisiones que existen entre objetos sólidos y deformables. Para solventar esta deficiencia y con la finalidad de generar de manera apropiada la respuesta háptica entre la piel (representada como una tela) y el cursor háptico, se utiliza la propuesta simplificada que se muestra en la sección 5.2.2.

Haptic Rendering (HR).- Para los fines de este trabajo, se desarrollaron los tres bloques de HR que se muestran en la Figura 5.1, la detección de colisiones y cálculo de respuesta de fuerza de respuesta entre la tela y el cursor háptico, se lleva a cabo mediante el método simplificado citado anteriormente. Mientras que la respuesta de fuerza entre objetos sólidos, se desarrolló de acuerdo a las técnicas clásicas (penalty method) mostradas en la sección 3.1.1. En la sección de acondicionamiento, se restringe la fuerza máxima y se insertan rutinas que permiten mejorar la percepción de los objetos en el ambiente de acuerdo al dispositivo háptico que se esté empleando.

Visual Rendering.- En este componente, es donde se llevan a cabo las operaciones necesarias para la presentación del mundo virtual creado en el dispositivo de video utilizando técnicas básicas de representación. En el caso de estudio de este trabajo se utiliza OpenGL y no se emplea aceleración por hardware.

5.2 Cálculo de colisiones y haptic rendering para objetos deformables.

Cuando se incorporan dispositivos hápticos en un ambiente virtual gráfico, es necesario enviar al dispositivo háptico una fuerza que permita al usuario percibir la sensación de estar interactuando con el ambiente. Un problema muy importante para esta tarea es determinar, calcular y generar la fuerza de retroalimentación que debe enviarse a un dispositivo háptico

a partir de calcular las colisiones de los diferentes objetos que intervienen en el ambiente. Estos cálculos se llevan a cabo considerando si los objetos son sólidos o deformables, en caso de que sean deformables, se deben tomar en cuenta sus propiedades elásticas para que la respuesta del dispositivo háptico sea consistente.

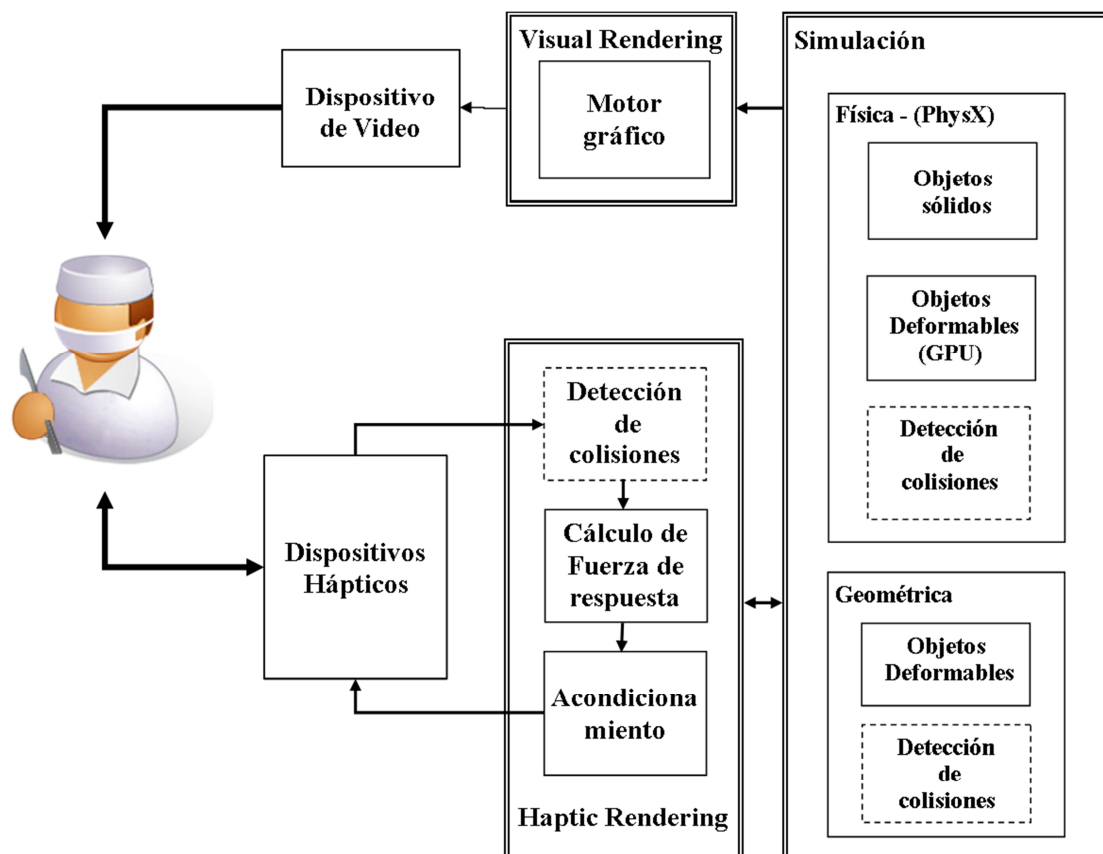


Figura 5.1 Arquitectura propuesta del ambiente virtual de entrenamiento médico

Este cálculo debe hacerse de forma rápida y precisa, considerando que la fuerza de retroalimentación que se envía al dispositivo debe actualizarlo a una frecuencia mínima de 1 KHz.

La gran cantidad de cálculos que es necesario hacer cuando se modela un objeto deformable por medio de la técnica de masa-resorte, puede solucionarse empleando la capacidad de procesamiento del GPU a fin de disminuir el tiempo de cálculo.

El reto implica además cuidar que la presentación gráfica del ambiente virtual se actualice con al menos 30 fps para brindar al usuario una calidad visual aceptable.

Se puede destacar que cada uno de los procesos mencionados anteriormente se ejecuta a una velocidad diferente. Sin embargo, deben ejecutarse en forma paralela, puesto que comparten y se envían información entre sí. Esto implica forzosamente el uso de procesos paralelos, tal como se observa en la Figura 5.2. En la cual se han colocado los procesos en diferentes hilos de ejecución, agrupando en el mismo hilo los procesos que pueden ejecutarse aproximadamente a la misma velocidad.

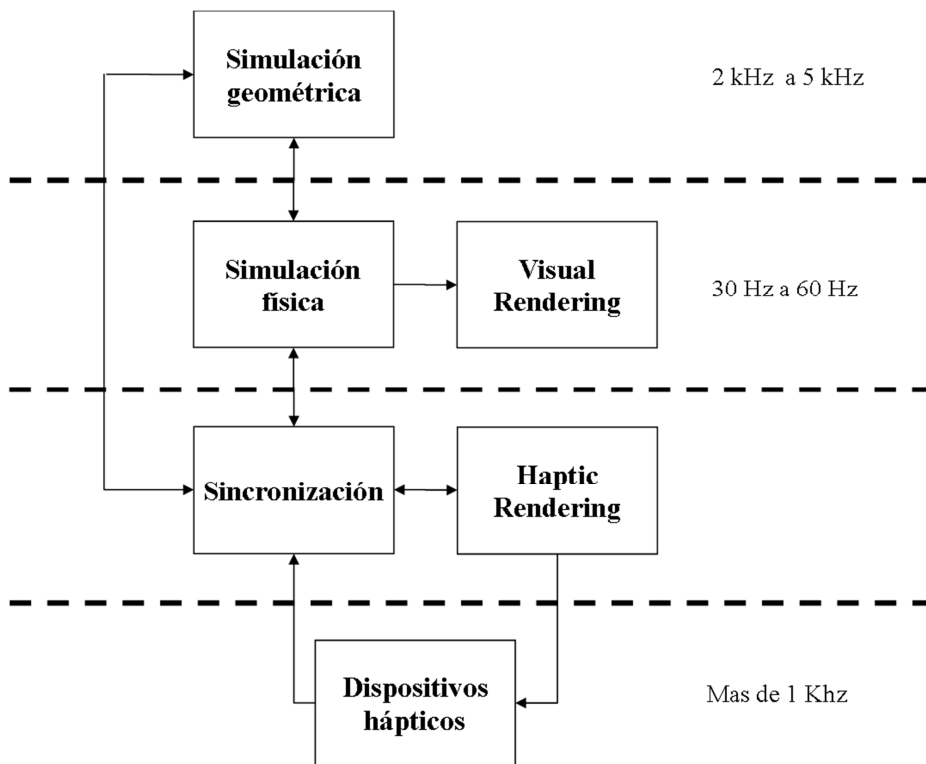


Figura 5.2 Distribución y sincronización de procesos

La forma actual como se genera haptic rendering, implica el desarrollo completo de los bloques, incluido el modelado matemático y la programación de la aplicación, generando prácticamente un modelado a la medida. De acuerdo a (Basdogan & Srinivasan, 2002) y como se mostró en la sección 3.1.3 los métodos principales para generar haptic rendering en objetos deformables son basados en geometría y basados en física, considerando el avance en la capacidad de cómputo. En este trabajo se utiliza un método basado en la física de los objetos deformables.

5.2.1 Fundamentación física del ambiente

A continuación se describe el método general para obtener la fuerza que se envía al dispositivo háptico cuando su avatar choca contra una tela delgada que se emplea como representación de la piel. La tela puede considerarse como un arreglo plano de partículas conectadas entre sí por masas y resortes. (Webster et al., 2001), tal como se muestra en la Figura 5.3

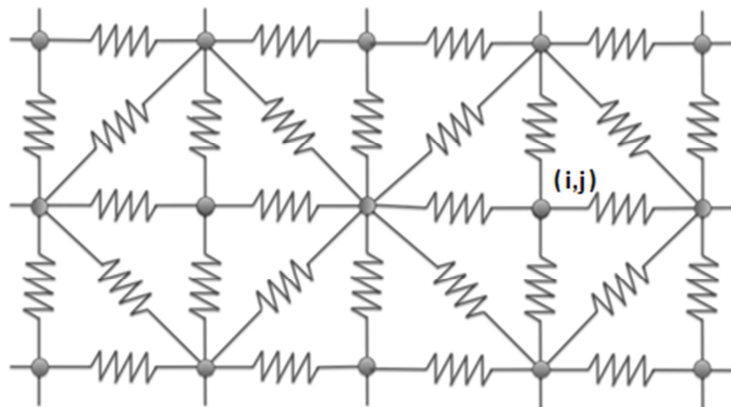


Figura 5.3 Arreglo bidimensional de partículas que forman la tela que representa la piel

Se asume que la fuerza de interacción entre cada par de partículas sigue la ley de Hooke más un término de amortiguamiento, la fuerza en la partícula i que se produce por la partícula j se puede escribir como:

$$\vec{F}_{ij} = -k |\Delta x_{ij}| \hat{r}_{ij} - b \vec{v}_{ij}$$

Donde $|\Delta x_{ij}|$ es la elongación a partir de la posición de equilibrio del resorte existente entre las partículas i y j , \hat{r}_{ij} es el vector unitario de las partículas i,j , \vec{v}_{ij} es la velocidad de la partícula i respecto a la partícula j , k es la constante de fuerza del resorte que existe entre las partículas i,j y b es la constante de amortiguamiento. Cuando la esfera que representa al dispositivo háptico en el mundo virtual choca contra la tela, las partículas que se encuentran en el área de contacto, son desplazadas en diferentes direcciones y magnitudes, jalando a las partículas vecinas del arreglo.

La fuerza resultante en la región de la tela que está en contacto con el dispositivo háptico, será la suma vectorial de: i) Todas la fuerzas de las partículas que interactúan en la región

de contacto debidas a las partículas vecinas, ii) El peso de las partículas en contacto y iii) la fuerza que aplica el dispositivo háptico en la región de contacto. Esto es:

$$\vec{F}_{en\ la\ tela} = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^n \vec{F}_{ij} \right) + \sum_{i=1}^N \vec{W}_i + \vec{F}_{haptico\ en\ la\ tela} = \left(\sum_{i=1}^N m_i \right) \vec{a}_{CM}$$

Donde:

$\sum_{j=1}^n \vec{F}_{ij}$ Representa la fuerza sobre la partícula i producida por todas las (n) partículas vecinas que ejercen alguna fuerza sobre la misma.

Entonces, $\sum_{i=1}^N (\sum_{j=1}^n \vec{F}_{ij})$ es la fuerza resultante de todas las N partículas de la región de contacto debida a sus partículas vecinas correspondientes.

Los términos $\sum_{i=1}^N \vec{W}_i$ y $\sum_{i=1}^N m_i$ representas los pesos y masas resultantes respectivamente, de todas las partículas de la tela en contacto con la esfera háptica.

Finalmente, \vec{a}_{CM} la aceleración del centro de masa del segmento de tela en contacto con la esfera háptica.

Es importante notar que si la esfera háptica se desplaza con velocidad constante, entonces \vec{a}_{CM} es cero, en este caso, la fuerza de la esfera sobre la tela es:

$$\vec{F}_{en\ la\ tela} = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^n \vec{F}_{ij} \right) + \sum_{i=1}^N \vec{W}_i + \vec{F}_{haptico\ en\ la\ tela} = 0$$

Entonces, la fuerza que la tela ejerce sobre la esfera háptica se acuerdo a la tercera ley de Newton será:

$$\vec{F}_{tela\ sobre\ el\ háptico} = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^n \vec{F}_{ij} \right) + \sum_{i=1}^N \vec{W}_i$$

Esta última, es la fuerza que debe ser calculada y modelada para el sistema háptico de este trabajo, para poder realizar dicho cálculo, debe conocerse el número de partículas en contacto con la esfera (N) y el número de partículas vecinas (n) de cada uno de ellos.

Esta tarea puede resultar compleja, debido principalmente a que:

- i) Mover la esfera háptica con velocidad constante es difícil, sobre todo cuando se trabaja con un dispositivo háptico, puesto que cuando se deforma la tela, el dispositivo ejerce fuerza sobre el usuario.
- ii) Los coeficientes de amortiguamiento y de fuerza deben definirse para los diferentes tipos de interacción, puesto que es diferente interactuar en los extremos de la malla que en el centro de la misma.
- iii) Para cada partícula, el valor de n depende del número actual de vecinos de acuerdo a su ubicación en la tela, pueden ser 4 u 8 (Figura 5.3) y
- iv) El cálculo de la velocidad relativa en tiempo real de las partículas adyacentes dentro de la tela, en el mundo virtual no es sencillo, dado que se trata de un sistema dinámico y dicha velocidad disminuye conforme nos alejamos del punto de contacto.

5.2.2 Método simplificado

Para resolver el problema anterior en este trabajo se desarrolló un algoritmo basado en la adición de múltiples rayos que surgen del centro del avatar del háptico (representado como una esfera) hacia diferentes direcciones. A través de los rayos es posible calcular la distancia que existe entre el háptico y la tela.

Para reducir los tiempos de cálculo, se utilizará para el cálculo del haptic rendering un algoritmo basado en “penalty method”. Cuando la distancia entre la esfera y la tela es menor al radio de la esfera menos la mitad del espesor de la tela, se considera que existe contacto entre la tela y el dispositivo háptico.

Cuando este contacto se produce, se calculan cuántos rayos y cuáles son los puntos de contacto entre la tela y la esfera. Para cada rayo en contacto, se almacena el punto inicial de contacto. A partir de dicho punto y el punto actual de contacto se genera un vector de fuerza, se realiza la suma de los vectores y una ponderación de dicha suma y se envía la fuerza al dispositivo háptico. A continuación se describe el método completo.

Consideremos que se va a explorar una superficie elástica deformable, representada como una tela tal como se aprecia en la Figura 5.4

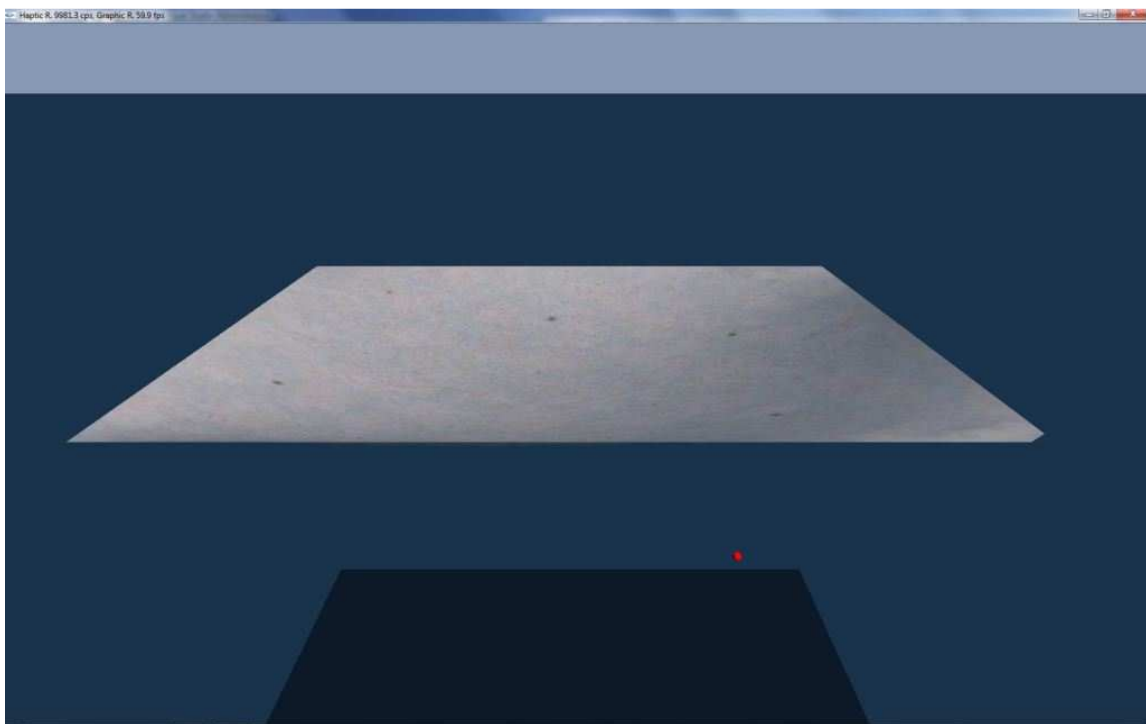


Figura 5.4 Superficie elástica deformable (tela)

La tela está hecha a partir de una red de partículas conectadas entre sí por medio de un arreglo resorte-amortiguador y debe poseer propiedades físicas de ancho, largo, grosor y densidad. Así como cualidades de estiramiento y capacidad de ruptura.

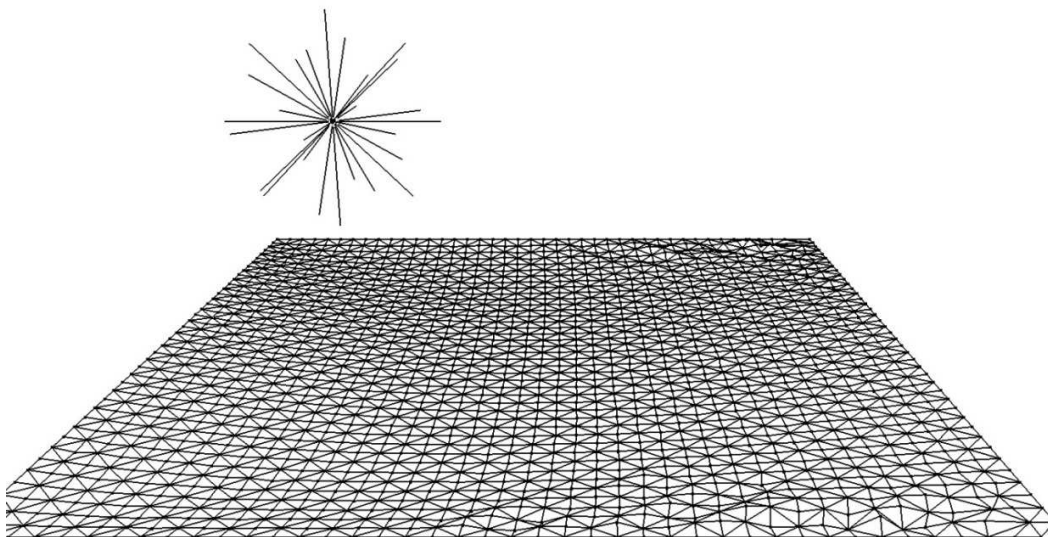


Figura 5.5 Malla deformable formada por partículas conectadas entre sí por resortes y amortiguadores.

La exploración se realizará con una esfera controlada mediante un dispositivo háptico (HIP). Dicha esfera cuenta con un radio determinado. Los rayos que permiten la medición de distancias para la detección de colisiones y cálculo de fuerzas, parten del centro de la esfera de exploración tal como se aprecia en la Figura 5.6

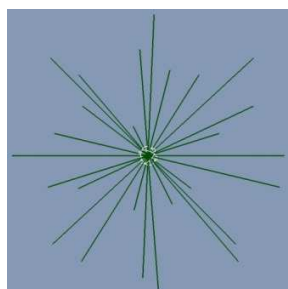


Figura 5.6 Avatar del háptico con rayos saliendo del centro.

Para cada uno de estos rayos se hace una estimación para determinar si existe contacto entre la esfera y la tela. Para esto, se calcula la distancia de la superficie de la esfera hacia la tela. Si la distancia es menor o igual a la mitad de la magnitud del grosor de la tela, entonces tenemos contacto y se considera ese punto como punto inicial de contacto (P_{i1}) Figura 5.7a

Cuando el rayo incide sobre la superficie deformable se calcula la distancia al punto más cercano, sin importar si el rayo incide sobre un vértice o no.

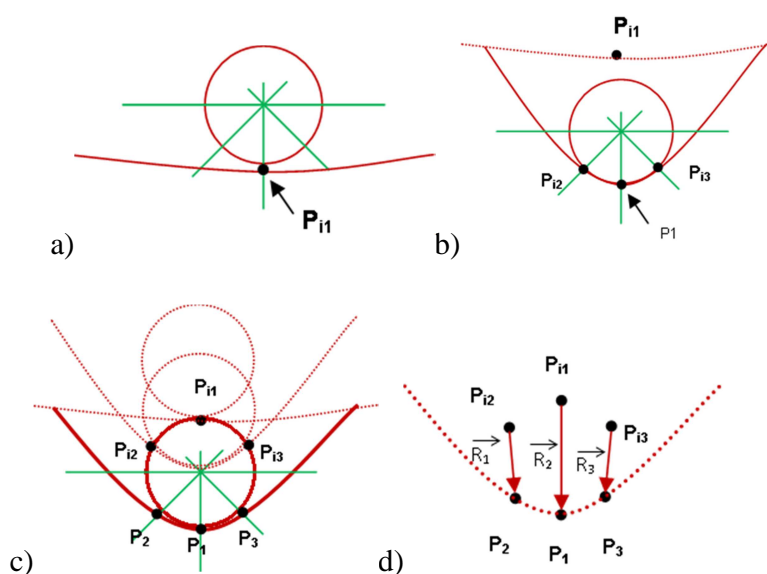


Figura 5.7 Construcción de los vectores a) Contacto inicial b) Contacto de los rayos siguientes c) Movimiento de los puntos iniciales de contacto d) formación de los vectores

La Figura 5.7b, muestra el desplazamiento de la esfera, la generación de nuevos puntos de contacto iniciales P_{i2} , P_{i3} . En la Figura 5.7c se muestran los puntos actuales de contacto P_1 , P_2 y P_3 . A partir de estos puntos se genera una serie de vectores considerando la distancia y la dirección entre los puntos de contacto inicial P_i y los puntos actuales de contacto P_n , como se muestra en la Figura 5.7d.

Dicha estimación de contacto se lleva a cabo para cada uno de los rayos y para cada uno de ellos se calcula un vector. La suma de todos los vectores de desplazamiento para los rayos que están en contacto con la tela, se calcula mediante:

$$\sum_{i=1}^N \vec{R} = \vec{R}_1 + \vec{R}_2 + \dots + \vec{R}_N$$

Entonces, el cálculo de la fuerza de retroalimentación háptica se hace a partir de

$$\vec{F}_{tela \text{ sobre el haptico}} = -\alpha \frac{\sum_{i=1}^N \vec{R}_N}{N}$$

Donde $\sum_{i=1}^N \vec{R}_N$ es la suma de los vectores que están en contacto con la tela, α es un factor que dependerá de la elasticidad de la tela y N es el número de vectores en contacto.

La dirección del vector resultante corresponderá al obtenido en la suma de los vectores calculados. Se utilizará la dirección contraria para enviar la fuerza de retroalimentación al dispositivo háptico.

Este método es válido solamente para la sección lineal de elasticidad de la tela.

Ahora bien, tal como está planteado y si el punto inicial de contacto permanece fijo, el punto actual de contacto generará la sensación de un resorte y el efecto no será el deseado. Para evitar esto, se implementa una modificación de dicho punto inicial de contacto para conseguir una fuerza constante en la dirección correcta a partir de reconsiderar su posición:

$$P_{i'} = P_{act} - (\vec{R}_N * r)$$

Donde:

$$P_{i'} = \text{Nuevo punto inicial de contacto}$$

P_{act} = Posición actual del háptico

\vec{R}_N = Vector de desplazamiento (calculado previamente con la estimación anterior)

r = Constante distancia máxima (limita la fuerza máxima)

El nuevo cálculo, es el que se muestra en la Figura 5.8, donde en primera instancia se muestra el contacto inicial a) y se marca el punto inicial de contacto P_{i1} , para posteriormente en la sección b), se muestra el punto de contacto siguiente y los puntos iniciales de contacto para dos de los rayos, ya en la sección c), se muestra la construcción del vector de fuerza. Igual que en el caso anterior, para cada uno de los rayos se construye el vector correspondiente y al efectuar la suma de todos ellos se obtiene la fuerza resultante, que será enviada al dispositivo háptico.

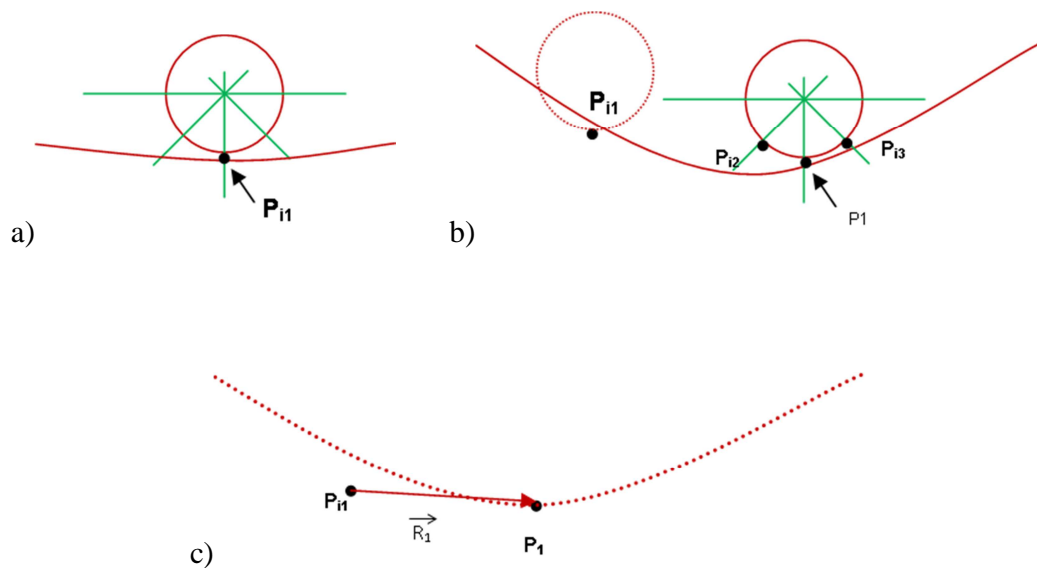


Figura 5.8 Vectores para fuerza de deslizamiento a) Contacto inicial b) Deslizamiento c) Formación de los vectores en el caso de deslizamiento

Esta técnica se puede utilizar cualquier ambiente que simule el comportamiento de una malla compuesta por partículas conectadas entre sí por resortes. Siempre y cuando, sea posible obtener:

- i) El punto de contacto de cada uno de los rayos que salen de la esfera háptica
- ii) Los vértices mas cercanos al punto de contacto
- iii) Las posiciones de cada uno de los puntos anteriores.

Mientras más rápido se calculen dichas posiciones, la respuesta háptica será mejor, puesto que no hay que olvidar que la frecuencia óptima de actualización de los dispositivos hápticos es $\geq 1\text{Khz}$. Por lo que es recomendable que dichos cálculos se realicen en el GPU.

Este método se implementó con éxito apoyado en el motor de Física PhysX de NVIDIA, que es el utilizado en este trabajo, cuyo análisis se hará en el siguiente capítulo.

5.3 Modelado del hilo

Debido a la complejidad del ambiente, fue necesario crear un modelo propio de hilo, el cual se basó en la técnica mostrada en (Lian & Chen, 2006), combinada con (Brown et al., 2004), creando un hilo modelado de forma geométrica. Para que este hilo pueda convivir de forma correcta con la piel, que está simulada a partir de características físicas por medio de PhysX y que emplea el GPU, es necesario agregar un mecanismo adicional para la detección de colisiones, el cual se describe más adelante.

El hilo está compuesto de la siguiente forma: una serie de esferas, con masa y volumen, las cuales se conectaran mediante cápsulas, que además sirven como auxiliares en la detección de colisiones, finalmente a dichas cápsulas se les agrega textura y esta es la imagen que se presenta al usuario. El efecto final es un “cilindro” deformable formado por segmentos cortos.

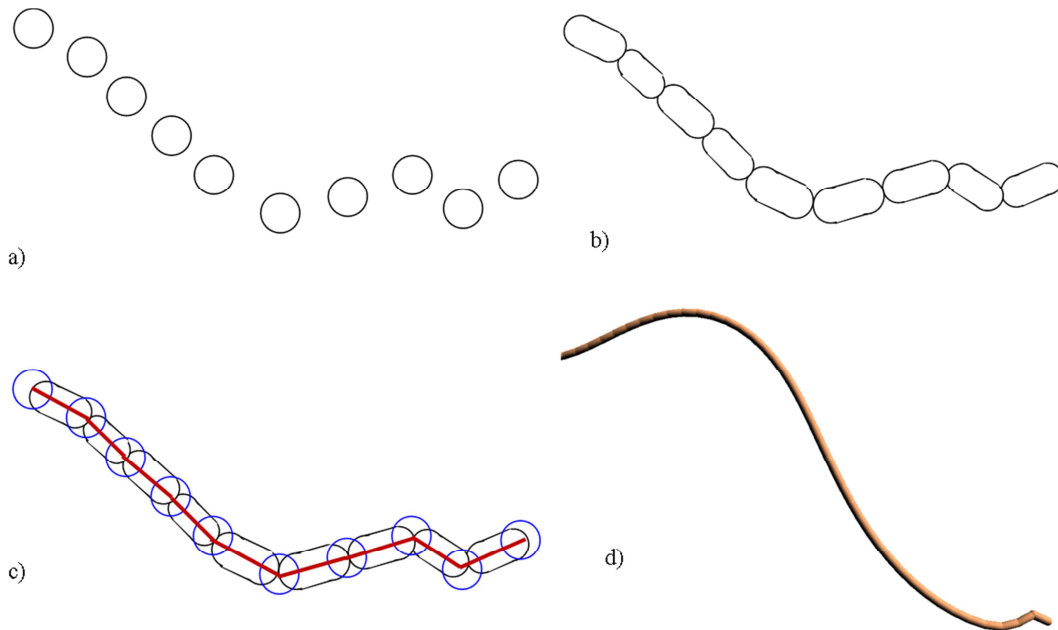


Figura 5.9 Proceso de modelado del hilo a) esferas guía b) Cápsulas auxiliares c) Modelo completo con líneas guía para colisiones d) gráfico con textura que se muestra al usuario.

El proceso descrito se muestra en la Figura 5.9, para generar el movimiento, se utilizará el algoritmo “follow the leader” (FTL), descrito por (Brown et al., 2004).

A diferencia del trabajo de Brown, en el cual para la detección de colisiones entre segmentos del hilo se emplea el método BVH citado en la sección 3.2.3, en este trabajo se propone un método basado en propiedades geométricas de los segmentos de recta que se forman al unir los centros de las esferas que se muestran en la Figura 5.10.

Se considera lo siguiente, de acuerdo a la Figura 5.10:

Sean p , p' , q y q' los centros de cuatro de las esferas que forman el hilo.

v y w los vectores formados a partir de los puntos p , p' , q y q' respectivamente.

A y B los puntos sobre las rectas $\overline{pp'}$ y $\overline{qq'}$ que se encuentran más cerca entre sí.

Para que esta condición se cumpla, es necesario que la recta que se forma entre A y B sea perpendicular a las rectas $\overline{pp'}$ y $\overline{qq'}$.

r el radio de cada cilindro que compone el hilo.

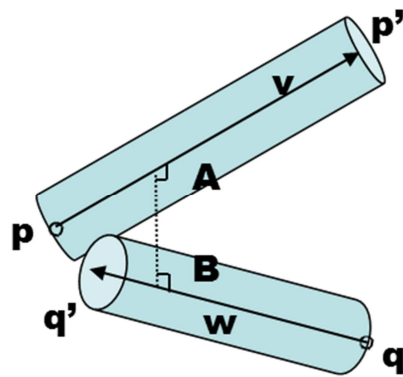


Figura 5.10 Colisión de un par de cilindros que componen el hilo

El cálculo de la posición de A y B se hace de la siguiente forma:

Los vectores v y w están definidos por:

$$v = p - p'$$

$$w = q - q'$$

Entonces:

$$A = p + tv$$

$$B = q + \lambda w$$

La condición de perpendicularidad está dada por:

$$v \cdot (B - A) = 0$$

$$w \cdot (B - A) = 0$$

Para considerar que existe colisión entre los segmentos, se debe considerar que:

$$\|\overrightarrow{AB}\| < 2r \text{ Cuando } 0 \leq t \leq 1 \text{ y } 0 \leq \lambda \leq 1$$

Desarrollando las ecuaciones anteriores y considerando la condición de perpendicularidad, se tiene:

$$v \cdot (q + \lambda w - p - tv) = 0$$

$$v \cdot q + \lambda v \cdot w - v \cdot p - tv \cdot v = 0$$

$$w \cdot (q + \lambda w - p - tv) = 0$$

$$w \cdot q + \lambda w \cdot w - w \cdot p - tv \cdot w = 0$$

Ordenando:

$$(v \cdot w)\lambda - (v \cdot v)t = v \cdot (p - q)$$

$$(w \cdot w)\lambda - (v \cdot w)t = w \cdot (p - q)$$

Solucionando para λ y t

$$\lambda = \frac{\begin{vmatrix} v \cdot (p - q) & -(v \cdot v) \\ w \cdot (p - q) & -(v \cdot w) \end{vmatrix}}{\Delta} \quad t = \frac{\begin{vmatrix} (v \cdot w) & v \cdot (p - q) \\ (w \cdot w) & w \cdot (p - q) \end{vmatrix}}{\Delta} \quad \Delta = \begin{vmatrix} (v \cdot w) & -(v \cdot v) \\ (w \cdot w) & -(v \cdot w) \end{vmatrix}$$

De acuerdo a las condiciones citadas anteriormente, los valores de λ y t deberán estar entre 0 y 1 para asegurar la colisión.

Ahora bien, una vez detectada la colisión entre segmentos, es necesario decidir la acción a tomar, se consideraron tres casos fundamentales:

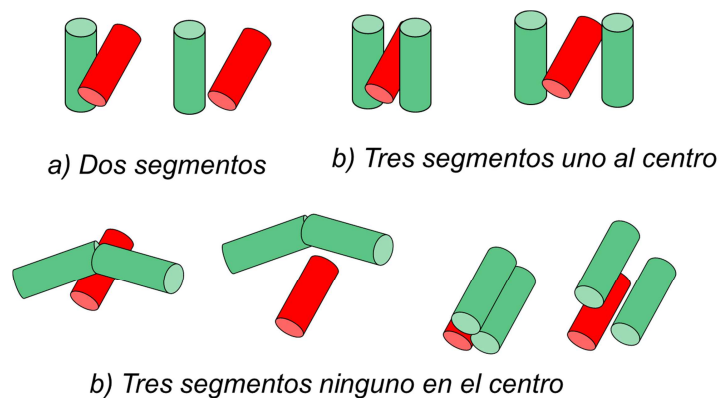


Figura 5.11 Colisiones entre segmentos

- a) Dos segmentos colisionan entre sí: dado que se conoce la distancia exacta que separa a los segmentos y la distancia de interpenetración, se procede a separar los

segmentos una distancia igual a la mitad de la distancia entre A y B, más un factor ϵ , que liberará la colisión.

- b) Tres segmentos colisionan entre sí, con uno de ellos en medio, en este caso, primero es necesario determinar que segmento está en medio y a partir de ahí, se separan los segmentos de los extremos una distancia similar al caso anterior, sin mover el segmento del centro.
- c) Tres segmentos colisionan sin que ninguno esté en el centro, en este caso se procede a mover a los tres segmentos una distancia similar al caso a.

En todos los casos, se calcula el vector de dirección en el que se moverán los segmentos a partir de los puntos A y B.

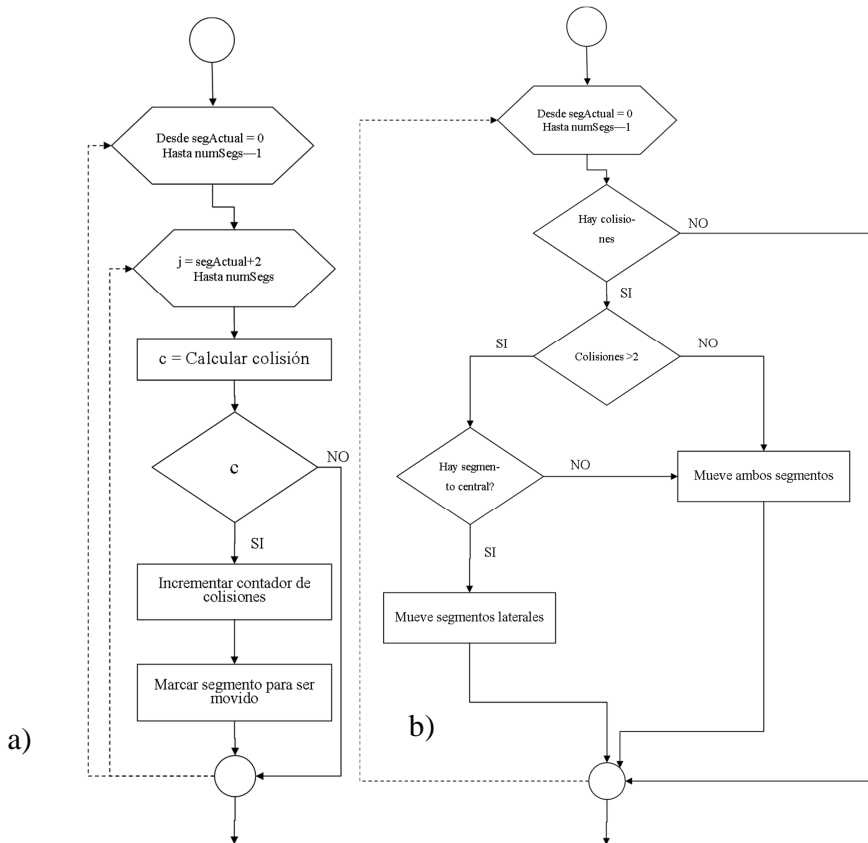


Figura 5.12 a) Diagrama de flujo para detección de colisiones entre segmentos del hilo, b) Diagrama de flujo para manejo de colisiones entre segmentos del hilo.

Para el caso de que un segmento colisione con más de dos, se procede a mover un par a la vez hasta que desaparece la colisión. El diagrama de flujo que define el comportamiento del hilo puede observarse en la Figura 5.12

Cuando los segmentos se encuentran demasiado cerca y no es posible moverlos para evitar la colisión, el algoritmo propuesto considerará que puede existir un nudo si y solo si se cumplen las siguientes condiciones:

- a) Que existan 10 o más cilindros colisionando
- b) Que los cilindros colisionando estén en al menos dos bloques y sean contiguos en cada bloque.
- c) Que cada bloque contenga al menos cuatro cilindros contiguos.

Las condiciones anteriores se muestran en la Figura 5.13, en donde se muestran dos segmentos del mismo hilo, uno en color verde y el otro en color rojo, en esta figura, existen once cilindros colisionando, los cilindros ABCDEF, son contiguos y pertenecen al segmento rojo, mientras que los cilindros abcde también contiguos, pertenecen al segmento verde.

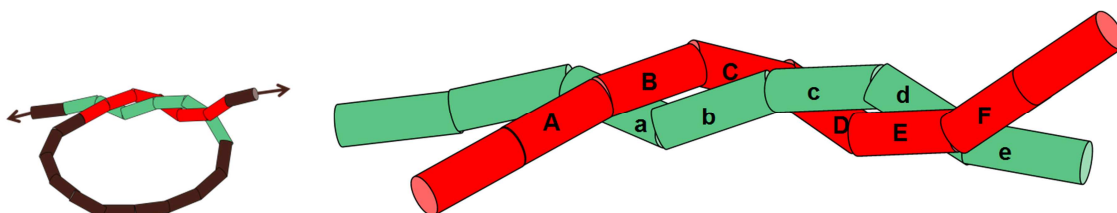


Figura 5.13 Detección de nudos

Es importante destacar que para que se considere que los segmentos colisionando pertenecen a bloques diferentes, debe existir un intervalo de al menos cinco cilindros de distancia entre los segmentos.

En el momento que se detecta la posible existencia de un nudo, se evalúa la distancia de estos segmentos con respecto a la piel, si el nudo se acerca hasta una distancia previamente determinada, se considera que el nudo se está cerrando y será fijado por el sistema a la piel inmovilizando en ese momento todos los segmentos que forman el nudo.

5.4 Modelado del instrumental quirúrgico

Para este proyecto, fue necesaria la elaboración de diversos modelos de instrumental médico quirúrgico, los cuales son: Pinza de disección estándar, Pinza de disección con dientes, Pinza porta aguja, tijeras de Metzenbaum rectas y tijeras de Metzenbaum curvas. Estos modelos se muestran en la Figura 5.14.

Dichos modelos fueron elaborados en AutoDesk Maya[®], por los estudiantes de animación digital Yamel García Zea Salas y Christian Juan Pascual García, bajo la supervisión del Dr. Moisés Alencastre Miranda y retocados por el Lic. en diseño gráfico Juan José Flores Ramírez. Los cuales se utilizan en las diversas etapas del simulador. En el caso de estudio desarrollado, se utilizan la pinza de disección, las pinzas porta-aguja y la tijera recta, quedando disponibles el resto de los modelos para aplicaciones futuras.

Para simular movimiento en SutureHap, cada uno de los modelos de pinza se han hecho separados por piezas, con el pivote en el lugar adecuado para el giro de cada pieza. En el ambiente, se hará el giro de cada pieza a voluntad del usuario, simulando el cierre o apertura de la pinza en cuestión.

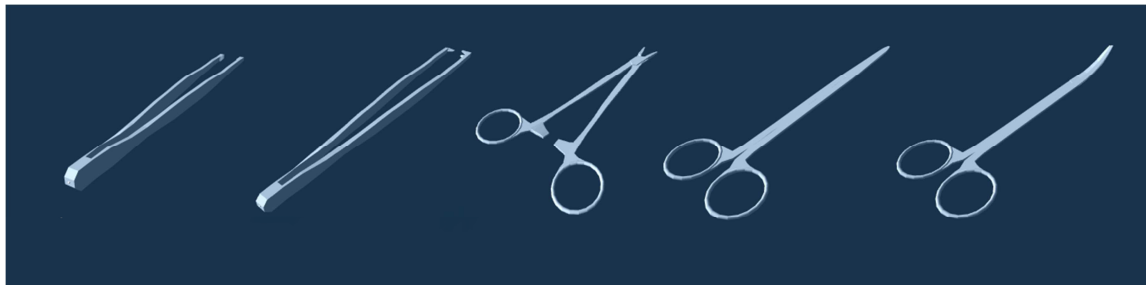


Figura 5.14 Diversos modelos de instrumental elaborados para uso en SutureHap, a) Pinza de disección estándar b) Pinza de disección con dientes c) Porta aguja d) Tijeras de Metzenbaum recta e) Tijera Metzenbaum curvaa

En el caso de la aguja, se desarrolló el modelo que se ilustra en la Figura 5.15. Dentro del ambiente del simulador se le agregaron una serie de esferas a intervalos regulares, las cuales se observan en el modelo de mallas. Estas esferas sirven para detectar la posición de la aguja en todo momento, principalmente cuando ésta se encuentra perforando la piel y también son la referencia para que la pinza porta aguja pueda sujetar a la aguja, la sujeción será exactamente en dichos puntos. En el extremo romo de la aguja estará sujeto el hilo, el

cual se crea en el momento de la ejecución, de acuerdo con lo descrito en la sección anterior.

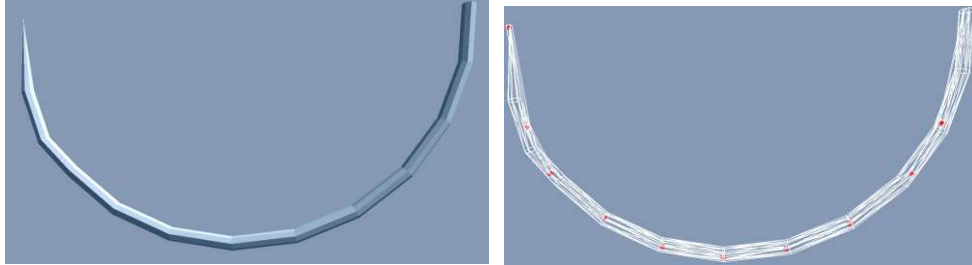


Figura 5.15 Modelo de la aguja para sutura sólido y en mallas.

5.5 Modelado de la piel

Para representar la piel, se utiliza una malla deformable basada en la representación de la tela como la mostrada anteriormente en el ambiente de PhysX, que será el centro de la piel. Esta malla se utiliza con cierto grosor o espesor, lo cual mejora las características de la piel. Para conseguir diferentes consistencias, se ajustaron los parámetros de elasticidad y amortiguamiento. Para mejorar la apariencia, se agregó una textura similar a la de la piel humana.

5.6 Integración del ambiente

Para la integración de los diferentes componentes que forman el ambiente, es necesario recordar que mientras la piel, pinzas y aguja se están representando con una simulación física, el hilo es una representación geométrica, esto implica el intercambio de información entre los puntos de colisión o sujeción entre hilo y piel.

5.6.1 Interacción hilo-piel

Para conseguir que el hilo se fije a la piel, se hace que el vértice más cercano al punto de colisión de la cola de la aguja se envía al hilo como punto de contacto (P_c), todos los puntos guía del hilo deberán pasar por ahí. Para esto, se agregó la rutina siguiente:

Si el nodo del hilo está a una distancia menor o igual a la longitud del cilindro definido anteriormente del punto P_c , entonces, el nodo es movido al punto de colisión. Es decir, al vértice más cercano al punto P_c . Lo anterior se hace dentro de la rutina de detección de colisiones y posterior a aplicar el algoritmo FTL. Al igual que en el caso de las colisiones esto ocasionará un ligero aumento en la longitud del hilo, que se corregirá en la siguiente

iteración del algoritmo FTL. En la Figura 5.16, se observa un elemento del hilo que es forzado a fijarse temporalmente a un vértice de la malla que representa la piel.

Sin embargo, esta última circunstancia se utiliza para generar la respuesta háptica del hilo. Al final de las rutinas de actualización del hilo, se calcula la longitud total del hilo a partir de la diferencia entre la longitud actual y la longitud ideal se calcula la magnitud de fuerza que debe enviarse al háptico. La dirección de la fuerza se calcula a partir de la suma de vectores de cada uno de los segmentos que forma el hilo.

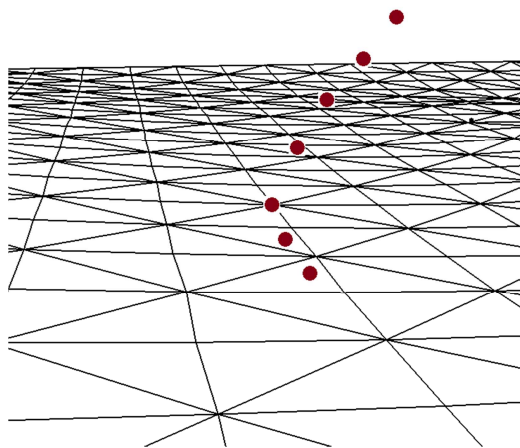


Figura 5.16 Elemento del hilo fijo a un vértice de la malla deformable que simula la piel

5.6.2 Incorporación de los dispositivos hápticos

Como se ha mencionado anteriormente, para la correcta realización de una sutura, es necesario el uso de dos dispositivos hápticos: el primero controla la pinza porta-aguja y por ende la aguja, mientras que el segundo controla una pinza de disección cuyo objetivo es sujetar la piel. En ambos dispositivos debe existir retroalimentación, para ambos se utilizó el método simplificado mostrado en la sección 5.2.2, considerando que el método contempla las acciones de deslizamiento y perforación.

Para la pinza de disección, la respuesta háptica se calcula a partir de que se realiza el primer contacto con un punto localizado en la punta de la pinza y sujeta la piel. La fuerza de retroalimentación háptica se calcula utilizando la distancia calculada desde el primer contacto hasta la posición actual, tal como se muestra en la Figura 5.17. En la cual podemos

observar a la pinza en el momento de hacer contacto con la piel y posteriormente cuando la pinza desplazó la piel una distancia d de la posición original.



Figura 5.17 Cálculo de retroalimentación para la pinza de disección. P_i punto de contacto inicial, P_1 punto de contacto actual, d distancia entre P_i y P_1 .

En el siguiente capítulo, se mostrará el desarrollo de SutureHap. Un simulador de sutura, como caso de estudio de esta investigación, el cual se desarrolló de acuerdo a las técnicas que se mostraron en esta sección. Sin embargo, es importante destacar que la arquitectura y el modelo se pueden emplear con éxito para construir cualquier ambiente de entrenamiento médico que utilice dispositivos hápticos, añadiendo algunos elementos específicos de la tarea a realizar.

Capítulo 6.

Caso de estudio: SutureHap ambiente virtual para suturas

6 Caso de estudio: SutureHap ambiente virtual para suturas.

Acorde a las necesidades de los primeros semestres de la carrera de medicina que se imparte en el ITESM, se eligió como caso de estudio de esta propuesta las operaciones de entrenamiento relativas a la sutura de la piel.

A partir de la información proporcionada por un asesor médico y para la correcta realización de las operaciones de sutura en la que se menciona que para este tipo de aplicaciones se emplean ambas manos, se estableció la necesidad de incluir dos dispositivos hápticos, con el fin de simular de la mejor manera posible las operaciones de sutura y evitar posibles errores en el aprendizaje de dichas técnicas. En la Figura 6.1, se muestra una sutura real en donde se observa que una mano sostiene la pinza de disección que sujeta la piel y la otra mano la pinza porta aguja que sujeta la aguja y el hilo. Como puede observarse, se utilizan ambas manos al mismo tiempo, de ahí la necesidad de utilizar dos dispositivos hápticos.

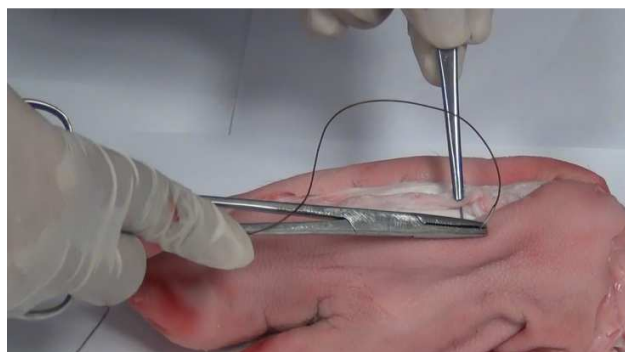


Figura 6.1 Proceso de sutura real en piel de cerdo

6.1 Elección del ambiente de trabajo

De acuerdo con lo planteado en el capítulo anterior, para la elaboración del ambiente virtual de aprendizaje del caso de estudio, es necesario crear un “mundo” que respete las leyes de la física tradicional, con el fin de proporcionar el realismo necesario. Se cuidó que este mundo virtual físico esté conectado correctamente con el ambiente gráfico. Fue necesario generar un puente que compense la diferencia de frecuencias de actualización que se deben considerar entre la parte de despliegue gráfico, que debe mantener frecuencias de actualización arriba de 30 Hz. y la parte háptica que debe actualizarse al menos a 1 kHz.

Para la realización de este trabajo y considerando las características citadas anteriormente, se analizaron diferentes opciones entre ellas OpenHaptics[®], la cual es una biblioteca de clases que el fabricante de los dispositivos Phantom incluye en la compra de su equipo. Esta biblioteca está escrita para ser usada en C++ e incluye una clase para el manejo de superficies deformables, pero no incluye soporte para el GPU. Por lo tanto, se consideró explorar alternativas adicionales que cuenten con dicho soporte para GPU.

De la misma forma, se analizó la biblioteca CHAI3D (Conti, Barbagli, Morris, & Sewell, 2005), la cual es una biblioteca muy completa que incluye objetos sólidos, un mundo con física y una serie de clases para manejo de objetos deformables. Sin embargo, los objetos deformables soportados no cuentan con las características que se necesitan para los requerimientos de este caso de estudio. No obstante, de esta biblioteca se emplean algunas clases que permiten convivir a varios dispositivos hápticos de diferentes marcas y modelos.

Finalmente, se decidió utilizar para la realización de este caso de estudio como base para el mundo virtual, a la biblioteca de clases PhysX v. 2.84, elaborado por la empresa NVIDIA. Las razones más importantes para esta decisión son las siguientes:

- a) La biblioteca permite la creación de ambientes virtuales que cumplen las leyes de la Física clásica.
- b) En los mundos o ambientes virtuales se pueden generar objetos sólidos fundamentales (esferas, cápsulas, paralelogramos, etc), compuestos (combinaciones de fundamentales) y generados a partir de mallas formadas por triángulos.

- c) Es posible incluir en el ambiente objetos deformables formados por tetraedros o bien objetos deformables planos (telas)
- d) Los objetos deformables poseen características que permiten cambiar sus propiedades físicas, tales como estiramiento, torsión, fricción de la superficie y en el caso de las telas espesor.
- e) El ambiente incluye la posibilidad de realizar uniones (joints) con diversos grados de libertad y con varias modalidades.
- f) El comportamiento de los objetos deformables pueden ser calculado en el GPU, liberando al procesador principal.
- g) Es posible detectar e interpretar las colisiones entre objetos sólidos.
- h) El ambiente puede interactuar de manera simple con OpenGL, lo que permite que la presentación gráfica se integre de forma rápida con el mundo virtual.

Una de las principales ventajas de utilizar esta biblioteca es el hecho de no tener que desarrollar rutinas especiales para el uso del GPU, puesto que PhysX lo utiliza cuando es necesario.

No obstante las ventajas señaladas anteriormente, una desventaja de PhysX es que no envía información cuando existen colisiones entre objetos sólidos y deformables. Por esta razón, fue necesario elaborar el algoritmo presentado en la sección 5.2,

6.2 Desarrollo del prototipo

De acuerdo a la arquitectura mostrada en la Figura 5.1, a continuación se dará un bosquejo general de la arquitectura e interacciones del sistema, para posteriormente mostrar una descripción de las técnicas utilizadas en cada uno de los módulos que componen a SutureHap.

La arquitectura propuesta marca tres bloques o componentes fundamentales: simulación, haptic Rendering y visual rendering, para el desarrollo del prototipo, fue necesario utilizar varios hilos de ejecución (threads) que permiten mantener a cada uno de los componentes ejecutándose a la velocidad adecuada y un hilo permite la sincronización entre ellos.

En la Figura 6.2 se muestran el diagrama de secuencias de SutureHap, en el hilo principal de ejecución se encuentran los procesos de visual rendering o gráficas y el proceso de

Caso de estudio: SutureHap ambiente virtual para suturas

simulación de PhysX, se encuentran juntos dado que la frecuencia de ejecución similar. De hecho, PhysX está diseñado para ejecutarse mientras la pantalla gráfica se está desplegando. Este hilo de ejecución inicia los hilos secundarios: Control de hápticos: en este hilo de ejecución se efectúa la comunicación con los dispositivos hápticos, tanto la lectura de las posiciones, como el envío de la fuerza de retroalimentación. El que sea un hilo de ejecución independiente, permite que los dispositivos hápticos mantengan una frecuencia de actualización arriba de 1Khz.

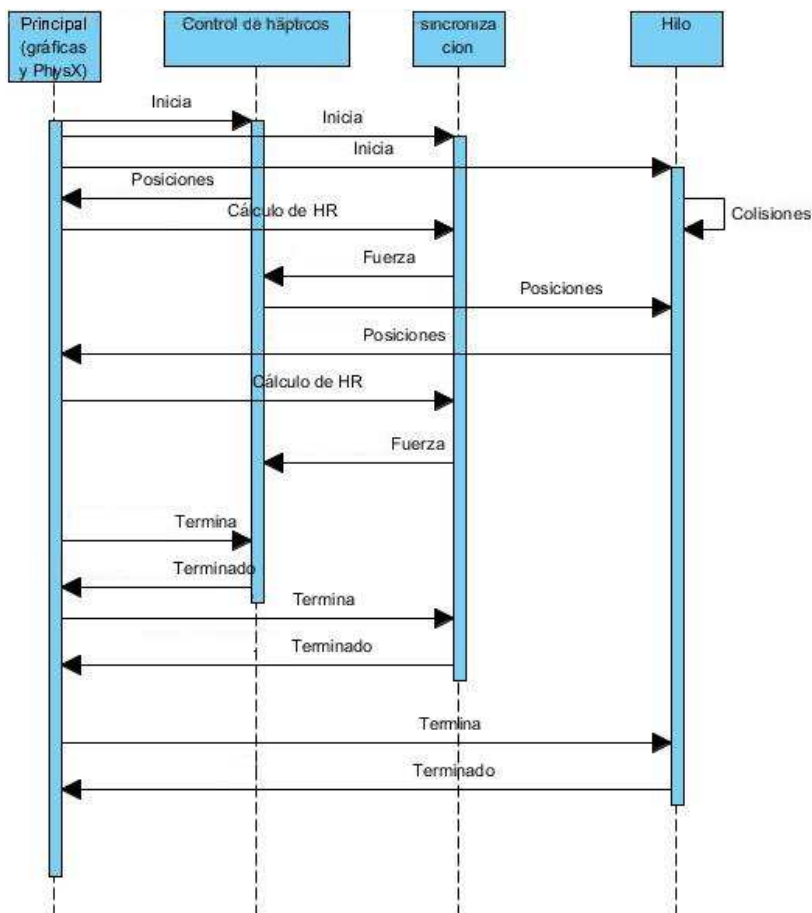


Figura 6.2 Diagrama de secuencias de SutureHap

Sincronización: tal como su nombre lo indica, este hilo permite la sincronización entre los diversos hilo y en él se generan las rutinas para compensar las diferencias de frecuencia de actualización entre el hilo principal que ejecuta aproximadamente a 30Hz., el hilo de control de hápticos cuya frecuencia de actualización es de mas de 1kHz. y el hilo de ejecución que controla todo el proceso de la sutura (hilo).

Hilo o sutura: fue necesario crear un hilo propio de ejecución para que en él se ejecutaran las rutinas correspondientes a la sutura o hilo, puesto que la rutina empleada para la detección de colisiones funciona con mayor precisión mientras más rápido se ejecuta.

Cada una de los hilos mostrados anteriormente, puede estar ejecutando una o más clases, las clases principales que utiliza SutureHap se muestran en la Figura 6.3.

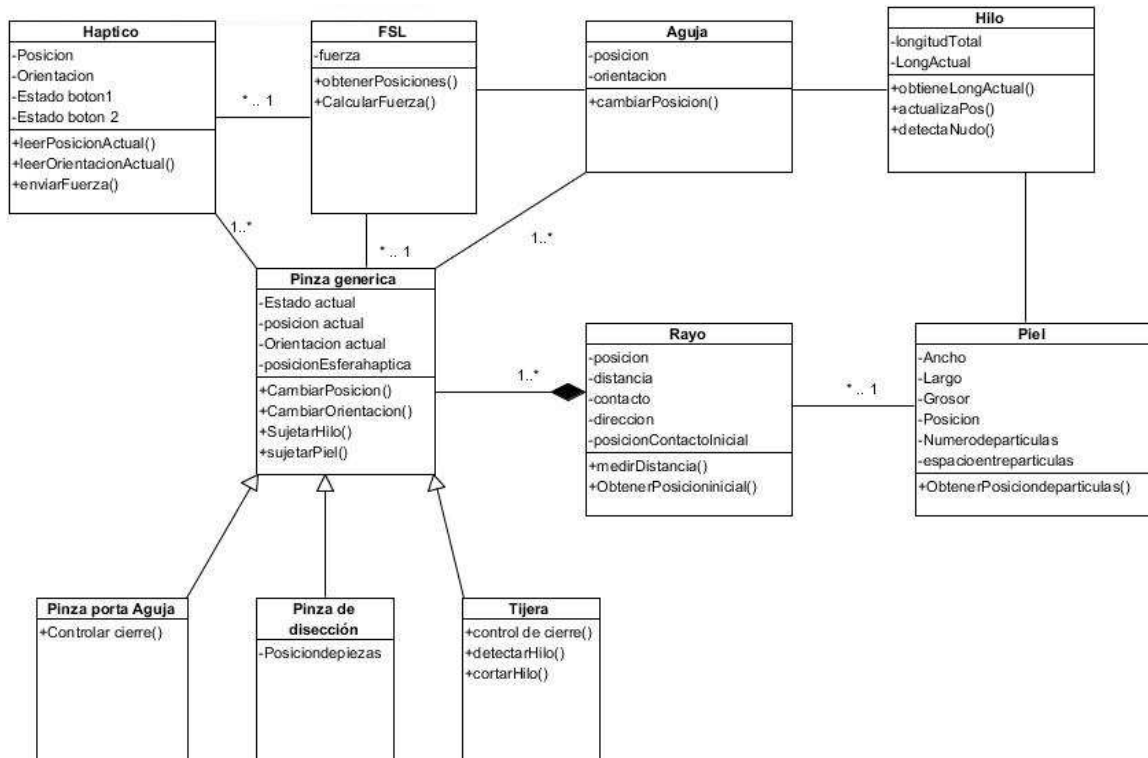


Figura 6.3 Diagrama de clases de SutureHap

Considerando los hilos descritos anteriormente y el diagrama de clases de la Figura 6.3, en el hilo principal ejecutan las clases háptico, pinzas, rayo y piel. Mientras que FSL es la clase que se encarga de la sincronización e Hilo es la clase que controla el hilo o sutura. La descripción mas detallada de las clases se encuentra en el anexo 11.3.

6.2.1 Simulación

Esta sección rige y genera el comportamiento que deben tener los diversos componentes que integran el simulador y que fueron descritos anteriormente. Como se muestra en la Figura 5.1, la simulación está compuesta de dos partes fundamentales, la simulación física y la simulación geométrica, las cuales serán descritas a continuación.

6.2.1.1 Simulación Física

En esta sección el comportamiento de los objetos es simulado al evaluar su interacción con el medio a través de sus propiedades físicas. El elemento que representa mejor esta categoría es la piel, la cual es generada mediante una tela que a su vez está formada por partículas conectadas entre sí por resortes y amortiguadores. Tal como se comentó en la sección 5.2.1, la simulación se realiza a partir de calcular el comportamiento de todas las partículas al interactuar entre sí y colisionar con el resto de objetos presentes en el ambiente.

Para esta sección se utilizó como núcleo central PhysX, a través del cual se creó el ambiente requerido y ahí se realizaron los cálculos necesarios que regulan el comportamiento de los diferentes objetos que intervienen en el sistema.

Para crear un ambiente virtual en PhysX, es necesario instanciar diversos objetos en él. En primer lugar, se requiere inicializar el ambiente de desarrollo, que contiene la escena y los diversos actores. Esto se logra a partir de utilizar `NxCreatePhysicsSDK`. Dicha función permite detectar si en el equipo están disponibles todos los componentes necesarios para crear el escenario virtual. Si existe algún problema, se reporta un error y no es posible crear el escenario virtual.

Una vez inicializado el ambiente, se requiere crear una “escena”, en la que están contenidos los diversos elementos del ambiente virtual. Dicha escena se crea al instanciar la clase `NxScene` dentro del ambiente creado previamente. En esta escena, es posible ya incluir los “Actores” y elementos que formaran SutureHap.

En PhysX, se denomina “Actor” a cada uno de los elementos que forman el ambiente virtual, tales como figuras geométricas fundamentales (esferas, cápsulas, paralelogramos), objetos compuestos por más de una figura u objetos complejos formados por mallas de triángulos. Los actores pueden ser estáticos, dinámicos y *cinemáticos*, los actores dinámicos, son aquellos que tienen movimiento dentro de la escena y que dicho movimiento responde a las leyes físicas aplicables, esto es, tendrán propiedades de inercia, velocidad, aceleración, etc. Los actores estáticos, son aquellos que van a permanecer fijos en todo momento en la escena, pero intervienen con esta propiedad física en el ambiente, es

decir, si un actor dinámico choca con ellos, el actor dinámico responderá al efecto producido por ese choque y se moverá en consecuencia. Los Actores *cinemáticos*, son aquellos que el usuario mueve a voluntad dentro del ambiente y PhysX no tiene control sobre ellos. Sin embargo, si un Actor cinemático choca con un dinámico, éste último reaccionará a consecuencia de dicha colisión. No existe ninguna interacción entre Actores cinemáticos o entre un actor cinemático y un estático.

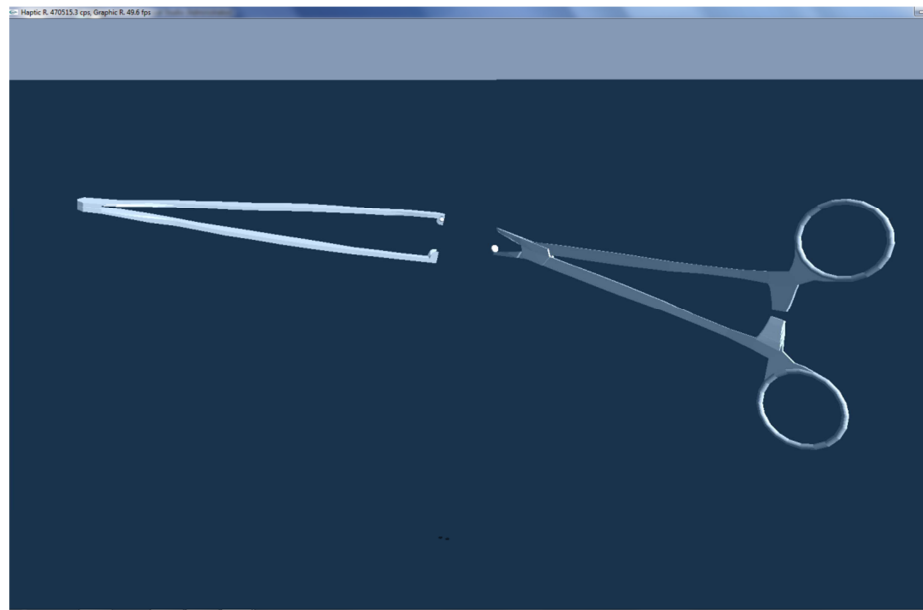


Figura 6.4 Pinzas en el ambiente de PhysX

En PhysX los actores se crean a partir de formas geométricas elementales previamente definidas en la plataforma: esferas (spheres), cápsulas (capsules) y paralelogramos (box). Un actor puede contener varias formas geométricas. Para crear formas más complejas se utilizan descripciones de vértices y triángulos que permiten crear prácticamente cualquier objeto. Esto último es lo que se empleó en este caso de estudio para generar el instrumental médico a partir de los modelos que se mostraron en la sección 5.4.

En la Figura 6.4 se observan las pinzas porta aguja y las pinzas de disección integradas al ambiente, es importante notar que tal como se observa en el diagrama de clases de la Figura 6.3, ambas pinzas son derivadas de la clase pinza genérica, que comprende la funcionalidad necesaria para los tipos de pinzas usados en este simulador. Además se observa una pequeña esfera en la punta de cada una de ellas, que proporciona la respuesta háptica dentro del ambiente. En este caso, las pinzas están representadas en el ambiente a partir de los

modelos elaborados anteriormente y la esfera es añadida a partir de las formas geométricas elementales de la plataforma PhysX.

La aguja está elaborada también a partir del modelo mostrado en la sección 3.5, mientras que el hilo es representado mediante la técnica geométrica mostrada en la misma sección y se detallará más adelante en la parte correspondiente a simulación geométrica.

Es importante destacar que para que el proceso de sutura se desarrolle de forma correcta, es necesario que el porta aguja pueda soltar y sujetar la aguja. Para este proceso se evalúa la distancia que existe entre el punto de sujeción de la pinza (en el centro de la punta dentada) y los posibles puntos de sujeción de la aguja (Figura 5.15). Con el fin de presentar una simulación apegada a la realidad y no generar perturbaciones en el ambiente, la aguja y la pinza conservan cada una su marco de referencia y orientación individual. En el momento que la pinza sujeta la aguja, ambas seguirán la orientación definida por la pinza. Para hacer esto posible, fue necesario unificar las matrices de rotación de ambos actores cuando se encuentran juntos sin alterar ni forzar el movimiento de la aguja. En la Figura 6.5 se muestran varios ejemplos con diversas posiciones de la aguja y la pinza porta aguja.

La matriz de orientación combinada de la pinza cuando sujeta la aguja se calcula con:

$$M_c = M_p M_a$$

$$M_p = M_{p1} M_{p0}^{-1}$$

Dónde: M_c = matriz de orientación combinada pinza-aguja

M_a = matriz de orientación de la aguja

M_{p0} = matriz de orientación de la pinza en el tiempo t_0 (posición anterior)

M_{p1} = matriz de orientación de la pinza para el tiempo t_1 (posición actual)

Esta nueva matriz M_c se utiliza para actualizar la posición en el espacio de la pinza cuando sujeta a la aguja.

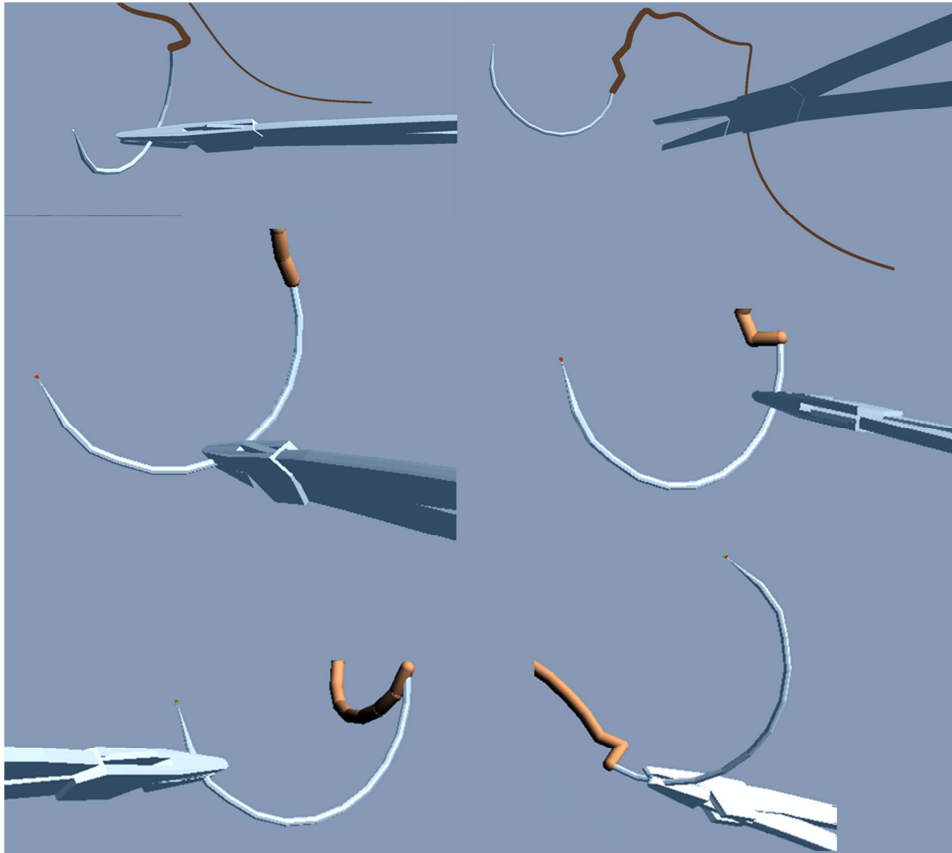


Figura 6.5 Aguja y porta aguja en diversas posiciones.

Se procedió a simular la piel, a partir de un objeto deformable que perteneciera al ámbito de PhysX. En este ambiente, lo más cercano es un objeto “tela” (cloth). Para caracterizar esta tela como piel se cambiaron diversas características de la misma, tales como: elasticidad, torsión, espesor, cantidad de partículas, color, textura, etc. En la Figura 6.6 se muestra la imagen del simulador, donde se muestra la piel con un corte en el centro, el cual está fijo a pequeñas esferas para incrementar la tensión en el corte, esto permitió brindar mejores propiedades a la tela para aproximarla a la piel humana. PhysX considera la tela con cierto espesor, para representarlo gráficamente, se colocaron dos texturas diferentes en cada una de las superficies de la tela separadas entre sí por un pequeño factor. Para cubrir el desfase y presentar la apariencia de un corte real, se cubrió el desfase con una tira de color rojo.

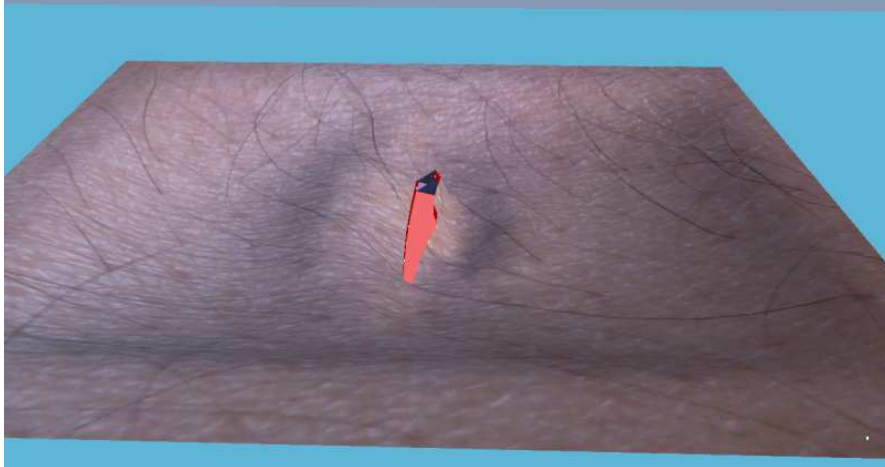


Figura 6.6 Tela que representa la piel, con textura, corte y bordes.

6.2.1.2 Simulación geométrica

En la sección anterior se detalló la simulación física, la cual fue elaborada utilizando PhysX, originalmente se intentó incluir un hilo a partir de los elementos que proporciona este ambiente, lo cual es posible si se utilizan diversos actores como articulaciones (joints) y capsulas. Sin embargo, al realizar pruebas con hilos formados a partir de estos elementos se detectó que el hilo era inestable, ya que las articulaciones no están diseñadas para soportar tensión. Por lo tanto, fue necesario crear un hilo propio tal como se describió en la sección 5.3. La simulación de este hilo es completamente geométrica, puesto que el comportamiento de los objetos se lleva a cabo a partir de ecuaciones matemáticas que permiten generar una apariencia cercana a su comportamiento real, simulando dicho comportamiento sin considerar sus propiedades físicas. En este caso de estudio solamente se imita el movimiento sin considerar propiedades como elasticidad o torsión.

Es importante notar que las partículas que lo conforman están representadas en el ambiente de PhysX como esferas y los cilindros como cápsulas, tal como se comentó en la sección anterior. Sin embargo, el movimiento, colisiones y comportamiento no están simulados por PhysX.

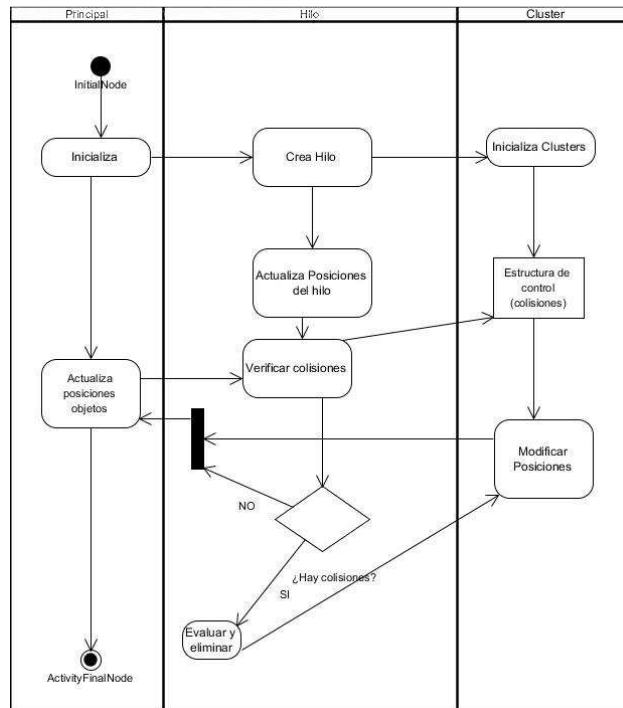


Figura 6.7 Diagrama de actividades del hilo

La Figura 6.7 muestra la interacción entre las diversas acciones que deben realizarse para el control del hilo, en él intervienen tres clases principales, una clase “principal” que se encarga de coordinar el comportamiento general, la clase “hilo” que realiza el movimiento y verifica las colisiones y la clase “cluster” que contiene a cada uno de los segmentos que forman el hilo. Cada cluster puede estar formado por uno o varios segmentos, que a su vez pueden estar o no anudados. Cuando un nudo se forma, se genera un cluster que contiene todos los segmentos que componen dicho nudo.

Se crean entonces tantas instancias de la clase cluster como elementos tenga el hilo.

El detalle completo de las clases que forman el hilo puede verse en la Figura 6.8, en este caso, la clase Actor forma parte del ambiente PhysX y es la que permite establecer la liga entre el ambiente físico y la simulación geométrica. La descripción detallada de esta clase se encuentra en la sección 11.3.

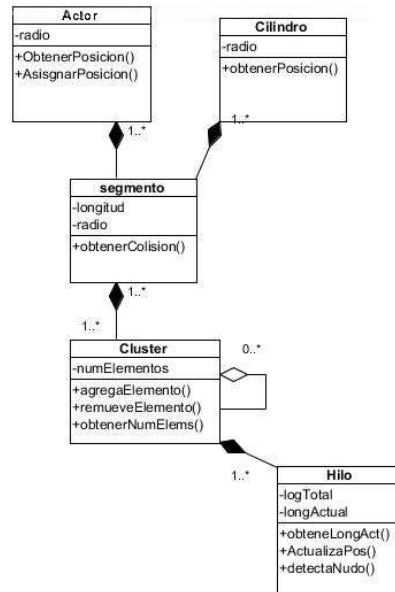


Figura 6.8 Diagrama de clases del hilo.

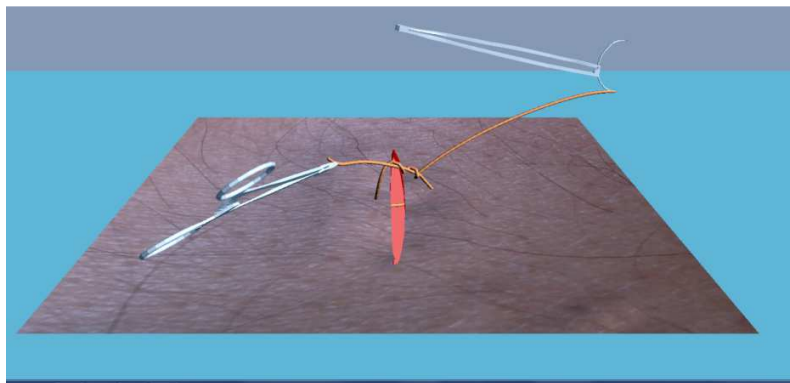


Figura 6.9 Formación de un nudo

Para poder simular la elaboración de un nudo y considerando que toda la simulación del hilo es geométrica, se elaboró una rutina simple que detecta la formación de un nudo basado en el número de segmentos de hilo que colisionan entre sí durante el movimiento del hilo, en la Figura 6.9 se ilustra un nudo en formación y en la Figura 6.10 se observa el detalle de la formación del nudo, donde se muestran dos segmentos de diferente color.

Tal como se mencionó en la sección 5.3, la condición que se estableció para detectar que se trata de nudo, consiste en que al menos cuatro segmentos de hilo de cada color son contiguos y están colisionando. En este caso, el segmento verde contiene al menos cuatro segmentos que están colisionando con cuatro el segmento rojo. Con esta condición

cubierta, se calcula la distancia de estos segmentos colisionando entre sí con la superficie de la piel y hacer contacto con la misma se inmovilizan para formar un nudo sobre la piel.



Figura 6.10 Detalle de la detección de un nudo

6.2.2 Haptic Rendering

De acuerdo a la arquitectura que se está utilizando en este trabajo para la generación de haptic rendering se requieren tres partes: Detección de colisiones, cálculo de respuesta de fuerza y acondicionamiento. Para el caso de la piel, se utiliza el algoritmo descrito en la sección 5.2.2. Se detalla a continuación cada una de estas partes.

6.2.2.1 Detección de colisiones

Para efectuar esta detección entre el háptico y la piel, se construyó la clase “*rayo*” la cual sirve para evaluar el comportamiento de cada uno de los rayos y detectar las colisiones entre la esfera háptica y la tela.

La clase *rayo* contiene: los métodos de inicialización para cada uno de los rayos, esto es, con que actor se va a interactuar, dimensiones de la tela y dirección del rayo. Esta clase, también almacena la información referente al lugar donde se realiza el primer contacto y el estado actual que tiene el rayo, a saber: iniciando contacto, en contacto o fin del contacto. Esta clase es la responsable de detectar la distancia entre la esfera háptica y la tela y determinar cuando existe contacto. Cada vez que se solicita información sobre el contacto, la clase cuenta con la información necesaria para informar a quien la invocó la posición inicial de contacto (si ya ocurrió), la distancia actual entre la esfera y la tela, posición actual

el háptico, el vértice de la tela donde ocurrió el contacto y el estado actual, así como la dirección que debe tomar la fuerza de acuerdo al contacto inicial y la posición actual.

En el caso de este trabajo, se realizaron pruebas cambiando el número de rayos utilizados, distribuidos de manera uniforme en la esfera. La cantidad óptima que se determinó fue de 26 rayos, los cuales se distribuyeron formando ángulos de 45° entre sí, que son los que se muestran en la Figura 5.6. No se observó ninguna mejora al aumentar el número de rayos por el contrario, solo aumentó el tiempo de ejecución.

Para las colisiones del hilo consigo mismo, se utilizó la técnica mostrada en la sección 5.3, mientras que para simular de mejor manera la interacción del hilo con la piel, dado que la piel es una simulación física y el hilo una simulación geométrica, fue necesario agregar de forma dinámica una serie de cilindros que faciliten la detección de colisiones entre el hilo y la piel en los límites del corte de la piel, los cuales se muestran en la Figura 6.11



Figura 6.11 Cilindros auxiliares para detección de colisiones en la piel. a) Piel sin movimiento, b) Piel en movimiento

6.2.2.2 Respuesta de fuerza

Al recabar información de los 26 rayos del proceso de detección de colisiones descrito anteriormente, se procede a identificar cuáles están en contacto, para generar los vectores de dirección de cada uno de los rayos y generar la suma vectorial que permite calcular la dirección del vector resultante.

La magnitud de la fuerza se calcula a partir del promedio de cada una de las magnitudes de los rayos en contacto con la tela. El cálculo se realiza para cada una de las esferas hápticas que intervienen en el ambiente. Una vez calculada la dirección y magnitud de la fuerza que ejerce la tela sobre el dispositivo háptico, se procede al acondicionamiento de la fuerza. Tal

como se indicó en la sección anterior, la misma rutina de rayos es empleada en ambos dispositivos hápticos.

Para el cálculo de fuerza en el caso del hilo, se envía retroalimentación al usuario en el caso de que la longitud del hilo aumente. Para el cálculo de la dirección del vector, se determina el punto fijo más cercano al punto donde está la pinza respectiva y hacia ese punto se dirige la fuerza resultante. La magnitud de la fuerza enviada es directamente proporcional al aumento de longitud.

6.2.2.3 Acondicionamiento

En esta etapa, con la fuerza calculada en la etapa anterior, se adapta al háptico que se desea utilizar, considerando en todo momento la máxima fuerza que soporta. En esta parte se agrega además algún factor de acoplamiento que permite disminuir sensaciones indeseables en el usuario. Para mejorar la sensación táctil y disminuir vibraciones indeseables, se inserta un amortiguador virtual en la respuesta de fuerza, calculado a partir de la velocidad relativa de la punta de la aguja. Esto se consigue al agregar un factor de amortiguamiento de la forma $-kv$ a la respuesta calculada en la sección 5.2.2. Donde k es una constante de amortiguamiento y v es la velocidad de la punta de la aguja, la constante k se calculó a partir de la realización de pruebas con el simulador.

6.2.3 Visual Rendering

Esta es la parte encargada de generar la imagen proveniente del mundo virtual. En el caso de sutureHap, se utilizan las funcionalidades clásicas de la biblioteca OpenGL. SutureHap no utiliza para la funcionalidad gráfica el GPU. Solamente se tiene cuidado en transferir de la manera más fiel el comportamiento del mundo virtual a la parte visual.

Para la integración completa del sistema, fue necesario incluir diversos elementos visuales que ayudan a mejorar la apariencia y presentar de manera mas realista los elementos que están contenidos en SutureHap. La Figura 6.12 muestra los diversos elementos gráficos utilizados en el simulador.

- A) SutureHap en modo de malla, en esta figura se pueden apreciar todos los componentes que integran el ambiente en modo de malla, se pueden observar los

- límites de cada uno de los elementos y la cantidad de triángulos, líneas y puntos que delimitan cada uno de los elementos del ambiente.
- B) Piel contiene una textura creada a partir de la fotografía de un segmento de piel real. En la parte interna, se cuenta con una imagen diferente tomada de otro segmento de piel real con un color más rojizo, de tal forma que al sujetar la herida, quede expuesto un segmento de un color diferente. También como se indicó anteriormente, la herida cuenta con una tira roja que une los dos segmentos.
 - C) Campos: se incluyeron en la escena una serie de tiras de color azul para representar los “campos” que utilizan los médicos para delimitar la zona de trabajo en los pacientes. Para fines de nuestro simulador, estos campos no están elaborados con objetos deformables, están formados por un objeto sólido tipo “box” muy delgado.
 - D) Fondo de la piel, se insertó un elemento de color rojo tenue para simular el interior de la piel y el fondo de la herida.
 - E) Piel completa: una vez creada la escena de la piel, campos y fondo, se agregaron una serie de pequeñas partículas que permiten mantener la piel cortada y con cierta deformación con la finalidad de que el aspecto de la herida se acerque al de una real, estas partículas están elaboradas a partir de actores con forma de esfera que se insertan en el ambiente de PhysX.
 - F) Instrumental médico, creado a partir de los modelos citados anteriormente y controlados por los dispositivos hápticos.
 - G) El hilo, se muestra la representación final, generada a partir de las características mostradas en la sección 5.3.
 - H) La aguja, con todas las características mostradas en la sección anterior.
 - I) Finalmente, se muestra el aspecto final, con todos los elementos que conforman SutureHap.

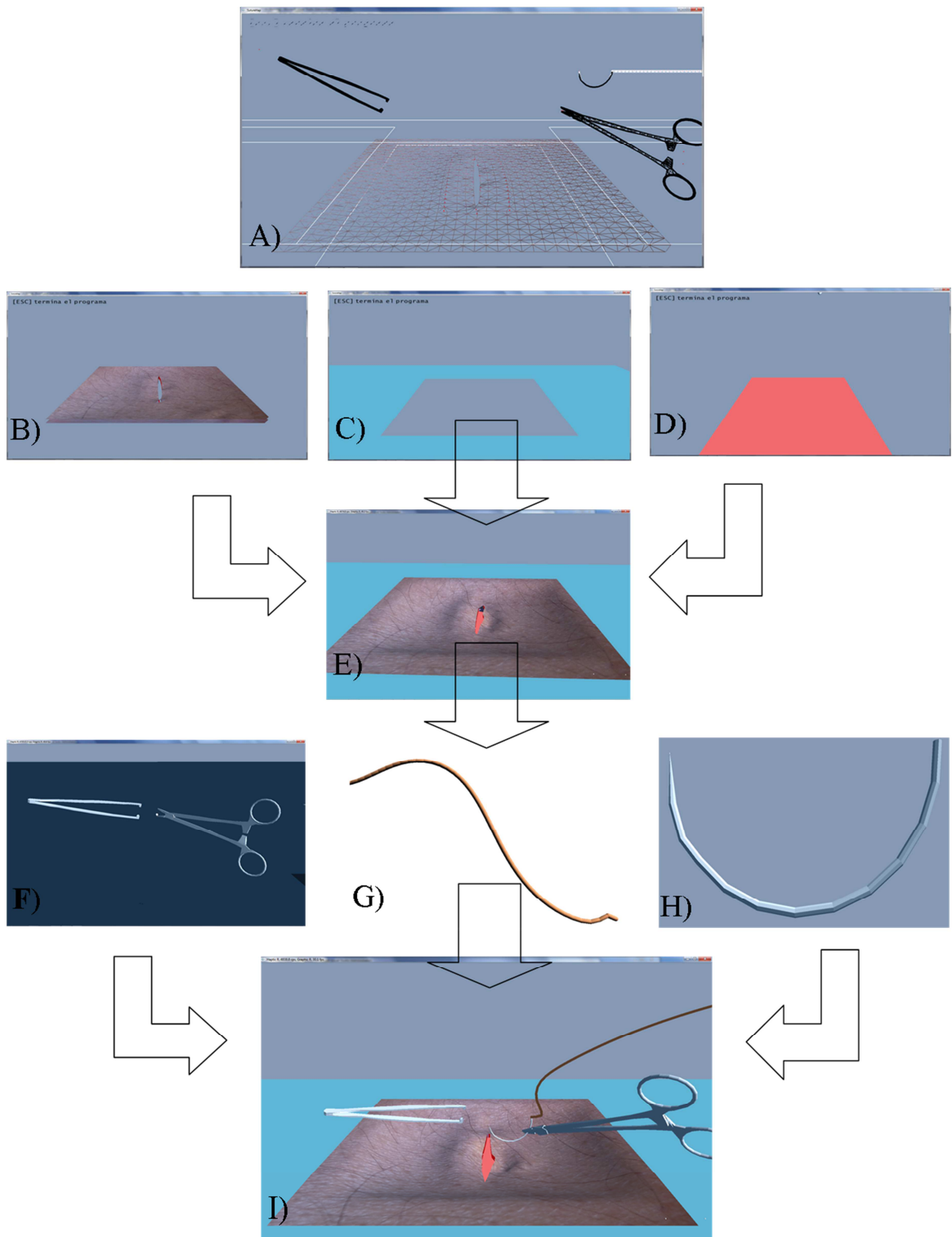


Figura 6.12 Ensamble de SutureHap

6.3 Diseño de los elementos del experimento

Se desea que los usuarios de este simulador adquieran las competencias necesarias para efectuar labores de sutura en humanos. Existen diversas técnicas para la realización de suturas (Pizarro, 2012). Este trabajo se enfoca en la técnica de sutura simple separada y sutura simple continua, ver Figura 6.13.

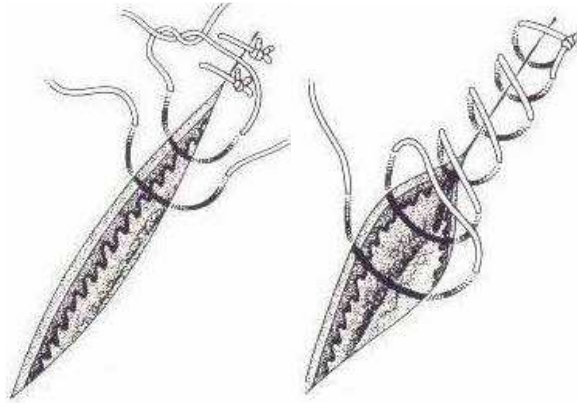


Figura 6.13 Técnicas de sutura a) sutura simple separada b) sutura simple continua²⁹

En este simulador, se presenta al usuario el instrumental quirúrgico necesario para realizar estas operaciones.

Para nuestro caso de estudio, nos centraremos en el procedimiento de la Figura 6.13a, sutura simple separada. El usuario será capaz de realizar todos los pasos que se muestran en la Tabla 3.1 y además cortar el hilo, con lo cual es posible generar un nuevo punto simple.

Se utilizan dos dispositivos hápticos Phantom Omni, para interactuar en el ambiente, cada uno cuenta con seis grados de libertad, sin embargo, la retroalimentación sólo es en tres (x, y, z).

En la Figura 6.14 se muestra la interacción del usuario con SutureHap con la secuencia de pasos necesarios para realizar un punto simple de sutura en un segmento plano de piel.

- A) Inserción de la aguja en la piel: la aguja se inserta en la piel al mismo tiempo que la piel es sujeta con la pinza de disección, en este caso el usuario debe cuidar la

²⁹ Imágenes tomadas de <http://www.mrcophth.com/ophthalmicinstruments/suturetypes/suturetypes.html>

trayectoria y posición de la aguja, se envía al usuario la retroalimentación correspondiente a la perforación.

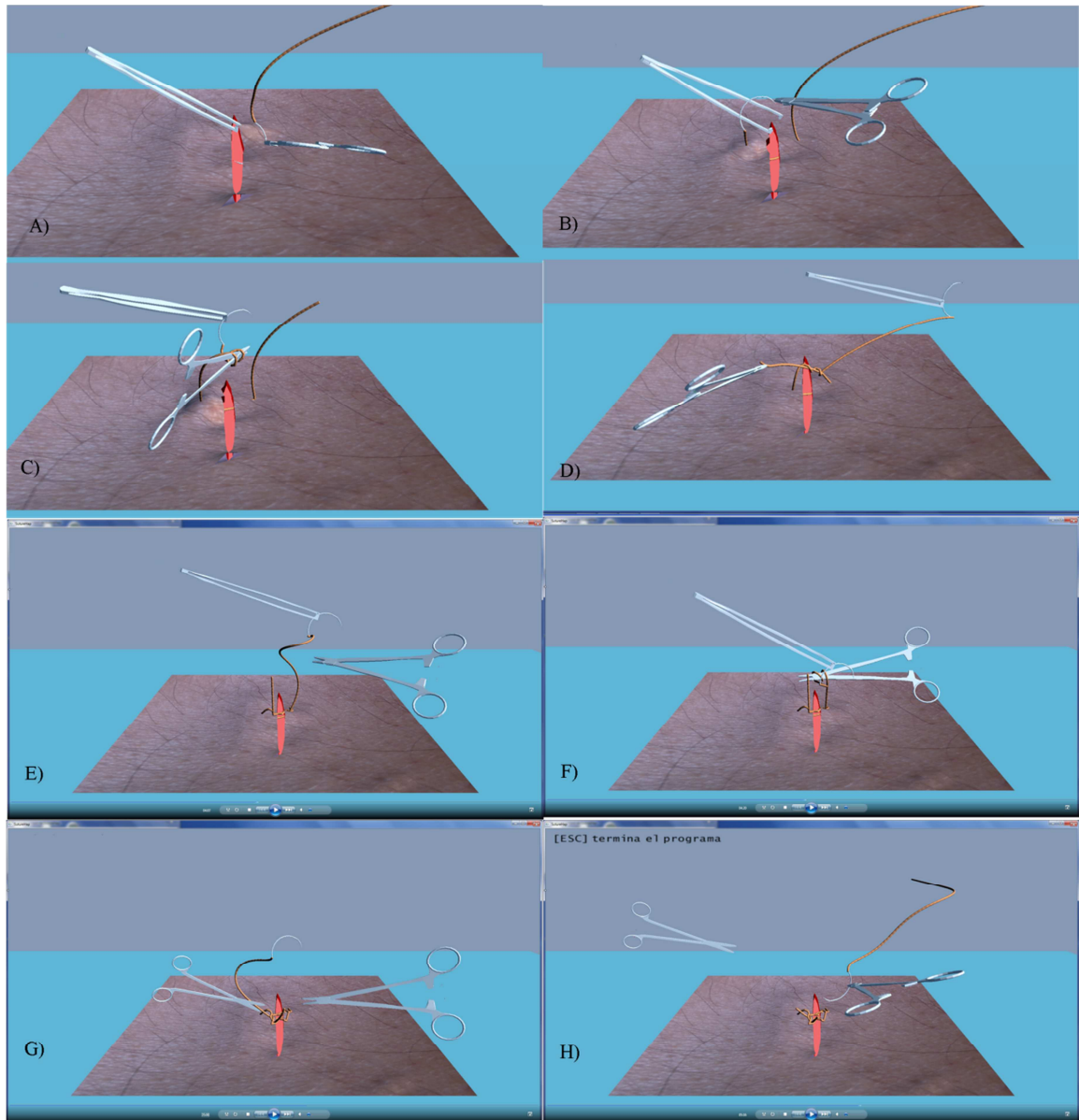


Figura 6.14 Proceso de sutura en el simulador SutureHap

- B) Jalar el hilo: en este punto, la aguja ha perforado ambos lados de la herida de la piel y el hilo está pasando por ambas perforaciones y estamos jalando el hilo con la aguja.
- C) Preparación del nudo: se ha enrollado el hilo sobre la pinza porta aguja y se está en condiciones de sujetar el extremo suelto del hilo para formar el nudo.

- D) Nudo en proceso: se ha formado un nudo al cruzar los segmentos del hilo, y se está acercando hacia la superficie de la piel.
- E) Nudo fijo en la piel: el nudo ha quedado fijo en la piel y se está en condiciones de elaborar un segundo nudo.
- F) Segundo nudo: se está elaborando un segundo nudo, enrollando el hilo sobre la pinza.
- G) Corte: con el segundo nudo fijo, se procede a cortar el hilo con la tijera.
- H) Punto terminado: el punto ha quedado terminado después del corte y estamos en posibilidad de generar un nuevo punto.

En este capítulo se ha mostrado el proceso que se ha seguido para el desarrollo del caso de estudio de esta investigación y la forma como se ha elegido el ambiente de trabajo. Así como los diferentes intentos que se realizaron en los diversos ambientes para la creación de SutureHap. Es importante notar que una de los retos más importantes lo representa la simulación del comportamiento de la piel, ya que al tratarse de un objeto deformable exige una cantidad considerable de recursos computacionales.

Cabe mencionar que se logró una integración exitosa tanto de los elementos visuales, como del comportamiento háptico para realizar de forma correcta la operación de sutura.

El siguiente capítulo describen los procesos de evaluación que se llevaron a cabo para las diferentes etapas de desarrollo de este trabajo.

Capítulo 7.

Proceso de evaluación, discusión y resultados

7 Proceso de evaluación, discusión y resultados

Debido a que el desarrollo de SutureHap se fue desarrollando por etapas, de igual manera el proceso de pruebas y evaluación de resultados se llevó a cabo por fases que se pueden agrupar en dos grandes procesos:

- 1.- Generación de haptic rendering para una superficie deformable
- 2.- Evaluación del ambiente virtual de entrenamiento médico

Los cuales se describen a continuación:

7.1 Generación de haptic rendering para una superficie deformable

En este ambiente, fue necesario utilizar una superficie deformable para simular el comportamiento de la piel humana, como se comentó en el capítulo anterior se utilizó para simular dicha piel una tela generada en PhysX, la cual fue sometida a dos diferentes pruebas para validar el método planteado en la sección 5.2.2.

La primera de ellas, fue una prueba cuantitativa en la que se evaluaron los valores de fuerza calculados por el algoritmo propuesto y enviados al dispositivo háptico para diferentes condiciones de la tela.

La segunda prueba fue una prueba cualitativa, en la que un grupo de personas evaluó el comportamiento de la tela y manifestó sus observaciones al respecto.

Ambos pruebas se llevaron a cabo en un equipo Workstation DELL T750, procesador Intel XEON E5620, 2.4 GHz, 12 GB RAM, Tarjeta de Video NVIDIA GeForce 9800 GX2, Sistema Operativo Windows 7 64 bits. Al cual se encontraban conectados dos dispositivos Phantom Omni.

7.1.1 Pruebas cuantitativas

Para este caso, las pruebas fueron llevadas a cabo por el desarrollador de la aplicación con el objetivo de verificar que el comportamiento de la tela seleccionada en el ambiente virtual con dispositivos hápticos, realmente fuera semejante al comportamiento de la piel humana y de que la fuerza de retroalimentación calculada por el método propuesto se comportase de manera cercana a la realidad.

Se realizaron dos acciones principales:

- a) Perforar la tela a lo largo del eje y , de $-y$ a $+y$ y viceversa (abajo hacia arriba y arriba hacia abajo).
- b) Deslizar el cursor háptico por encima y por debajo de la tela a lo largo de los ejes x y z . Para esto es necesario ejercer presión sobre el eje y sin llegar a perforar la tela.

La forma como se realizaron las pruebas se muestra en la Figura 7.1, en a) se muestra al avatar háptico perforando de $-y$ a y , mientras que en b) se muestra al avatar háptico deslizándose por debajo de la tela a lo largo del eje x , de $-x$ hacia $+x$.

En ambas pruebas se modificó el radio del cursor háptico que explora la tela y el grosor de la tela. También se consideró en primera instancia la ausencia de gravedad y posteriormente se consideró la gravedad estándar de 9.8 m/s^2 .

En cada una de las pruebas, el programa generó un reporte con las posiciones del dispositivo háptico, los componentes y magnitudes de la fuerza y un marcador de tiempo del momento en que se generaron dichas posiciones y fuerzas. Con estos datos se elaboraron una serie de gráficas que permiten analizar el comportamiento de la fuerza para cada una de las situaciones y variables involucradas en el experimento.

Las variables que se consideraron para hacer las mediciones son: radio de la esfera, dimensiones de la tela (ancho y largo), grosor o espesor de la tela, factor de ruptura (factor de configuración de PhysX), factor k (explicado en la sección 5.2.2).

Se consideró un radio inicial de la esfera de 0.05 cm, las dimensiones de la tela son de 10cm x 10cm, el factor de ruptura de 5.0, no se consideró influencia de la fuerza de gravedad y el factor k en 0.3. Para las pruebas iniciales se consideró un espaciamiento de 0.25 entre las partículas que forman la tela.

Con los valores anteriores constantes, se consideraron tres grosores de tela diferentes, 0.2, 0.4 y 0.8. Se procedió a perforar la tela lo largo del eje Y, en dirección de $-Y$ a $+Y$ y viceversa.

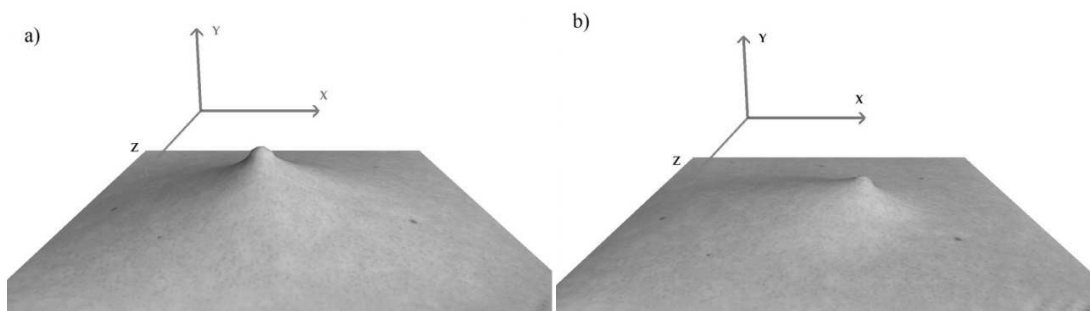


Figura 7.1 Pruebas realizadas en la tela, a) Perforación b) Deslizamiento

Durante el desarrollo del experimento, se trató de minimizar los desplazamientos en los ejes X y Z. Es importante notar que al tratarse de un dispositivo háptico que controla un usuario humano y que ejerce una fuerza que se opone al movimiento cuando está en contacto con la tela, no es sencillo mantener un movimiento constante en el eje Y debido a la retroalimentación que el dispositivo háptico envía al usuario. Así mismo, se generan movimientos menores en los ejes X y Z.

Para este proceso se realizaron alrededor de 50 experimentos, obteniendo para cada uno de ellos una gráfica que mostraba la distancia de desplazamiento de la piel contra la fuerza enviada al dispositivo háptico. Se identificaron algunas gráficas que muestran de manera más representativa el comportamiento de la fuerza de retroalimentación.

La Figura 7.2 muestra los desplazamientos en cada uno de los ejes contra la fuerza que se ejerce sobre la tela. Se puede notar en la gráfica que el aporte que hacen las componentes x

y z en la fuerza es mínimo, por lo que en las gráficas subsecuentes, solamente se mostrarán las componentes en el eje Y para este tipo de experimento.

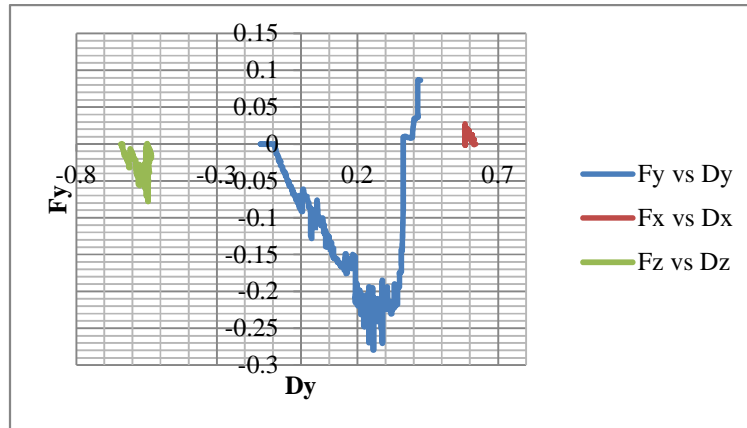


Figura 7.2 Fuerza vs desplazamiento, ejes X, Y y Z.

Entonces, si se centra el análisis en el eje Y, se puede observar en la Figura 7.2 el comportamiento de la fuerza que ejerce la tela en el dispositivo háptico. El signo indica el sentido de la fuerza, dado se está desplazando la esfera de $-y$ hacia $+y$. Debido a que la tela está en reposo y no se está considerando la fuerza de gravedad, el contacto inicial de la esfera con la tela se realiza en 0. La fuerza en sobre la esfera comienza a aumentar y alcanza un punto máximo de -0.28 cuando el desplazamiento es de 0.25 . A partir de este punto, la fuerza disminuye bruscamente debido a que la esfera logra atravesar la tela.

Se realizaron aproximadamente 40 pruebas aumentando el diámetro de la esfera, el grosor de la tela, modificando la gravedad y combinando las operaciones de perforación y deslizamiento. Para ello se emplearon simulaciones automáticas, el dispositivo háptico virtual o los dispositivos hápticos Phantom y Novint. En cada una de ellas se realizó el análisis de los datos con la finalidad de verificar si el comportamiento es consistente con lo planeado.

En el anexo 11.4 se muestran mas detalles de los resultados y las gráficas obtenidos en estas pruebas.

Por último, se repitió el esquema completo de pruebas aumentando la densidad de partículas que componen la tela. La distancia entre las mismas se cambió de 0.25 a 0.1 , lo cual incrementó el número de partículas de 1724 a 10404 . Este incremento implica un

mayor consumo de recurso computacional, el equipo de prueba soportó esta cantidad de partículas y mantuvo la frecuencia de actualización gráfica por arriba de 30 Hz. La respuesta de fuerza con esta configuración de partículas se muestra en la Figura 7.3. Para estas gráficas se utilizó una esfera con diámetro = 0.05, un grosor de tela de 0.4, sin influencia de la gravedad y un factor $r = 0.3$. En la Figura 7.3a, se observa el comportamiento de la fuerza cuando se perfora de $-Y$ a $+Y$, mientras que en Figura 7.3b, la operación realizada es de deslizamiento de $-X$ a $+X$.

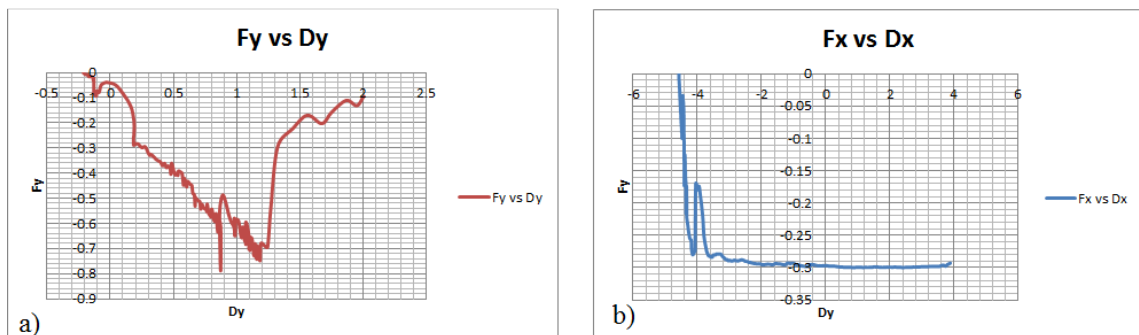


Figura 7.3 Desplazamiento vs fuerza con alta densidad de partículas a) Perforación de $-y$ a $+y$ b) Deslizamiento de $-x$ a $+x$

El comportamiento es congruente con el obtenido en los experimentos anteriores, pero es importante notar que la fuerza se muestra notablemente más estable que los casos similares. Esto es, la estabilidad mejoró notablemente con el aumento de densidad de partículas.

7.1.2 Pruebas cualitativas

La prueba se llevó a cabo con 15 voluntarios de diferentes edades, todos graduados en carreras de Física, Matemáticas y afines a Computación. Los participantes no contaban con experiencia previa en dispositivos hápticos.

El objetivo de esta fase de pruebas fue determinar:

- a) El desempeño del algoritmo bajo las circunstancias de perforación y desplazamiento
- b) Si el usuario percibe la tela virtual como una superficie deformable real, así como determinar si hubiere comportamientos indeseados.

Para esta prueba, se ubicó al usuario enfrente del equipo y se le brindó una breve introducción acerca del uso de los dispositivos hápticos (Figura 7.4). Derivado de la diversidad de la naturaleza humana, se añadió la funcionalidad para trabajar con diestros y

Proceso de evaluación, discusión y resultados

zurdos. El programa al iniciar, pregunta al usuario si es diestro o zurdo. El equipo de prueba cuenta con dos dispositivos hápticos. En esta prueba sólo se utiliza uno de ellos, de acuerdo a la selección del usuario. Cada prueba tuvo una duración máxima de 10 minutos.

Los usuarios firmaron una forma de consentimiento informado (anexo 11.6), por medio de la cual manifestaron su participación voluntaria y que no tuvieron inconveniente en realizar la prueba.

Se les instruyó para realizar las siguientes operaciones con el ambiente:

- a) Perforar la tela de arriba hacia abajo
- b) Perforar la tela de abajo hacia arriba
- c) Deslizarse a lo largo del eje x por encima de la tela
- d) Deslizarse a lo largo del eje x por debajo de la tela
- e) Deslizarse a lo largo del eje z por encima de la tela
- f) Deslizarse a lo largo del eje z por debajo de la tela



Figura 7.4 Usuario realizando la prueba de percepción

Para este experimento, se utilizó una esfera de exploración con un radio de 0.05, grosor de la tela = 0.4, distancia entre partículas = 0.1, $r = 0.3$ y se consideró presente la fuerza de gravedad.

Al final de la prueba, le fue proporcionado al usuario un cuestionario para que manifestara su percepción, con base en un cuestionario de seis preguntas valuadas en una escala del 1 al 5, más una pregunta de si/no, para que se indicara si consideraba que la sensación percibida era cercana a una experiencia real. En el anexo 11.5 se muestra el cuestionario aplicado.

Los resultados obtenidos se muestran en la gráfica de la Figura 7.5. En esta gráfica se puede observar que el 93.3% de los participantes está de acuerdo o completamente de acuerdo con la sensación cuando perforan la tela de abajo hacia arriba. El 86.66% está completamente de acuerdo o de acuerdo con la sensación percibida, cuando perforan de arriba hacia abajo. Se obtuvo el mismo porcentaje para las operaciones de deslizarse sobre o por debajo de la tela a lo largo del eje x y deslizarse por debajo de la tela a lo largo del eje z. Al deslizarse por encima de la tela a lo largo del eje z, el 73.33% de los participantes estuvieron completamente de acuerdo o de acuerdo con la sensación percibida.

En la pregunta de si/no, el 100% de los usuarios están de acuerdo que la sensación es cercana a una experiencia real.

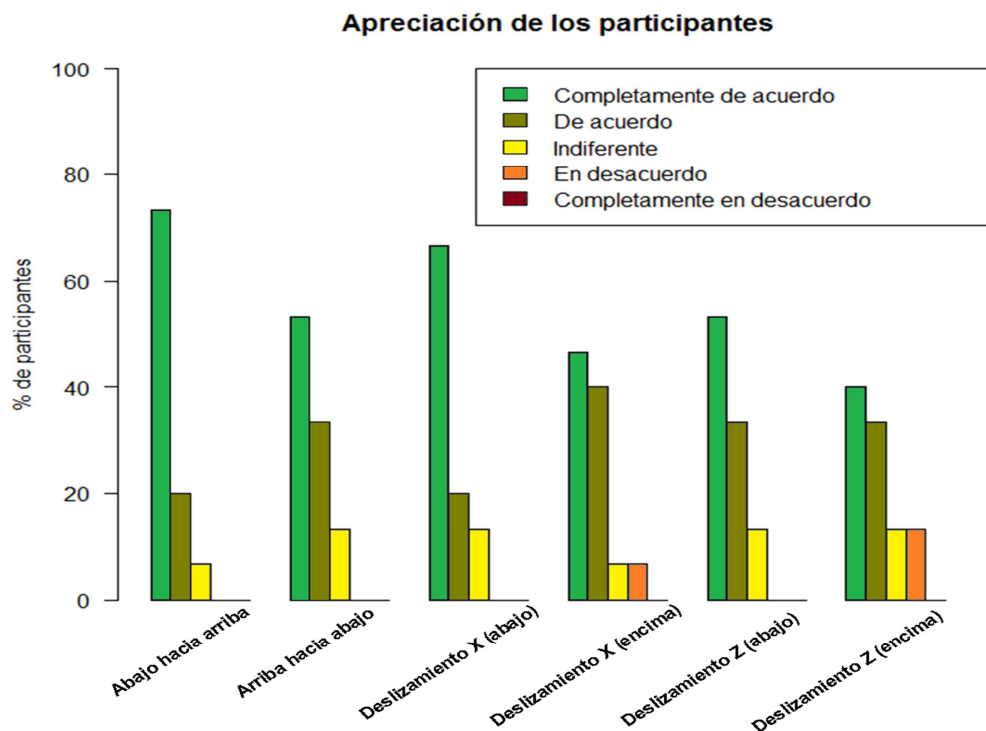


Figura 7.5 apreciación de los participantes

Los resultados obtenidos señalan que en la muestra de usuarios utilizados, el método propuesto puede utilizarse para generar la fuerza de retroalimentación adecuada, principalmente para realizar perforaciones de abajo hacia arriba.

7.1.3 Discusión

Con base en el trabajo de (Webster et al., 2001) y de acuerdo a los experimentos realizados, se ha demostrado que el comportamiento de una malla deformable puede ser similar al comportamiento de la piel humana. De acuerdo con el caso de estudio de este trabajo, el utilizar PhysX como motor de física proporciona ventajas adicionales, PhysX permite simular telas con grosor o espesor, mientras que la malla deformable propuesta por (Webster et al., 2001) no muestra cómo se considera el grosor de la piel. Otra ventaja adicional muy importante, es que el uso que hace PhysX del GPU para dicha simulación permite acelerar el tiempo de respuesta.

Ahora bien, los resultados obtenidos muestran que según la apreciación de los usuarios, el método simplificado propuesto en la sección 5.2.2, permite realizar una generación apropiada de haptic rendering para una superficie deformable.

Mediante los ajustes correspondientes y la representación gráfica adecuada, esta “tela” se comporta como piel humana.

Existen algunos inconvenientes detectados por el uso de PhysX. Los principales consisten en algunos errores de detección de colisiones, ya que existe falta de precisión en alguno de los ejes y direcciones. Es también importante hacer notar que PhysX detecta y procesa adecuadamente las colisiones entre objetos rígidos y deformables, pero no envía información al usuario de las mismas. Para compensar este inconveniente, fue necesario desarrollar y aplicar el método descrito en la sección 5.2.2 que emplea 26 rayos para la detección de colisiones y cálculo de fuerza de retroalimentación.

7.2 Evaluación del ambiente virtual de entrenamiento médico

Con el desarrollo del ambiente de entrenamiento completo tal como se mostró en el capítulo 6, se realizaron una serie de pruebas con usuarios, utilizando el mismo equipo descrito en la sección anterior.

Estas pruebas se llevaron a cabo con 12 voluntarios de diferentes áreas, ninguno de ellos del área médica y todos con estudios de licenciatura concluidos en las áreas de matemáticas, física, electrónica y computación.

El objetivo de esta prueba es evaluar como apreciaban los usuarios el comportamiento del simulador de sutura SutureHap, tanto el aspecto gráfico y de modelación. Así como la respuesta háptica del mismo.



Figura 7.6 Usuarios realizando la prueba usabilidad de SutureHap

De la misma manera que la sección anterior, se ubicó al usuario enfrente del equipo (Figura 7.6). Se le brindó una breve introducción acerca del uso de los dispositivos hápticos y se le mostraron dos videos, en el primero de ellos se muestra como un médico realiza un punto de sutura simple en una piel de cerdo. Algunas imágenes de este video se muestran en la Figura 7.7, en la cual se pueden observar los pasos para realizar la sutura de la piel como se explicó en la sección 6.3.

El segundo video muestra la técnica completa para realizar un punto de sutura simple llevada a cabo en el simulador. Las imágenes correspondientes a este video, se muestran en la Figura 6.14. El usuario puede observar ambos videos las veces que quiera y en cualquier momento.

El tiempo de la prueba para cada usuario fue de aproximadamente una hora, dividido en dos partes. En la primera parte se le instruyó al usuario para que se familiarizara con los movimientos del instrumental, el comportamiento del hilo, de la piel y la ubicación de los

Proceso de evaluación, discusión y resultados

elementos, basado en la percepción de tercera dimensión simulada en el ambiente virtual de entrenamiento médico.

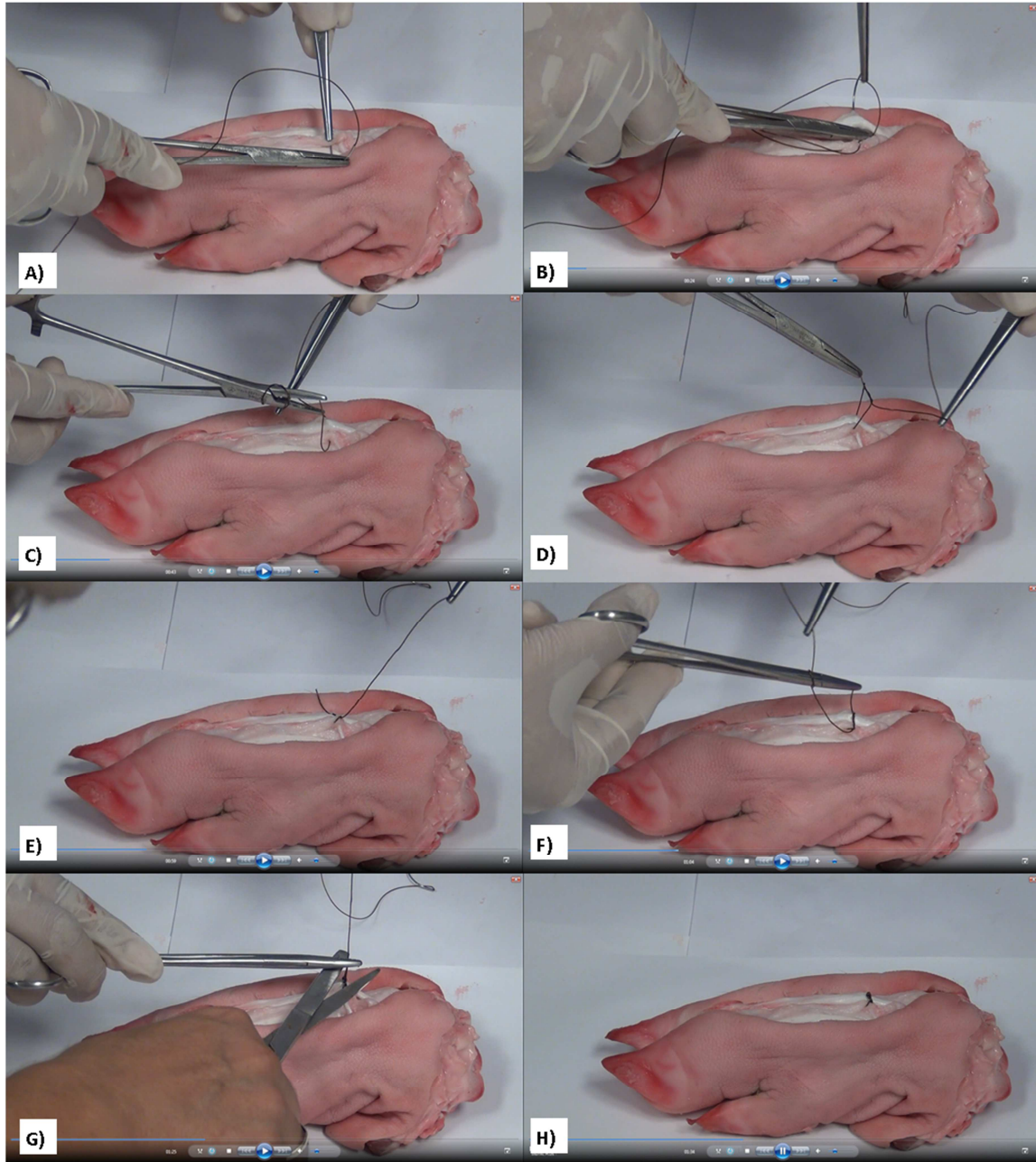


Figura 7.7 Imágenes del video realizado por el médico³⁰

³⁰ Este video fue realizado gracias a la participación del estudiante del Tecnológico de Monterrey de la carrera de Médico Cirujano. Gerardo Aguilar Gómez.

En la segunda parte, se les solicitó a los participantes que realizaran las operaciones mostradas en los videos, esto es, generar un punto de sutura simple realizando los siguientes pasos:

- Sujetar la piel con la pinza de disección
- Perforar la piel en ambos lados de la herida
- Hacer pasar el hilo por la piel
- Generar al menos un nudo
- Cortar el hilo

En promedio cada participante practicó estas tareas en 30 minutos. Al finalizar la prueba se le solicitó al usuario que contestara un cuestionario de usabilidad de 14 preguntas, las cuales permiten identificar la percepción de usuario en cuanto a:

- Simulación del ambiente en general
 - o Modelos de las pinzas, aguja e hilo
- Facilidad de uso del instrumental
 - o Sujeción de la aguja
 - o Sujeción del hilo
 - o Movimiento de la pinza
 - o Corte
- Facilidad para realizar la operación
 - o Movimiento del hilo
 - o Realización de nudos
- Experiencia general del sistema
 - o Tutorial
 - o Video demostrativo
 - o Pantalla de ayuda

La valoración de las preguntas se llevó a cabo usando la escala de Likert de cinco puntos, considerando: 1 completamente en desacuerdo, 2 en desacuerdo, 3 ni en acuerdo ni en desacuerdo, 4 de acuerdo y 5 completamente de acuerdo.

Proceso de evaluación, discusión y resultados

Las preguntas explícitas y el concentrado de los resultados se muestran en la Tabla 7.1. En esta tabla se incluyen las respuestas de las 12 personas que participaron en el experimento, mientras que el comportamiento completo de las respuestas se muestra en la Figura 7.8 en donde se puede destacar que si agrupamos a quienes están completamente de acuerdo o de acuerdo, el 75% consideró que la piel está representada correctamente y que la respuesta de fuerza es consistente con el ambiente virtual gráfico. El 66.6% consideró que el hilo está representado correctamente. El 100% está de acuerdo o completamente de acuerdo en que la distribución de los elementos es adecuada, que el uso de los elementos en el ambiente es intuitivo y sí recomendaría el ambiente

Tabla 7.1 Precepción del usuario de SutureHap

No.	Pregunta	Min	Max	\bar{x}	σ
1	Los modelos de las pinzas y aguja están representados correctamente	2	5	4.6	0.900
2	La piel está representada correctamente	2	5	4.0	0.953
3	El hilo está representado correctamente	3	5	4.3	0.985
4	Los pasos para realizar una sutura en el ambiente virtual se pueden realizar fácilmente	2	4	2.9	0.793
5	Sujetar la aguja en el ambiente fue sencillo	2	5	4.2	0.937
6	Perforar la piel resultó sencillo	3	5	4.4	0.669
7	Es fácil sujetar la piel con la pinza de disección	3	5	4.4	0.793
8	Es fácil realizar un nudo	1	4	2.2	0.937
9	El video presentado le ayudó a comprender mejor cómo se hace la sutura	5	5	5	0.000
10	La respuesta de fuerza fue consistente con el ambiente virtual gráfico	2	5	4.1	0.996
11	La distribución de los elementos necesarios para la sutura me parece adecuada	4	5	4.7	0.492
12	El uso de los elementos en el ambiente es intuitivo	4	5	4.8	0.389
13	La pantalla de ayuda fue útil para la realización de la tarea de sutura	2	5	4.6	0.900
14	Recomendaría este ambiente para que otras personas se entrenen en la tarea de sutura	4	5	4.4	0.515

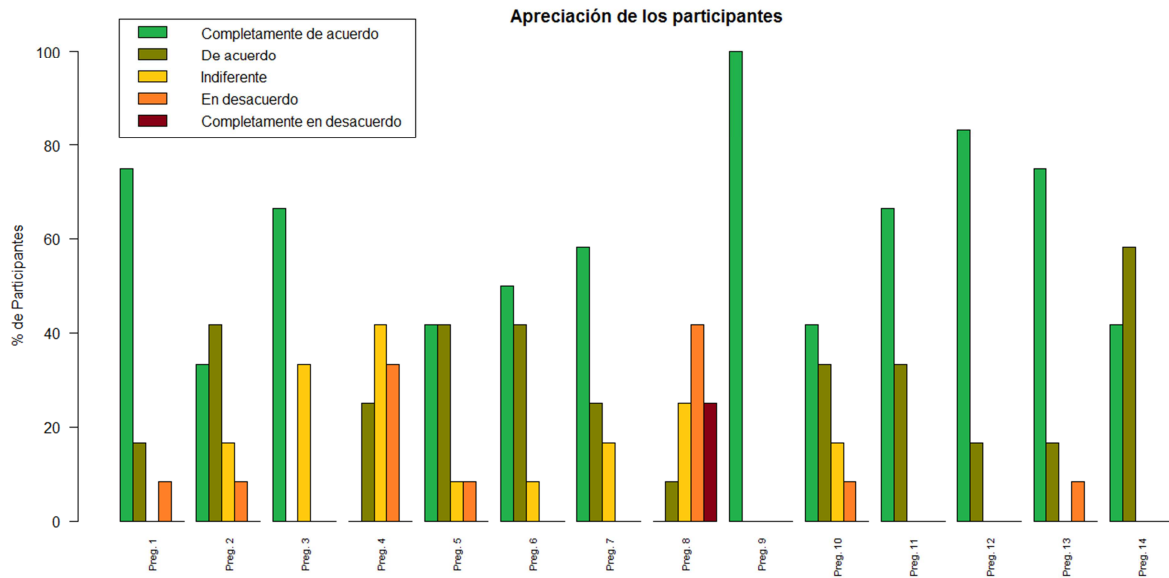


Figura 7.8 Respuestas de los usuarios al cuestionario de usabilidad

En la Figura 7.9 se muestra la distribución de las respuestas, en la cual podemos observar que la mayoría de las respuestas se encuentra cercana a la mediana.

Se incluyeron dos preguntas adicionales para conocer si los usuarios han usado anteriormente algún ambiente virtual de entrenamiento y si el ambiente contaba con retroalimentación táctil.

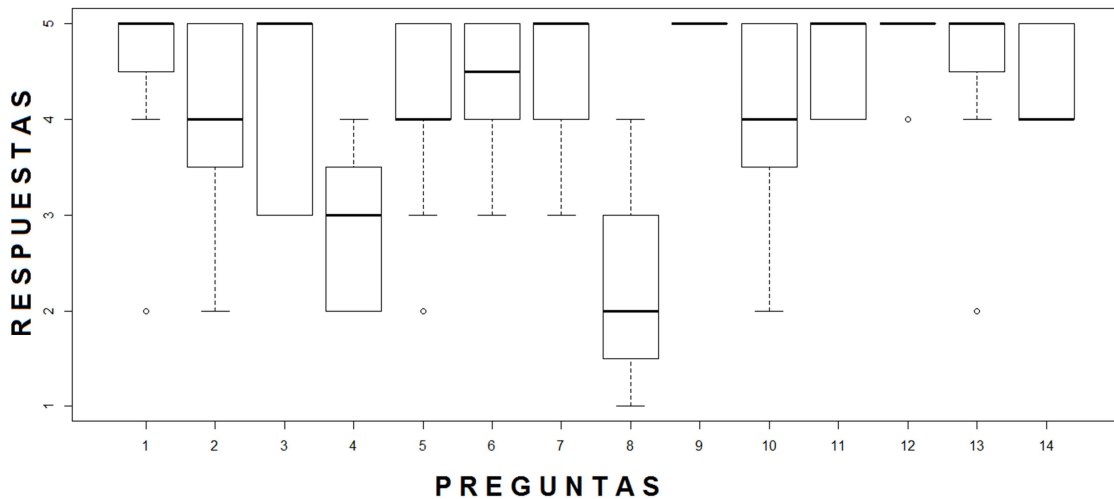


Figura 7.9 Comportamiento de las respuestas

Del 100% de los usuarios, el 50% había usado un ambiente virtual, de ese 50%, solamente el 33.3% había usado un sistema con retroalimentación táctil.

Finalmente, en un campo abierto se solicitó a los usuarios sugerencias u opiniones generales acerca de su impresión del sistema. La mayoría de los comentarios señala la dificultad de percepción de la tercera dimensión. También se señala que el proceso es difícil de completar.

7.2.1 Discusión.

De acuerdo a los resultados de la prueba de usabilidad podemos notar que los usuarios en general tienen una buena impresión del simulador con respecto a los modelos del instrumental, el hilo y la piel. Además, los usuarios también consideran correcta la distribución y el comportamiento de los elementos. Esto último, permite validar la propuesta que se realiza en la sección 5.3 para el comportamiento del hilo.

Sin embargo, en los resultados se puede observar que los usuarios no consideran fácil llevar a cabo los pasos necesarios para realizar una sutura ni la elaboración de un nudo. Es importante remarcar que ninguno de los usuarios tiene entrenamiento médico, por lo que no es posible determinar con estos resultados si las respuestas se deben a problemas del simulador o a la falta de habilidad de los usuarios.

No obstante, también es importante destacar que todos los usuarios están de acuerdo en recomendar el simulador para su uso.

Las observaciones anteriores hacen necesario realizar pruebas con usuarios que cuenten con capacitación en el área de medicina.

En lo que se refiere a las sugerencias de los usuarios, la mayoría señala como uno de los principales problemas la dificultad para adaptarse a la simulación de la tercera dimensión, ya que esto dificulta la ubicación espacial del usuario en el sistema.

7.3 Pruebas de hipótesis

A través de los resultados obtenidos, se demostrará que SutureHap permite que el usuario perciba de manera realista los elementos involucrados en la tarea de sutura y si es cercano a un ambiente real. Tales afirmaciones permitirán validar las hipótesis planteadas en la sección 1.4.

Para la demostración de las hipótesis, es necesario conocer la media (\bar{x}), la varianza S^2 y la desviación estándar (S) de la muestra. Con estos valores es posible obtener la distribución t de student que nos brinda información acerca del nivel de significancia del experimento. Se utiliza la distribución t porque se trata de una muestra pequeña ($N < 30$) y se desconoce la desviación estándar poblacional. (Ronald E. Walpole, Raymond H. Myers, 1999).

Para el cálculo de la distribución t , se emplea:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$$

donde: \bar{x} es la media de la muestra, μ es la media poblacional; S es la desviación estándar de la muestra y n es el tamaño de la muestra.

Hipótesis planteadas:

1. La integración de dispositivos hápticos, permitirá la creación de un ambiente virtual de aprendizaje para entrenamiento médico, tal que el estudiante perciba de manera realista los elementos involucrados en la tarea de sutura.
2. Los participantes podrán percibir el ambiente virtual con hápticos para el entrenamiento de tareas de sutura cercano a la percepción de un ambiente real.

Considerando los resultados obtenidos en la prueba cualitativa de la sección 7.2 y considerando que las preguntas del cuestionario se fueron elaboradas para determinar la percepción de los usuarios del ambiente y de los elementos, se procederá a continuación a realizar la demostración de las hipótesis planteadas.

Para la hipótesis 1:

h_0 - *El estudiante no percibe de manera realista los elementos involucrados en la tarea de sutura.*

h_1 - *Es estudiante percibe de manera realista los elementos involucrados en la tarea de sutura.*

Se agrupan las respuestas a las preguntas 4,5,6,7 y 8 del cuestionario de usabilidad mostrado en la Tabla 7.1, que están relacionadas con la percepción de los elementos involucrados en la tarea de sutura, los resultados obtenidos son: Valor mínimo = 1, valor máximo = 5, promedio = 3.617, desviación estándar = 1.223.

El tamaño de la muestra fue de 12 personas y se considera la media poblacional en 3, dado que se asume que la distribución de las respuestas se comporta de forma normal.

Utilizando los resultados obtenidos:

$$t = \frac{3.617 - 3.0}{\frac{1.223}{\sqrt{12}}} = 1.747$$

Con este último dato, se puede determinar el valor de significancia α utilizando la tabla de distribución de probabilidad o calculando directamente el valor, para este caso, el valor calculado considerando 11 grados de libertad fue: $\alpha = 0.0542$. Esto significa que en el 94.57% de los casos, los estudiantes perciben de manera realista los elementos de sutura. Por lo anterior se descarta la hipótesis nula h_0 .

De forma análoga para la hipótesis 2:

h_0 - El estudiante no percibe el ambiente virtual con hápticos para el entrenamiento de tareas de sutura cercano a un ambiente real.

h_1 - El estudiante percibe el ambiente virtual con hápticos para el entrenamiento de tareas de sutura cercano a un ambiente real.

Para esta hipótesis, a partir de analizar las respuestas emitidas por los participantes a las preguntas 1,2,3,10 y 11. Las cuales corresponden a la percepción de los elementos que componen el ambiente, se obtienen los siguientes resultados: valor mínimo = 2, valor máximo = 5, Promedio = 4.333, desviación estándar = 0.895.

La muestra y la media poblacional se consideran 12 y 3 respectivamente, igual que en el caso anterior.

Utilizando la información anterior, se procede a calcular t :

$$t = \frac{4.333 - 3.0}{\frac{0.895}{\sqrt{12}}} = 5.156$$

Para este caso, el valor calculado considerando 11 grados de libertad fue: $\alpha = 0.000157$
Esto significa que en el 99.98% de los casos, los estudiantes perciben el ambiente virtual con hápticos cercano a un ambiente real. Lo cual descarta la hipótesis nula h_0 .

De esta forma, quedan comprobadas las hipótesis planteadas al inicio de este trabajo de investigación.

A continuación, en el siguiente capítulo, se muestran las conclusiones finales de éste trabajo.

Capítulo 8.

Conclusiones y trabajo futuro

8 Conclusiones y trabajo futuro

De acuerdo con este trabajo de investigación se considera que los laboratorios virtuales para aprendizaje representan una alternativa muy importante para que los estudiantes puedan adquirir diversas competencias útiles en su formación académica. En el ámbito de la medicina, pueden facilitar la solución de los problemas en el entrenamiento médico que han planteado las reformas legales que prohíben practicar con animales, a menos que se proporcionen las mismas condiciones de quirófano que a los seres humanos, lo cual encarece significativamente los costos de capacitación y entrenamiento.

La incorporación de dispositivos hápticos a los laboratorios virtuales incrementa de manera importante la capacidad de promover en los alumnos un aprendizaje significativo, así como la adquisición de habilidades y competencias ya que a través de ellos, es posible enviar al usuario sensaciones táctiles parecidas a las reales, pero disminuyendo los costos y los riesgos inherentes de las labores a practicar, tanto del estudiante como del paciente. Además se facilita la posibilidad de homologar y repetir dichas prácticas o experiencias las veces que sea necesario.

El desarrollo de un laboratorio virtual con aplicación médica que posea la capacidad de usar el mismo hardware y software en diversos experimentos y con diversas variantes, representa una ventaja competitiva contra los que existen actualmente.

En el caso particular del entrenamiento de las tareas de sutura, las aplicaciones comerciales existentes, están enfocadas principalmente a la modalidad de laparoscopia, dejando a un lado los casos más simples pero también más comunes de sutura.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se pueden destacar los siguientes aportes de éste trabajo de investigación:

Simulación de piel humana usando PhysX. En la mayoría de los trabajos elaborados por diversos autores, se ha simulado la piel humana empleando el principio de mallas elásticas. En dichas aplicaciones, se han desarrollado sistemas que son simulados inclusive utilizando el GPU, pero todos ellos han realizado sus propias simulaciones “a la medida”. Sin embargo, esto representa una gran complejidad para simular los cortes, movimientos y desplazamientos que ocurren en la piel humana requiriendo una gran cantidad de recursos computacionales. En el caso de esta investigación, se hizo uso de la parte de modelación de telas de librería PhysX que está probada en el ámbito de los juegos para simular la piel humana, con el fin de disminuir la posibilidad de errores o fallas de la programación. Además, esto permitió aprovechar los recursos del GPU. En el ambiente gráfico se agregó la textura y color correspondiente a una piel real, además de enfatizar el área del corte, para mejorar la apariencia del ambiente virtual.

Detección de colisiones. Como se comentó, el problema de detección de colisiones en superficies deformables es complejo. En este trabajo se desarrolló un método propio para la detección de colisiones por medio de rayos que se envían en diferentes direcciones (ray-casting), combinado con la facilidad que presenta PhysX para el control de dichos rayos. Lo anterior permitió simplificar el proceso y optimizar el procesamiento computacional de esta tarea.

Generación de Haptic Rendering para superficies deformables. De acuerdo a lo descrito en la sección 3.1.3, generar haptic rendering en superficies deformables es complejo y presenta importantes retos. En este trabajo se desarrolló como aportación el método simplificado que permite generar esta respuesta háptica, se diseñó el proceso de cálculo de fuerza y comportamiento del mismo para diferentes circunstancias y se realizaron pruebas con usuarios humanos. Los resultados de las pruebas demostraron que la

sensación percibida por el usuario es cercana a la real. El método se empleó con éxito para generar la respuesta háptica en el simulador de sutura desarrollado como caso de estudio de esta investigación.

Simulación del hilo. Un componente importante en el trabajo de sutura es la simulación del hilo empleado, En este trabajo se desarrolló una simulación para un hilo genérico. Se identificaron trabajos anteriores en los que se simula el comportamiento de un hilo. Sin embargo, no se encontró ningún caso en el cual se insertara un hilo con capacidad de anudarse empleando PhysX. Este trabajo utilizó como base algunas investigaciones previas en la simulación del hilo (Brown et al., 2004) y a partir de éstas se desarrolló un hilo propio en el ambiente virtual, con una propuesta de comportamiento y detección de colisiones propia. Además, se logró la realización y detección de un nudo de tipo quirúrgico realizado de acuerdo a los procedimientos indicados por un asesor médico. Se logró simular su comportamiento de forma gráfica y hacerlo convivir con la simulación física de la piel.

Integración del ambiente, hasta el desarrollo de este trabajo, no se lograron identificar trabajos previos que presentaran la integración de todos los componentes necesarios para sutura, con respuesta háptica en un solo ambiente. Existen desarrollos que realizan las operaciones de sutura, pero sin respuesta háptica o que emplean un solo dispositivo.

Los resultados obtenidos permitieron elaborar un ambiente virtual de entrenamiento médico para tareas de sutura, a partir de simular la piel como una tela dentro del ambiente de PhysX, dado que en las pruebas preliminares los usuarios consideraron que la percepción táctil es cercana a la real, por lo que se realizaron las adecuaciones necesarias para que esta sensación corresponda a la piel humana.

De acuerdo a lo manifestado por los usuarios que realizaron pruebas en el sistema integrado, el instrumental médico utilizado, presentó un comportamiento cercano al real en apariencia y movilidad.

El sistema en general presentó un comportamiento estable y respondió sin problemas en el equipo de prueba, la interacción entre el hilo generado por métodos geométricos y la piel generada por métodos físicos, funcionó de forma correcta.

8.1 Trabajo futuro

Considerando que los desarrollos de investigación localizados indican como trabajo a futuro realizar simulaciones más aproximadas a la realidad, se puede destacar que algunas de las mejoras que pueden realizarse al sistema actual son: implementar manejo de colisiones y retroalimentación háptica entre el instrumental médico y con los diversos elementos que incluye el ambiente, es decir, el instrumental entre sí, en instrumental y los campos, la mesa, etc., aunque en para esto puede ser necesario el uso de dispositivos retroalimentados en los seis grados de libertad.

También puede considerarse el utilizar algún dispositivo de visión en 3D, ya que una observación muy marcada derivada de las pruebas fue la dificultad para ubicarse en el espacio. Existen diversos tipos de dispositivos de visión 3D que pueden ayudar a suplir esta deficiencia.

Dentro de las principales acciones que pueden emprenderse como continuación de este trabajo de investigación, se pueden mencionar:

Realización de pruebas con estudiantes de medicina: No obstante que en diferentes etapas del desarrollo de este trabajo se ha contado con la asesoría de varios médicos, por falta de tiempo ya no fue posible realizar las pruebas con los estudiantes de medicina. En este momento, el sistema está listo para comenzar a ser utilizado en etapa de pruebas con personas que cuenten con capacitación en el área de medicina.

Utilización de dispositivos hápticos de bajo costo: Si bien los dispositivos utilizados en esta investigación presentan un costo que no es muy alto (aproximadamente \$2500 USD), su precio no permite la creación de laboratorios a gran escala, por lo que desarrollar o modificar dispositivos de bajo costo, puede permitir a futuro que este tipo de aplicaciones sea accesible a mayor número de instituciones con la posibilidad de crear laboratorios con varios dispositivos.

Modificación de los dispositivos hápticos actuales: De acuerdo a las observaciones de los usuarios, la diferencia que existe al sujetar una plumilla en lugar de una pinza, representa una dificultad adicional en el momento de realizar la operación propuesta en nuestro simulador, por lo que se puede considerar como un trabajo futuro de realizar, el reemplazar

la plumilla por una pinza real, ya sea porta-aguja o de disección. Esto implica la modificación y adaptación del dispositivo háptico actual.

Adición de un tutor inteligente: El sistema desarrollado no incluye ningún mecanismo de evaluación o guía para el usuario. Solo el entrenamiento de las tareas de sutura en el ambiente virtual. El generar un tutor inteligente permitirá al usuario mejorar su desempeño, también dicho tutor puede programarse para modificar e incrementar el grado de dificultad de la operación y guiar al aprendiz para que realice las tareas de forma adecuada.

Cabe mencionar que en México hay pocos desarrollos de aplicaciones que involucran dispositivos hápticos, mientras que a nivel mundial existe mucha investigación y desarrollo al respecto. Por esta razón, al incursionar en ésta área se pueden generar muchas oportunidades de investigación, desarrollo y patentes, de manera primordial en el ámbito de auto-equipamiento

Finalmente, este proyecto de investigación puede servir como base para el desarrollo de diversas líneas de investigación relacionadas con el uso de hápticos en ambientes virtuales para el aprendizaje. Dado que a lo largo de ésta investigación fue necesario explorar áreas que originalmente no se tenían contempladas y que significaron un esfuerzo adicional. Las áreas de oportunidad que se generan a partir de este desarrollo comprenden tanto hardware como software. Por lo que se considera que ésta tesis permitirá abrir el camino para la realización de ambientes virtuales de diversos tipos que involucren dispositivos hápticos cuya aplicación puede ser académica, comercial e industrial.



**Publicaciones derivadas de esta
investigación**

9 Publicaciones derivadas de esta investigación

Ricardez, E. Noguez, J. & Muñoz-Gómez, L. (2011). Haptic Devices on Medical training applications, a brief review. *Research in Computing Science*, Vol. 53 (Advances in Computer Science and Applications), Pags. 35-45, CIC-IPN, México.

Ricárdez-Vázquez, E., Noguez-Monroy, J. J., Muñoz-Gómez, L., & Alencastre-Miranda, M.. Simulador de sutura utilizando dispositivos hápticos. Simposio Mexicano en Cirugia Asistida por Computadora y Procesamiento de Imágenes Médicas MEXCAS. México. Nacional. 2011

Referencias

10 Referencias

- Adamovich, S., Qiu, Q., Talati, B., Fluet, G., & Merians, A. (2008). Design of a virtual reality-based system for hand and arm rehabilitation. In *Rehabilitation Robotics, 2007. ICORR 2007. IEEE 10th International Conference on* (pp. 958–963). IEEE. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4428539
- Altomonte, M., Zerbato, D., Botturi, D., & Fiorini, P. (2008). Simulation of deformable environment with haptic feedback on GPU. *Intelligent Robots and Systems*, 3959–3964. doi:10.1109/IROS.2008.4650837
- Anttilla, T. (1998). *A Haptic rendering system for virtual handheld electronic products*. (L. P. OY, Ed.). ESPOO.
- Barbagli, F., & Salisbury, K. (2003). The effect of sensor/actuator asymmetries in haptic interfaces. *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2003, 1*. doi:10.1109/HAPTIC.2003.1191201
- Basdogan, C., De, S., Kim, J., Muniyandi, M., Kim, H., & Srinivasan, M. (2004). Haptics in minimally invasive surgical simulation and training. *Computer Graphics and Applications, IEEE, 24*(2), 56–64. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1274062
- Basdogan, C., & Srinivasan, M. A. (2002). Haptic rendering in virtual environments. *Handbook of virtual environments*, 117–134. Retrieved from http://home.engineering.iastate.edu/~alex/classes/575X_Spring_06/readings/Haptics/Haptic_Rendering_VRbookChapter.pdf
- Bello, F. (2006). Haptics for surgical training. In *Robotic Surgery: The Kindest Cut of All, 2006. The Institution of Engineering and Technology Seminar on (Ref. No. 2006/11372)* (pp. 49–72). IET. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1644403
- Bergamasco, M., Allotta, B., Bosio, L., Ferretti, L., Parrini, G., Prisco, G. M., ... Anna, S. S. (1994). An Arm Exoskeleton System for Teleoperation and Virtual Environments Applications. In *Robotics and Automation, IEEE International Conference on* (pp. 1449–1454).
- Berkley, J., Turkiyyah, G., Berg, D., Ganter, M., & Weghorst, S. (2004). Real-time finite element modeling for surgery simulation: an application to virtual suturing. *IEEE transactions on visualization and computer graphics, 10*(3), 314–25. doi:10.1109/TVCG.2004.1272730

Referencias

- Bonev, I. (2012). Delta Parallel Robot - the Story of Success. *ParalleMic, The Parallel Mechanisms Information Center*. Retrieved November 13, 2012, from www.parallemic.org/Reviews/Review002p.html
- Brown, J. (2004). *Real-time soft tissue and suture simulation*. Stanford University Stanford, CA, USA. Retrieved from <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=997459>
- Brown, J., Latombe, J., & Montgomery, K. (2004). Real-time knot-tying simulation. *The Visual Computer*, (1). Retrieved from <http://www.springerlink.com/index/2KF57QANC169YM4Q.pdf>
- Choi, K.-S., Chan, S.-H., & Pang, W.-M. (2012). Virtual suturing simulation based on commodity physics engine for medical learning. *Journal of medical systems*, 36(3), 1781–93. doi:10.1007/s10916-010-9638-1
- Coles, T. R., Meglan, D., & John, N. W. (2011). The Role of Haptics in Medical Training Simulators : A Survey of the State of the Art. *IEEE Transactions on Haptics*, 4(1), 51–66.
- Conti, F., Barbagli, F., Morris, D., & Sewell, C. (2005). CHAI An Open-Source Library for the Rapid Development of Haptic Scenes. In *World Haptics Conference (WHC'05)*. Retrieved from <http://www.citeulike.org/group/5490/article/2865262>
- Courtecuisse, H., Jung, H., Allard, J., Duriez, C., Lee, D. Y., & Cotin, S. (2010). GPU-based real-time soft tissue deformation with cutting and haptic feedback. *Progress in biophysics and molecular biology*, 103(2-3), 159–68. doi:10.1016/j.pbiomolbio.2010.09.016
- Hayward, V., Astley, O. R., Cruz-hernandez, M., Grant, D., & Robles-De-La-Torre, G. (2004). Tutorial Haptic interfaces and devices. *Sensor Review*, 24(1), 16–29. doi:10.1108/02602280410515770
- Hibbard, W., Dyer, C., & Paul, B. (1994). A lattice model for data display. In *Proceedings Visualization '94* (pp. 310–317). IEEE Comput. Soc. Press. doi:10.1109/VISUAL.1994.346304
- Ho, C.-H., & Basdogan, C. (1997). A ray-based haptic rendering technique for displaying shape and texture of 3D objects in virtual environments. *ASME Winter Annual Meeting*, 61, 77–84. Retrieved from http://www.rle.mit.edu/touchlab/publications/1997_001.pdf
- Kan, P., Hoey, J., & Mihailidis, A. (2008). Automated upper extremity rehabilitation for stroke patients using a partially observable Markov decision process. *AAAI 2008 Fall Symposium on AI in Eldercare*. Retrieved from <http://www.aaai.org/Papers/Symposia/Fall/2008/FS-08-02/FS08-02-009.pdf>

-
- Kılıç, V., Koçak, U., Konukseven, E. İ., & Mumcuoğlu, E. (2006). GPU supported haptic device integrated dental simulation environment. In *Eurohaptics 2006* (Vol. i). Paris. Retrieved from <http://isc.univ-evry.fr/~eurohaptics/upload/cd/papers/f68.pdf>
- Kyoto Kagasu CO., L. (2009). Kyoto Kagasu CO. LTD. Retrieved November 23, 2009, from www.kyotokagaku.com
- Lian, L. L., & Chen, Y. H. (2006). Haptic Surgical Simulation : An Application to Virtual Suture. *Computer-Aided Design*, 3, 203–210.
- Maciel, A., Halic, T., Lu, Z., Nedel, L. P., & De, S. (2009). Using the PhysX engine for physics-based virtual surgery with force feedback. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, (April), 341–353. doi:10.1002/rcs
- Marshall, P., Payandeh, S., & Dill, J. (2005). Suturing for surface meshes. *Proceedings of 2005 IEEE Conference on Control Applications, 2005. CCA 2005.*, 31–36. doi:10.1109/CCA.2005.1507096
- Massie, T. H. (1993). *Design of a Three Degree of Freedom Force-Reflecting Haptic Interface*. Massachusetts Institute of Technology.
- Merians, A. S., Fluet, G. G., Qiu, Q., & Adamovich, S. V. (2009). Robotically Facilitated Training of the Hemiparetic Upper Extremity as an Integrated Functional Unit in Virtual Environments. *October*, 185–188.
- Miyazaki, K., Yoshimoto, Y., Sakaguchi, M., Sano, A., & Fujimoto, H. (2006). Development of Suture Simulator That Can Express 3D Deformation of Wounds and Those Vicinities. In IEEE (Ed.), *ICARCV*.
- NVidia. (2012). PhysX. Retrieved June 29, 2012, from <http://www.geforce.com/hardware/technology/physx>
- Pizarro, A. C. (2012). *MATERIALES DE SUTURA , INSTRUMENTAL Y NUDOS* (p. 77).
- Q., V. D. L. R., Lammertse, P., Frederiksen, E., & Ruiter, B. (2001). The HapticMaster , a new high-performance haptic interface. *Industrial Robor: An International Journal*, 30(6), 515–525.
- Robles-De-La-Torre, G. (2006). The International Society for Haptics. *What is haptics?* Retrieved February 25, 2010, from <http://www.isfh.org/haptics.html>
- Ronald E. Walpole, Raymond H. Myers, S. L. M. (1999). *Probabilidad y estadística para ingenieros*. (P. Education, Ed.).
-

Referencias

- Salisbury, K., Conti, F., & Barbagli, F. (2004). Haptic rendering: introductory concepts. *IEEE computer graphics and applications*, 24(2), 24–32. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15387225>
- Sensible. (2012). Sensible Technology. Retrieved October 16, 2012, from <http://www.sensible.com/industries-application-development.htm>
- Shi, F., & Payandeh, S. (2008). On suturing simulation with haptic feedback. *Haptics: Perception, Devices and Scenarios*, 599–608. Retrieved from <http://www.springerlink.com/index/2126514177822127.pdf>
- Shi, H.F. (2008). *Fundamentals of suturing simulation in surgical training environment*. ir.lib.sfu.ca. SIMON FRASER UNIVERSITY. Retrieved from <http://ir.lib.sfu.ca/handle/1892/10568>
- Shi, Hans Fuhan, & Payandeh, S. (2009). Suturing simulation in surgical training environment. *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 422–423. doi:10.1109/IROS.2009.5354595
- Steve, M., & Hillier, N. (2009). Characterisation of the Novint Falcon Haptic Device for Application as a Robot Manipulator. In *Australasian Conference on Robotics and Automation*.
- Thomas, G., Johnson, L., Dow, S., & Stanford, C. (2001). The design and testing of a force feedback dental simulator. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 64, 53 – 64.
- Wang, P., Becker, A. A., Jones, I. A., Glover, A. T., Benford, S. D., Greenhalgh, C. M., & Vloeberghs, M. (2007). Virtual reality simulation of surgery with haptic feedback based on the boundary element method, 85, 331–339. doi:10.1016/j.compstruc.2006.11.021
- Webster, R. W., Zimmerman, D. I., Mohler, B. J., Melkonian, M. G., & Haluck, R. S. (2001). A prototype haptic suturing simulator. *Studies in health technology and informatics*, 81, 567–9. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11317811>
- Zhang, Z., Li, X., Wang, L., & Ma, P. (2008). GPU-based collision detection between deformable objects. *5th International Conference on Visual Information Engineering VIE 2008*, 560–565. doi:10.1049/cp:20080377
- Zilles, C. B., & Salisbury, J. K. (1995). A constraint-based god-object method for haptic display. In *Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots* (Vol. 3, pp. 146–151). IEEE Comput. Soc. Press. doi:10.1109/IROS.1995.525876

Anexos

11 Anexos

11.1 Requerimientos del sistema

Los requerimientos necesarios para ejecutar este sistema son:

Procesador con al menos cuatro núcleos, 2.4Ghz

Memoria RAM 6 GB.

Tarjeta aceleradora gráfica nVidia con soporte para CUDA y PhysX

Dos dispositivos hápticos con 6 grados de libertad, al menos tres retroalimentados.

Sistema Operativo Windows 7 profesional 64 bits.

El sistema deberá contar con:

- NET Framework 4.0
- SDK de nVidia con soporte para PhysX, versión 2.84
- Drivers actualizados de Phantom Omni configurados para dos dispositivos

El equipo que se sugiere es el siguiente:

WorkStation Dell T7500:

Procesador Intel Xeon E5620 @ 2.4 GHz, (8 núcleos), 12 GB RAM

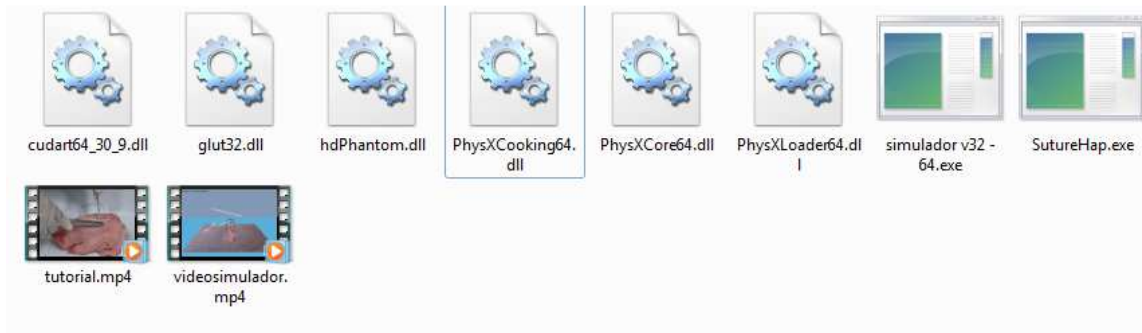
Tarjeta de video nVidia GeForce 9800 GX2 4 GB RAM

Sistema Operativo Windows 7 profesional 64bits (6.1, compilación 7601)

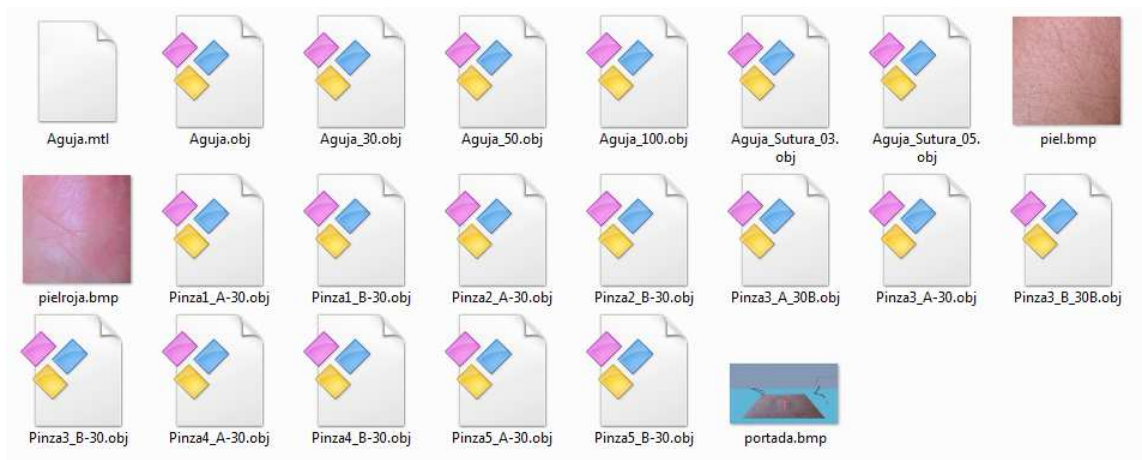
11.2 Instructivo de Instalación de SutureHap

El CD que se entrega para instalación, contiene los archivos ejecutables del simulador SutureHap organizados de la siguiente manera:

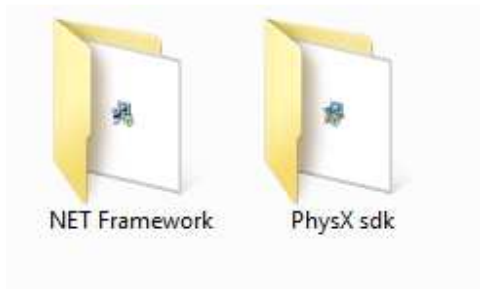
Carpeta Sistema: Aquí se encuentran los programas ejecutables y las librerías auxiliares del sistema.



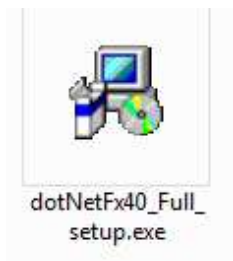
Carpeta Pinzas: Aquí están los modelos del instrumental médico y gráficos auxiliares de SutureHap.



Carpeta Utilerías: En esta carpeta se encuentran los requerimientos necesarios para la correcta ejecución del programa, se incluye: Archivos de instalación de NetFramework 4.0 y SDK de PhysX v. 2.84.

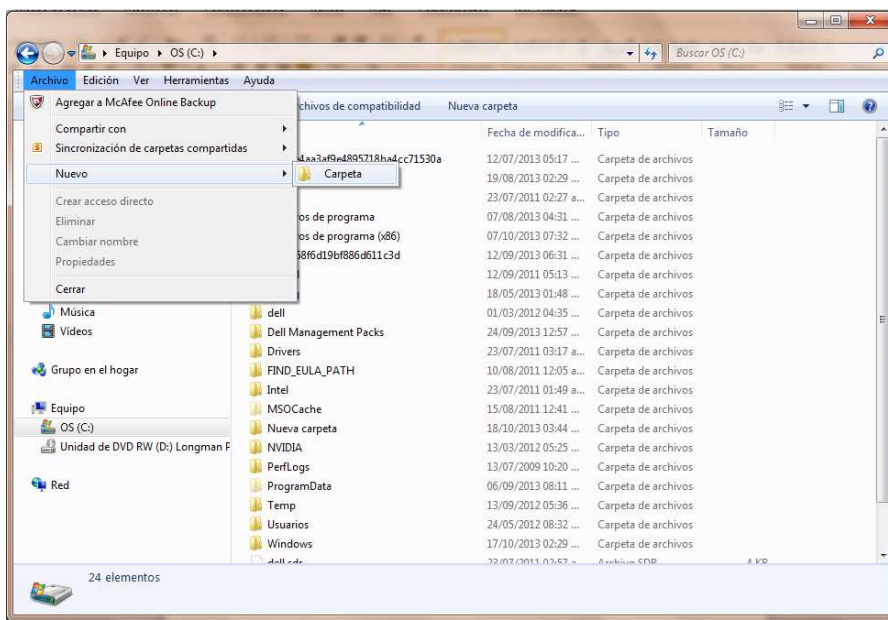


Antes de instalar SutureHap, es necesario instalar el NetFramework, para lo cual, hay que ejecutar el archivo dotNetFx40_full_Setup.exe, que se encuentra en la carpeta \utilerias\NET Framework.

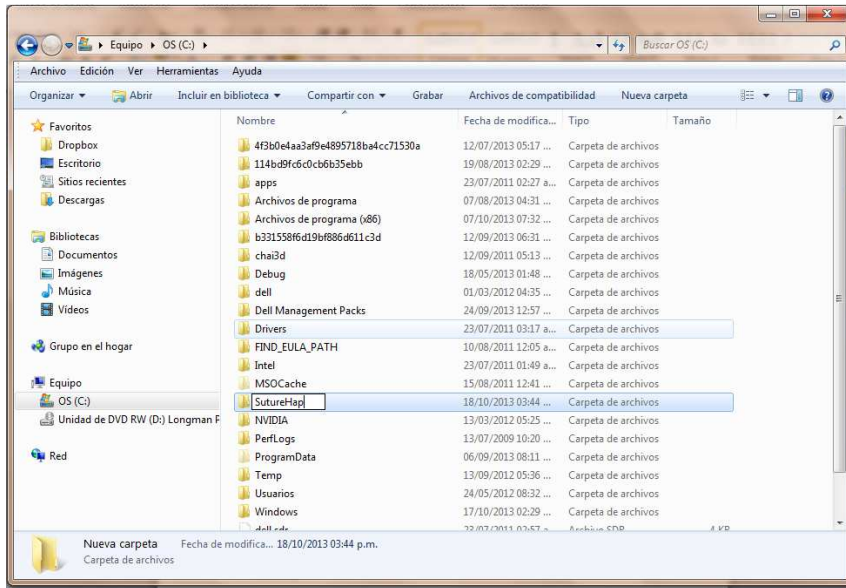


Una vez instalado el NET Framework, se sugiere lo siguiente para instar sutureHap:

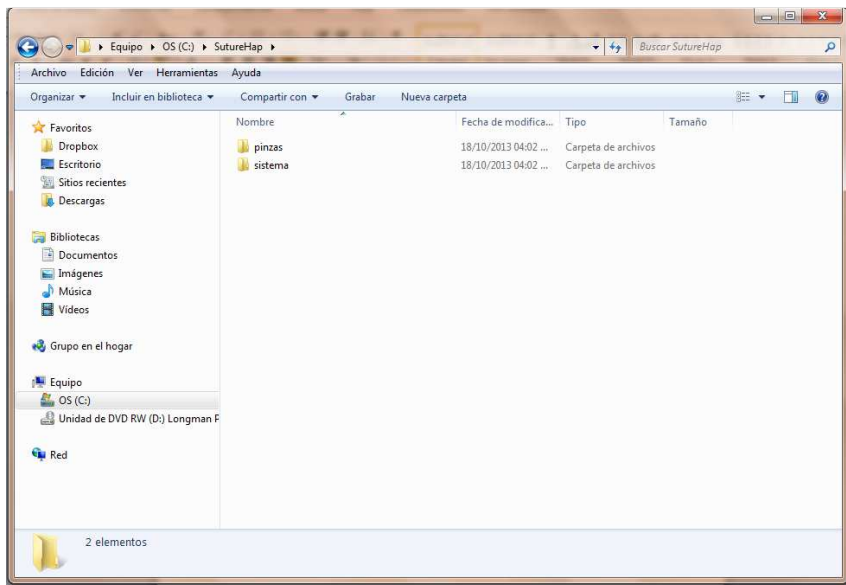
Crear una carpeta a nivel raíz y renombrarla con SutureHap



Anexos - Instructivo de Instalación de SutureHap

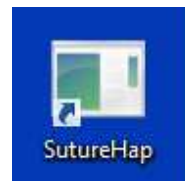


En esa carpeta copiar del CD de instalación las carpetas Sistema y Pinzas



Finalmente cree un acceso directo en el escritorio para el ejecutable SutureHap que se encuentra en la carpeta sistema.

Ejecute SutureHap desde el acceso directo.



11.3 Clases principales del sistema

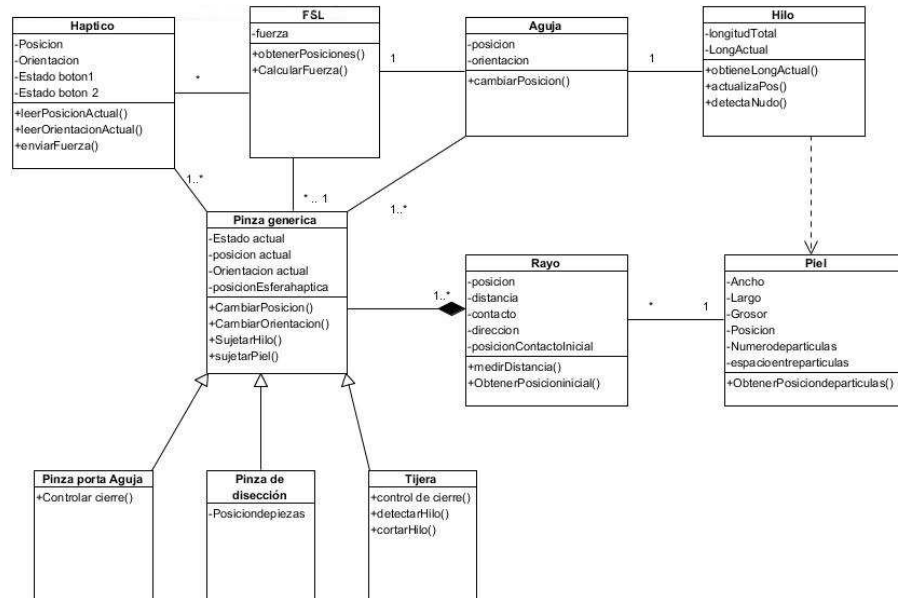


Figura 11.1 Clases principales del simulador

En la Figura 11.1 se muestra el diagrama de las clases principales que utiliza SutureHap, las cuales se describen a continuación:

Clase Haptico: Es la responsable de interactuar con los dispositivos hápticos, a través de ella se leen las posiciones actuales del dispositivo, el estado de los botones, la orientación y también a través de ella se envían los vectores de fuerza hacia el dispositivo.

Clase FSL: Esta es la clase que se encarga de compensar las diferencias en las frecuencias de actualización de los diversos componentes del sistema, interactúa con los dispositivos, la simulación física y la parte gráfica del programa.

Clase aguja: Mantiene el control de posición y orientación de la aguja dentro del simulador.

Clase Pinza genérica: Esta clase se encarga de manejar el comportamiento de las pinzas en general, como se puede observar, de ella heredan las clases para los tipos específicos de pinza. Dentro de los métodos principales se encuentra sujetar hilo, que es una funcionalidad común a los diversos tipos de pinza. Mientras que cada una presenta un comportamiento diferente de cierre.

Clase Rayo: Esta clase es la responsable de controlar los rayos que se utilizan para detectar las colisiones y calcular la fuerza de retroalimentación que se enviará al dispositivo háptico, de acuerdo con el método mostrado en la sección 5.2.2, entre los principales atributos que contiene esta clase se puede citar a *información*, que es un atributo de la clase InfoColTela en este atributo se tiene la información de la distancia a la que se encuentra el centro del avatar háptico del centro de la piel, si se encuentra en contacto, la información del mismo, es decir, si el contacto está iniciando, se encuentra en contacto o existió un contacto previo, la posición del contacto, la normal del contacto, el número del vértice mas cercano y la posición del mismo.

Clase hilo: Esta clase controla el comportamiento completo del hilo, integra las rutinas de detección de colisiones consigo mismo y con elementos externos, se pueden destacar dentro de los métodos de dicha clase FTL1Clusters y FTL2Clusters, los cuales corresponden al método expuesto por (Brown et al., 2004), mientras que el método *evaluaColisionS* realiza la verificación de colisiones mediante el método mostrado en la sección 5.3. Dentro de ella existen varias clases auxiliares, las cuales se describen en la sección siguiente.

Clase piel: Esta clase es la que rige la creación y comportamiento de la piel, que como se mencionó anteriormente, se representa dentro del ambiente de PhysX como si se tratara de una tela, la base de esta clase proviene del ejemplo proporcionado por PhysX, sin embargo, dicha clase fue modificada para que su funcionamiento fuera el adecuado para representar piel.

A continuación, se hará la descripción de las clases que apoyan a la clase hilo, cuyo diagrama de clases de muestra en la Figura 11.2.

Clase Actor: esta clase es tomada de PhysX y contiene la unidad de construcción básica del hilo, se trata de una esfera con un radio predeterminado que existe dentro del ambiente virtual, pero que su comportamiento no es regido por el motor de PhysX. El movimiento y demás acciones serán controladas principalmente por el algoritmo FTL y la detección y solución de colisiones por los métodos descritos en la sección 5.3.

Clase Segmento: Este es el eslabón básico que forma el hilo, cada segmento está formado por dos actores unidos entre sí por un cilindro. La detección de colisiones se hace entre

segmentos o entre segmentos del hilo y objetos ajenos al mismo. Cada segmento tiene un radio y una longitud predeterminados, la longitud puede variar ligeramente al solucionar una colisión, sin embargo, prácticamente permanece constante, ya que el algoritmo FTL corrige en cada iteración cualquier variación de longitud.

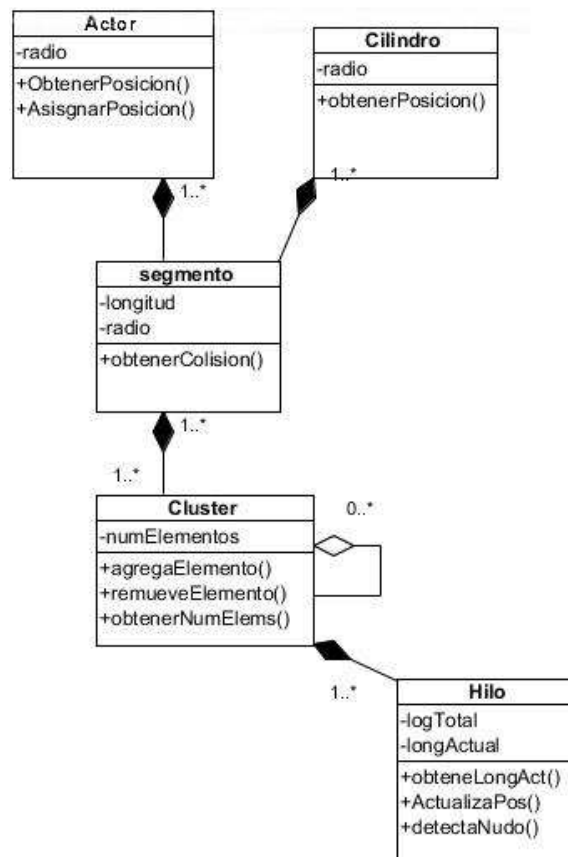


Figura 11.2 Diagrama de clases auxiliares de la clase hilo

Clase cilindro: Esta es una clase que mantiene las posiciones y orientaciones de los cilindros que unen a los actores que forman un segmento, su función principal es ayudar a la detección de colisiones.

Clase Cluster: Esta clase es auxiliar de la clase hilo y permite la generación de “clusters” o bloques dentro del mismo, los cuales son útiles para generar nudos y poder moverlos como parte del hilo, sin afectar el movimiento del resto que no forma parte de un nudo.

11.4 Detalle de las pruebas cuantitativas

A continuación se muestran algunas de las gráficas obtenidas durante la realización de las pruebas cuantitativas de la sección 7.1.1.

Las pruebas realizadas comprenden:

- i) Para perforación
 - a) Diferentes grosores de la tela (thickness)
 - b) Diferentes radios de esfera
 - c) Con o sin la gravedad
 - d) Ambas direcciones de perforación
 - e) Mismas pruebas considerando diferentes dispositivos de control para la esfera de exploración.
- ii) Para deslizamiento
 - a) Diferentes diámetros de la esfera
 - b) Diferentes factores de distancia límite
 - c) Pruebas con diferentes dispositivos de control.

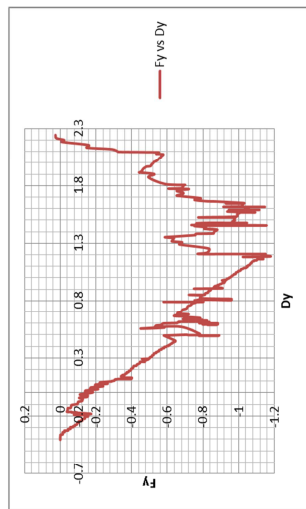
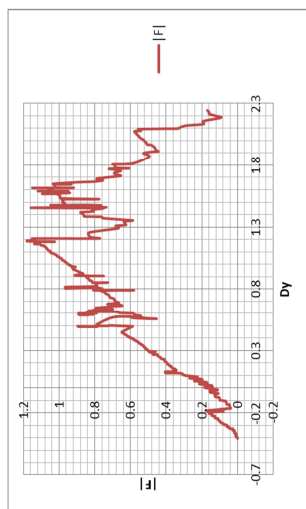
Las condiciones de cada prueba se muestran al pie de la gráfica correspondiente.

Los dispositivos usados para controlar la esfera de exploración son:

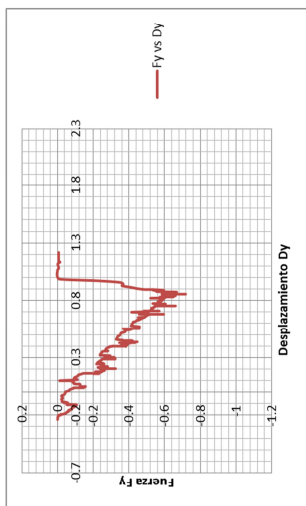
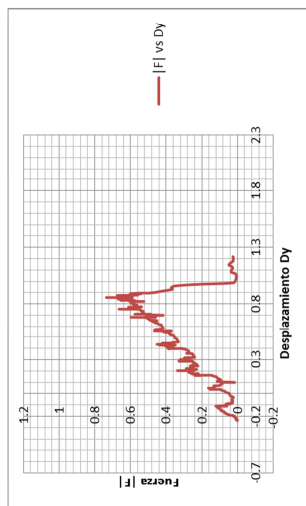
- a) El dispositivo háptico Phantom Omni
- b) El dispositivo háptico virtual
- c) El propio programa controlando la esfera de exploración

Para hacer las diversas pruebas solo se cambió el parámetro que interesaba explorar, mientras el resto permaneció constante.

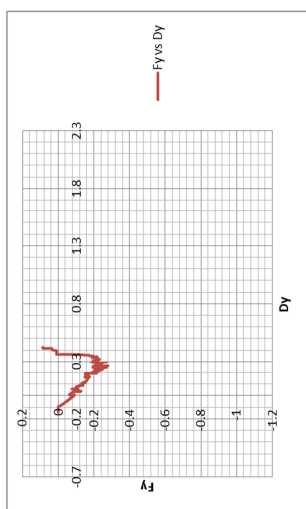
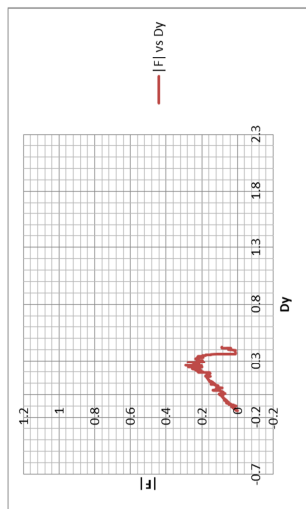
Perforación: diferentes grosores de tela y radios de esfera



radio esfera = 0.05
 tela = 10 x 10
Thickness = 0.8
 Tear Factor = 5.0
 Phantom Omni
 Dell WS7500 GeForce 9800
 Sin gravedad
 k = 0.5
 desplazamiento de -y a + y

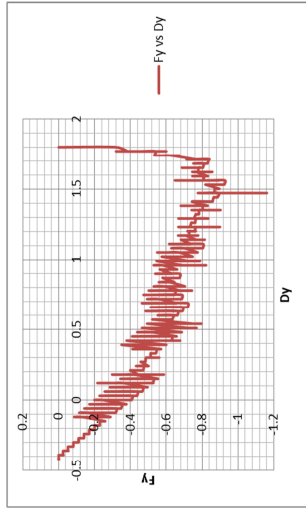
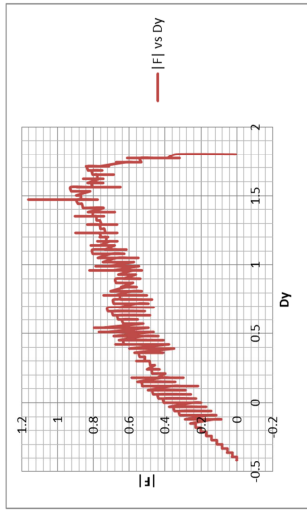


radio esfera = 0.05
 tela = 10 x 10
Thickness = 0.4
 Tear Factor = 5.0
 Phantom Omni
 Dell WS7500 GeForce 9800
 Sin gravedad
 k = 0.3
 desplazamiento de -y a + y

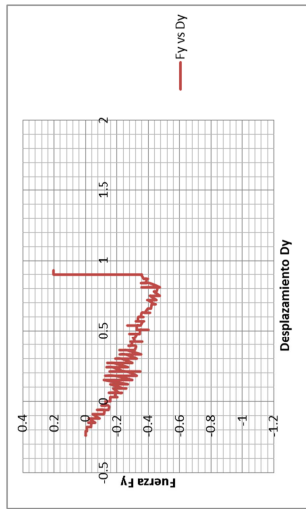
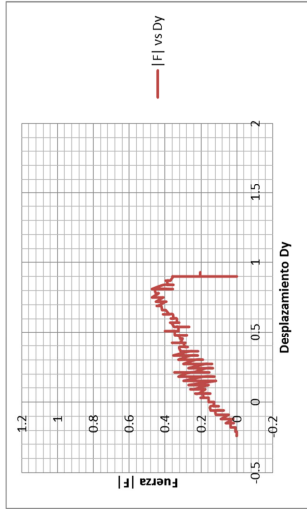


radio esfera = 0.05
 tela = 10 x 10
Thickness = 0.2
 Tear Factor = 5.0
 Phantom Omni
 Dell WS7500 GeForce 9800
 Sin gravedad
 k = 0.3
 desplazamiento de -y a + y

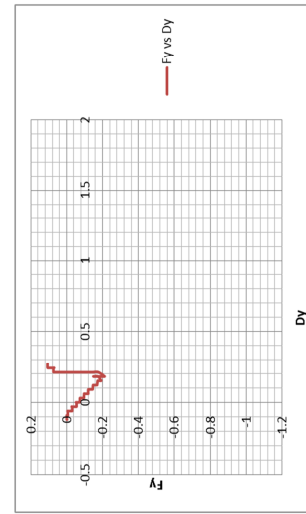
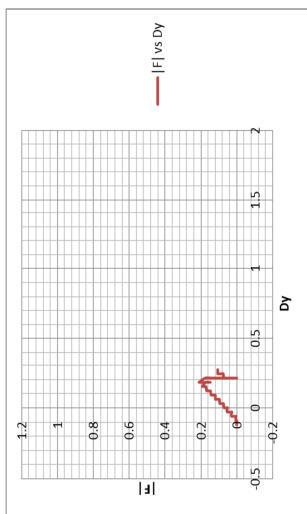
Perforación: diferentes grosores de tela y radios de esfera



radio esfera = 0.05
 tela = 10 x 10
Thickness = 0.2
 Tear Factor = 5.0
 Virtual device
 Dell WS7500 GeForce 9800
 Sin gravedad
 k = 0.3
 desplazamiento de -y a +y

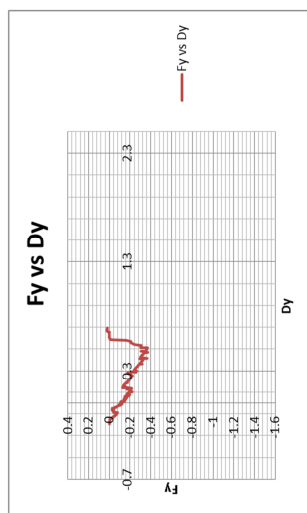
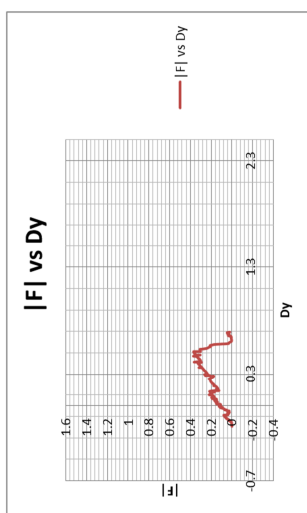


radio esfera = 0.05
 tela = 10 x 10
Thickness = 0.4
 Tear Factor = 5.0
 Virtual haptic device
 Dell WS7500
 Sin gravedad
 k = 0.3
 desplazamiento de -y a +y

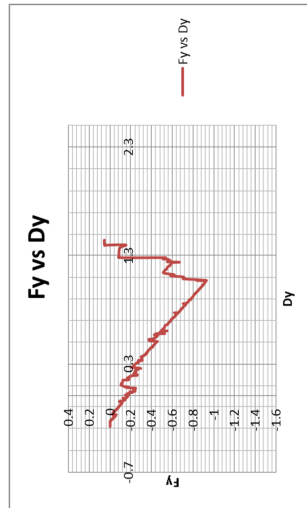
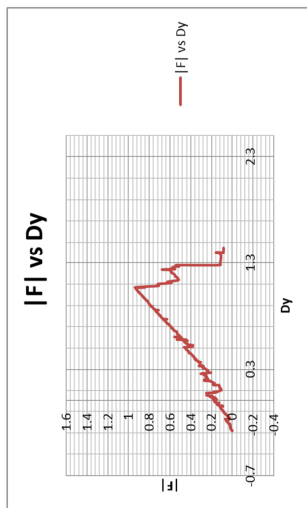


radio esfera = 0.05
 tela = 10 x 10
Thickness = 0.8
 Tear Factor = 5.0
 Phantom Omni
 Dell WS7500 GeForce 9800
 Sin gravedad
 k = 0.3
 desplazamiento de -y a +y

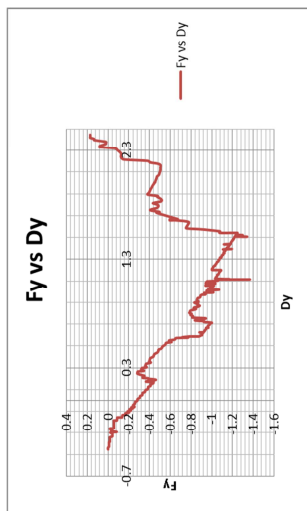
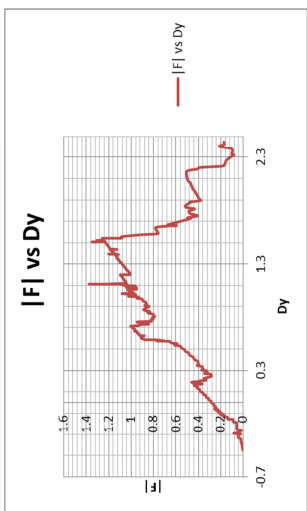
Perforación: diferentes grosores de tela y radios de esfera



radio esfera = 0.1
 tela = 10 x 10
Thickness = 0.2
 Tear Factor = 5.0
 Phantom Omni
 Dell WS7500 GeForce 9800
 Sin gravedad
 k = 0.3
 desplazamiento de -y a + y

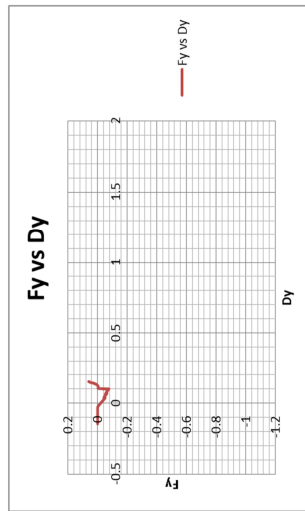
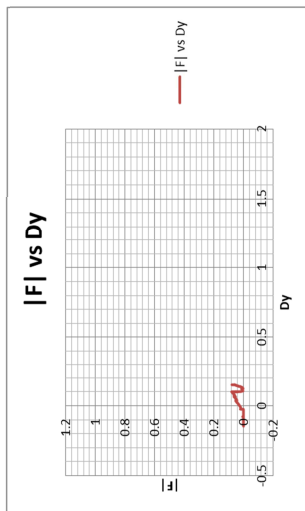


radio esfera = 0.1
 tela = 10 x 10
Thickness = 0.4
 Tear Factor = 5.0
 Phantom Omni
 Dell WS7500 GeForce 9800
 Sin gravedad
 k = 0.3
 desplazamiento de -y a + y

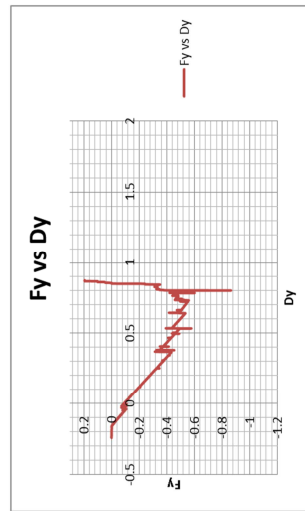
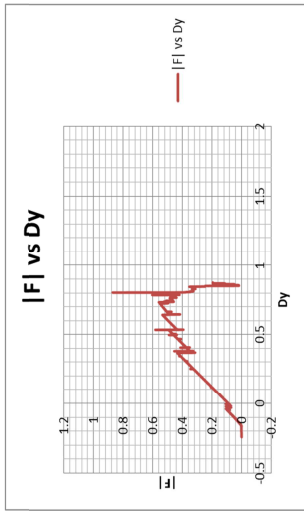


radio esfera = 0.1
 tela = 10 x 10
Thickness = 0.8
 Tear Factor = 5.0
 Phantom Omni
 Dell WS7500 GeForce 9800
 Sin gravedad
 k = 0.3
 desplazamiento de -y a + y

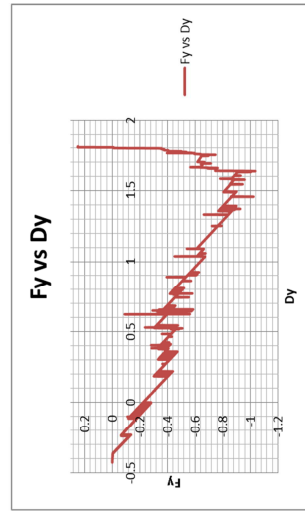
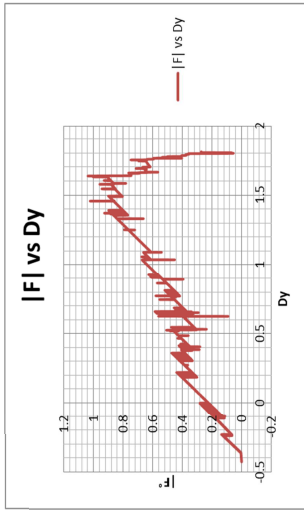
Perforación: diferentes grosores de tela y radios de esfera



radio esfera = 0.05
 tela = 10 x 10
 Thickness = 0.2
 Tear Factor = 5.0
 NO HAPTICO (ideal)
 Dell WS7500 GeForce 9800
 gravedad = 0
 k = 0.3
 desplazamiento de -y a +y

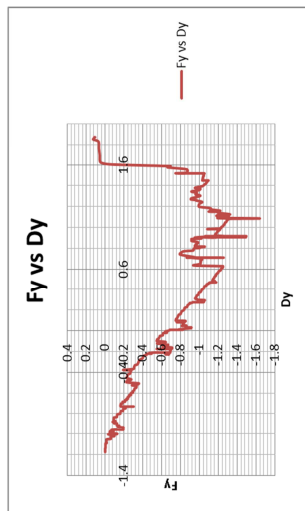
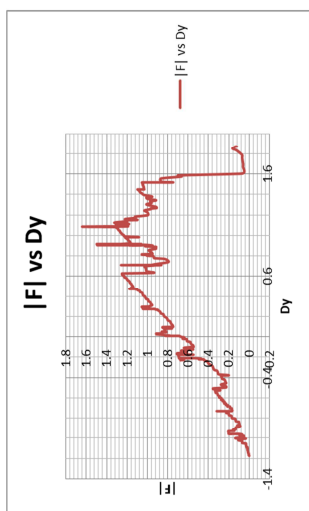


radio esfera = 0.05
 tela = 10 x 10
 Thickness = 0.4
 Tear Factor = 5.0
 NO HAPTICO (ideal)
 Dell WS7500 GeForce 9800
 gravedad = 0
 k = 0.3
 desplazamiento de -y a +y

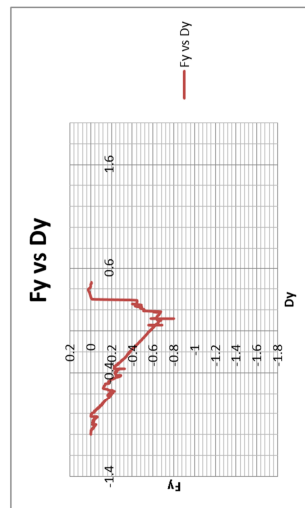
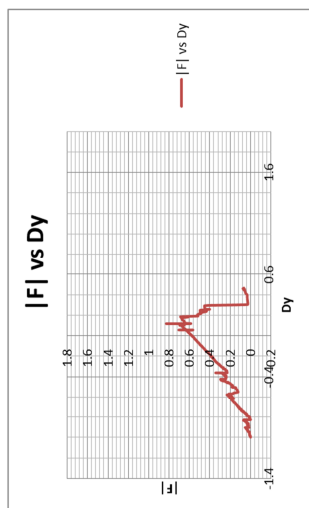


radio esfera = 0.05
 tela = 10 x 10
 Thickness = 0.8
 Tear Factor = 5.0
 NO HAPTICO (ideal)
 Dell WS7500 GeForce 9800
 gravedad = 0
 k = 0.3
 desplazamiento de -y a +y

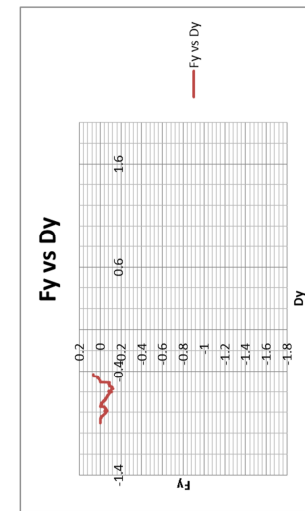
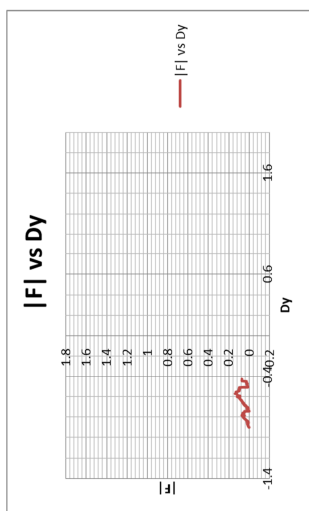
Perforación: diferentes grosores de tela y radios de esfera



radio esfera = 0.05
 tela = 10 x 10
 Thickness = 0.8
 Tear Factor = 5.0
 Phantom Omni
 Dell WS7500 GeForce 9800
 Gravedad = 9.8
 k = 0.3
 desplazamiento de -y a +y

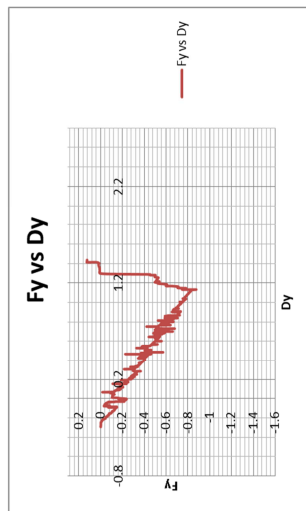
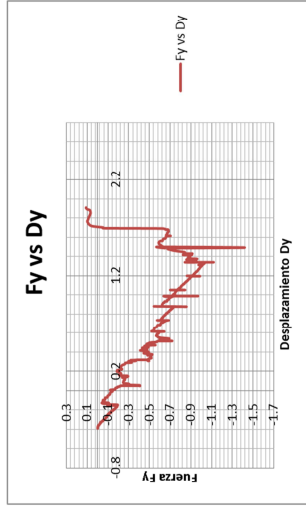
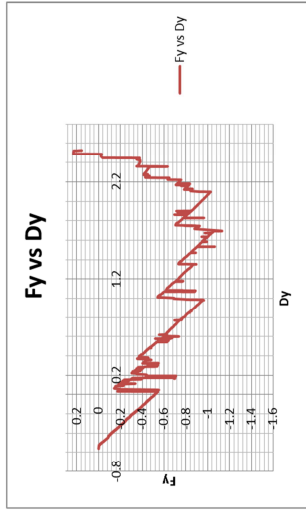
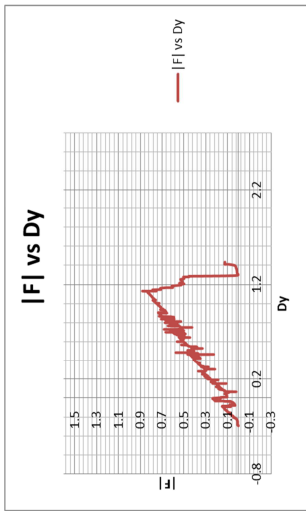
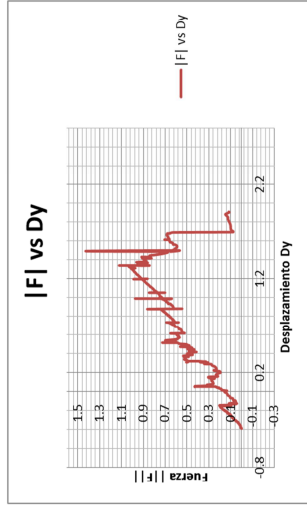
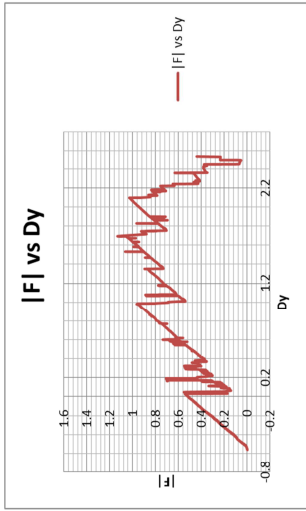


radio esfera = 0.05
 tela = 10 x 10
 Thickness = 0.4
 Tear Factor = 5.0
 Phantom Omni
 Dell WS7500 GeForce 9800
 Gravedad = 9.8
 k = 0.3
 desplazamiento de -y a +y



radio esfera = 0.05
 tela = 10 x 10
 Thickness = 0.2
 Tear Factor = 5.0
 Phantom Omni
 Dell WS7500 GeForce 9800
 Gravedad = 9.8
 k = 0.3
 desplazamiento de -y a +y

Perforación: diferentes grosores de tela y radios de esfera

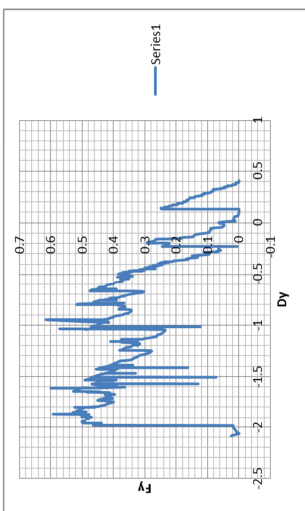
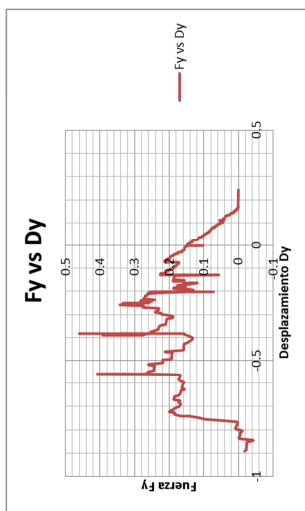
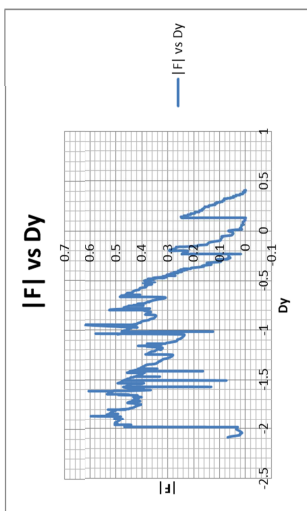
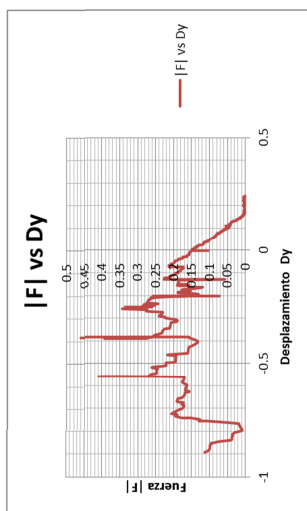


radio esfera = 0.2
 tela = 10 x 10
 Thickness = 0.8
 Tear Factor = 5.0
 Phantom Omni
 Dell WS7500 GeForce 9800
 Sin gravedad
 k = 0.3
 desplazamiento de -y a +y

radio esfera = 0.2
 tela = 10 x 10
 Thickness = 0.4
 Tear Factor = 5.0
 Phantom Omni
 Dell WS7500 GeForce 9800
 Sin gravedad
 k = 0.3
 desplazamiento de -y a +y

radio esfera = 0.2
 tela = 10 x 10
 Thickness = 0.2
 Tear Factor = 5.0
 Phantom Omni
 Dell WS7500 GeForce 9800
 Sin gravedad
 k = 0.3
 desplazamiento de -y a +y

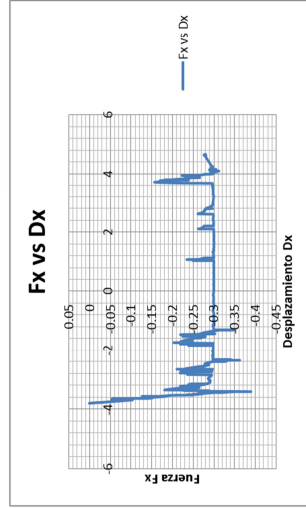
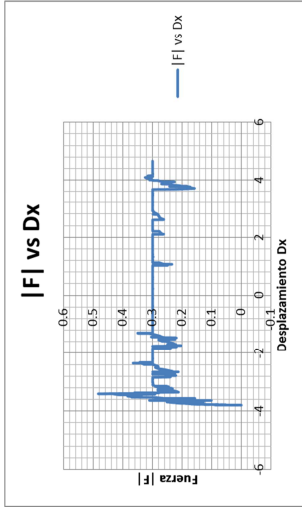
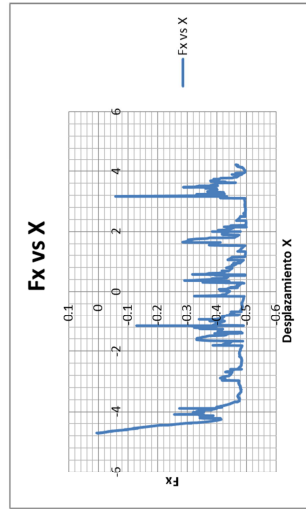
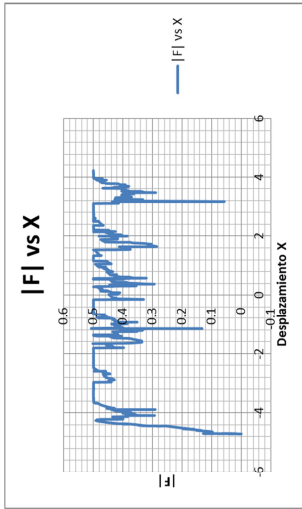
Perforación: diferentes grosores de tela y radios de esfera



radio esfera = 0.05
 tela = 10 x 10
 Thickness = 0.4
 Tear Factor = 5.0
 Phantom Omni
 Dell W57500 GeForce 9800
 Sin gravedad
 k = 0.3
 desplazamiento de +y a -y

radio esfera = 0.05
 tela = 10 x 10
Thickness = 0.8
 Tear Factor = 5.0
 Phantom Omni
 Dell W57500 GeForce 9800
 Sin gravedad
 k = 0.5
 desplazamiento de +y a -y

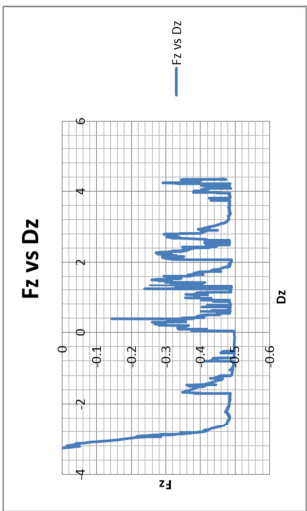
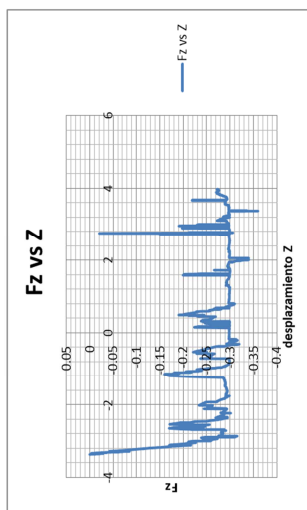
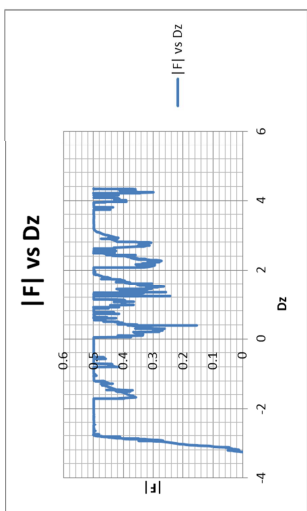
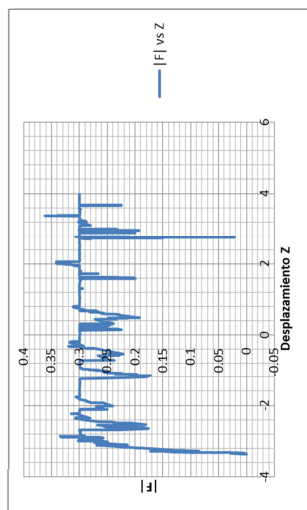
Desplazamiento: diferentes factores y radios de la esfera



radio esfera = 0.05
 tela = 10 x 10
 Thickness = 0.4
 Tear Factor = 5.0
 Phantom Omni
 Dell WS7500 GeForce 9800
 Sin gravedad
 k = 0.5
 desplazamiento de -x a +x

radio esfera = 0.05
 tela = 10 x 10
 Thickness = 0.4
 Tear Factor = 5.0
 Phantom Omni
 Dell WS7500 GeForce 9800 GX2
 Sin gravedad
 k = 0.3
 desplazamiento de -x a +x

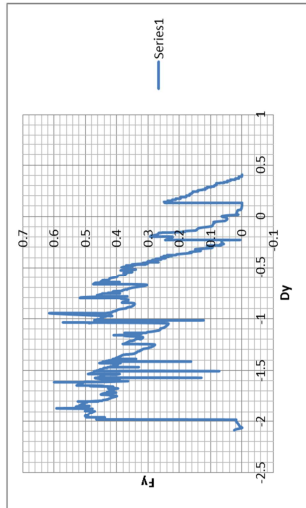
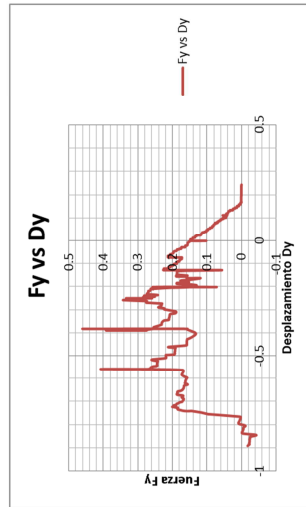
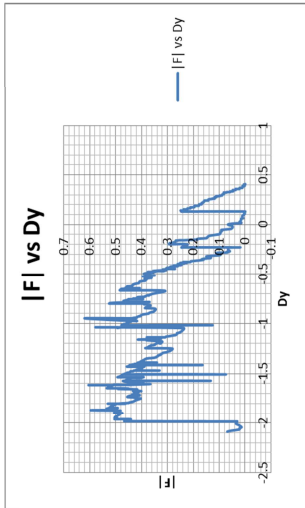
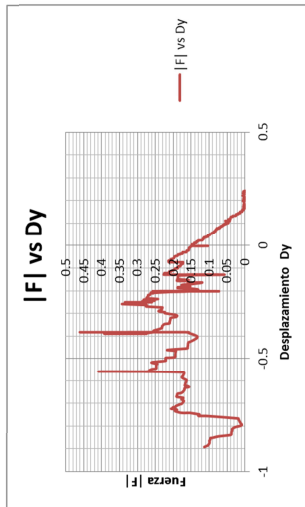
Desplazamiento: diferentes factores y radios de la esfera



radio esfera = 0.05
 tela = 10 x 10
 Thickness = 0.4
 Tear Factor = 5.0
 Phantom Omni
 Dell WS7500 GeForce 9800
 Sin gravedad
 k = 0.3
 desplazamiento de -z a +z

radio esfera = 0.05
 tela = 10 x 10
 Thickness = 0.4
 Tear Factor = 5.0
 Phantom Omni
 Dell WS7500 GeForce 9800
 Sin gravedad
 k = 0.5
 desplazamiento de -z a +z

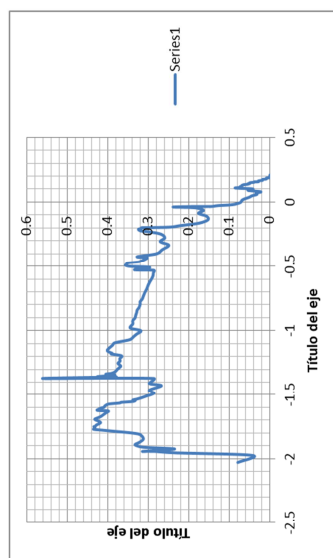
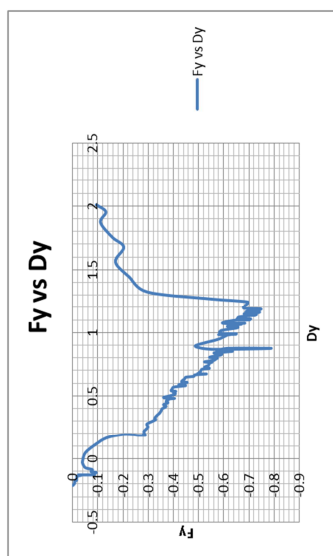
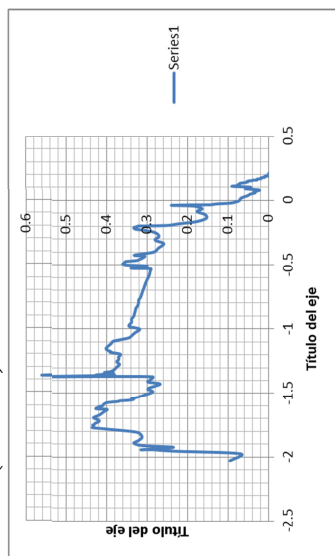
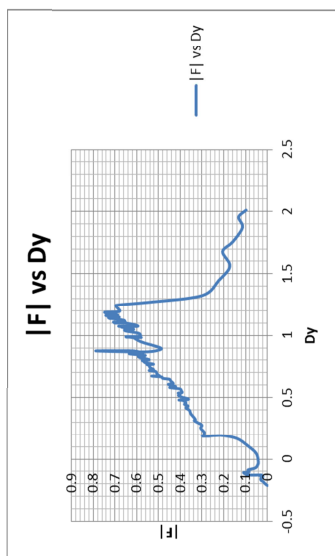
Desplazamiento: diferentes factores y radios de la esfera



radio esfera = 0.05
 tela = 10 x 10
 Thickness = 0.4
 Tear Factor = 5.0
 Phantom Omni
 Dell WS7500 GeForce 9800
 Sin gravedad
 k = 0.3
 desplazamiento de +y a -y

radio esfera = 0.05
 tela = 10 x 10
 Thickness = 0.8
 Tear Factor = 5.0
 Phantom Omni
 Dell WS7500 GeForce
 Sin gravedad
 k = 0.5
 desplazamiento de +y a

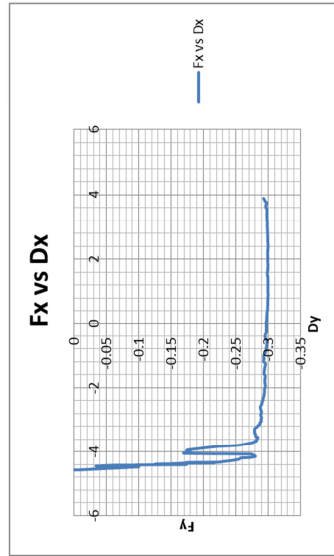
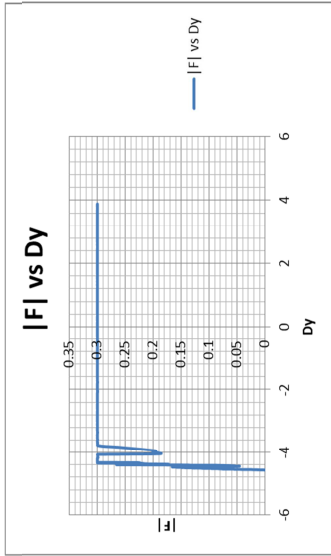
Perforación: alta densidad de partículas (10404)



radio esfera = 0.05
 tela = 10 x 10
 Thickness = 0.4
 Tear Factor = 5.0
 Phantom Omni
 Dell WS7500 GeForce 9800
 Sin gravedad
 k = 0.3
 desplazamiento de +y a -y

radio esfera = 0.05
 tela = 10 x 10
 Thickness = 0.8
 Tear Factor = 5.0
 Phantom Omni
 Dell WS7500 GeForce
 Sin gravedad
 k = 0.5
 desplazamiento de

Desplazamiento: Alta densidad de partículas (10404)



radio esfera = 0.05

tela = 10 x 10

Thickness = 0.4

Tear Factor = 5.0

Virtual device

Dell WS7500 GeForce 9800

sin gravedad

k = 0.3

desplazamiento de -x a +x

11.5 Cuestionario de percepción del simulador de tela

Este trabajo es parte de una tesis doctoral y sus respuestas serán usadas únicamente para fines de investigación.

Se le invita a colaborar en los siguientes ejercicios:

- A) Tome la plumilla y desplace la esfera háptica a la parte inferior al centro de la tela y con velocidad lo mas constante posible desplace la esfera hacia arriba, hasta lograr traspasarla. De ser necesario repita la operación tantas veces como lo requiera.
- B) Repita el ejercicio anterior traspasando de arriba hacia abajo.
- C) Coloque la esfera en el extremo izquierdo de la tela, lo mas al centro posible ejerza algo de presión sobre la tela de abajo hacia arriba y deslícese (por debajo) hasta el extremo derecho.
- D) Repita el ejercicio anterior deslizándose por encima de la tela
- E) Coloque la esfera en la parte trasera de la tela, lo mas al centro posible ejerza algo de presión sobre la tela de abajo hacia arriba y deslícese (por debajo) hasta el frente.
- F) Repita el ejercicio anterior deslizándose por encima de la tela

¿La sensación de fuerza que percibió al desplazar la esfera, corresponde a la que usted espera si está haciendo el experimento real?

Por favor califique de acuerdo a su percepción

- A) 1 2 3 4 5
- B) 1 2 3 4 5
- C) 1 2 3 4 5
- D) 1 2 3 4 5
- E) 1 2 3 4 5
- F) 1 2 3 4 5

- | |
|--------------------------|
| 1.-Totalmente de acuerdo |
| 2.- De acuerdo |
| 3.- Indiferente |
| 4.-En desacuerdo |

Considera que esta simulación corresponde a la interacción con una tela real.

SI **NO**

Sugerencias ó comentarios

11.6 Hoja Informativa del Participante

Tecnológico de Monterrey (ITESM),
Campus Ciudad de México (CCM)
Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Calle del Puente 222
Col. Ejidos de Huipulco Tlalpan,
C.P. 14380, México, D.F.

Tecnológico de Monterrey (ITESM),
Campus Santa Fe (CSF)
División de Ingeniería
Av. Carlos Lazo 1000
Col. Santa Fe
C.P. 01389, México, D. F.

FORMA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

Nombre del proyecto: SutureHap: Sistema virtual entrenamiento

Versión 1, 19 de septiembre de 2012

Investigadores: Eusebio Ricárdez, Dra. Julieta Noguez, Dra. Lourdes Muñoz, Dr. Luis Neri

Investigador de contacto en ITESM CCM: Eusebio Ricárdez, eusebior@ieee.org

Investigador de contacto en ITESM CSF: Lourdes Muñoz, lmunoz@itesm.mx

Esta investigación esta diseñada para medir la percepción de las sensaciones táctiles generadas a partir de objetos deformables presentados como imágenes en la pantalla de una computadora. En este caso particular, se trata de una tela virtual. La investigación se lleva a cabo entre personas que tienen alguna relación con el ITESM.

El objetivo final es crear un ambiente de entrenamiento que le permita a un estudiante de medicina realizar prácticas de sutura en un ambiente virtual, sin la necesidad de entrenar con animales, personas o cadáveres.

Si decides participar en nuestra investigación, tendrás que utilizar un dispositivo “háptico”, que al sujetarlo con tu mano, te enviará una respuesta de fuerza acorde a lo que esté ocurriendo en la pantalla.

La fuerza de respuesta está calibrada para no generar daño alguno, sin embargo, pueden ocurrir eventos que muevan la plumilla del dispositivo de forma fuerte y rápida.

Si se genera alguna situación que consideres incomoda o descontrolada, por favor notifica al investigador a cargo del experimento para que lo detenga.

1. Confirmando que he leído y entendido la información de la “Hoja Informativa del Participante” con fecha del 19 de septiembre del 2012, versión 1, para la investigación previamente descrita. Tuve oportunidad de hacer todas las preguntas necesarias acerca de los posibles riesgos y beneficios. La cuales han sido respondidas completamente.....
2. Entiendo que mi participación es voluntaria y soy libre de abandonar esta investigación en cualquier momento sin dar razón alguna y sin que mis derechos legales sean afectados.....
3. Entiendo que la información recolectada como parte de esta investigación, tal vez será revisada por personal responsable del ITESM o por autoridades regulatorias para las cuales son relevantes mis sensaciones táctiles al participar en esta investigación. Otorgo permiso a estas personas para acceder a mi información.....

Nombre: _____ Matrícula/Nómina: _____

Firma: _____ Fecha: _____

11.7 Manual usuario



**Instituto Tecnológico y de Estudios
Superiores de Monterrey
Campus Ciudad de México**

Escuela de Graduados en Ingeniería y Arquitectura

SutureHap

**“Un Ambiente virtual de entrenamiento médico
para enseñanza de sutura”**

Manual de usuario

Proyecto elaborado por:

M. en C. Eusebio Ricárdez Vázquez

Dra. Julieta Noguez Monroy

Dra. Lourdes Muñoz Gómez

México, D. F., septiembre 2013.

SutureHap

Manual de Usuario

SutureHap es un sistema desarrollado con la finalidad de entrenar a futuros médicos en las labores de sutura. El sistema está elaborado con la intención de eliminar el uso de animales, cadáveres o materiales desechables para la realización de estas prácticas.

Para el funcionamiento de este sistema es indispensable contar con dos dispositivos hápticos que cuenten con seis grados de libertad y al menos tres de ellos estén retroalimentados.

Los dispositivos soportados por SutureHap son Phantom Omni®, Phantom Premium®, Delta.X® y Omega.X®³¹

Para los fines de este manual, se utilizará como ejemplo el dispositivo Phantom Omni®, el cual se muestra en la Figura 11.3. La posición que en la que se encuentra en esta figura es la posición de inicio. Este dispositivo cuenta con dos botones en la plumilla, al botón oscuro se le asignara el número 1 y al botón claro el número 2, tal como se aprecia en la Figura 11.4.

³¹ Phantom Omni® y Phantom Premium® son marcas registradas de Geomagic (3D systems)
Delta.X® y Omega.X® Son marcas registradas de Force Dimension



Figura 11.3 Dispositivo Phantom Omni



Figura 11.4 Detalle de la plumilla del dispositivo Phantom Omni

Los dispositivos hápticos deben colocarse uno al lado del otro con una separación de 3 cm. entre sí, con la finalidad de facilitar al usuario el manejo de ambos, tal como se muestra en la Figura 11.5, el dispositivo 1 se sujetará con la mano izquierda y el dispositivo 2 con la derecha.



Figura 11.5 Colocación de los dispositivos hápticos

Al iniciar SutureHap, se mostrará la pantalla de bienvenida durante 10 segundos (Figura 11.6), si se desea saltar esta pantalla, mientras sea visible, hacer clic con el ratón sobre la imagen.

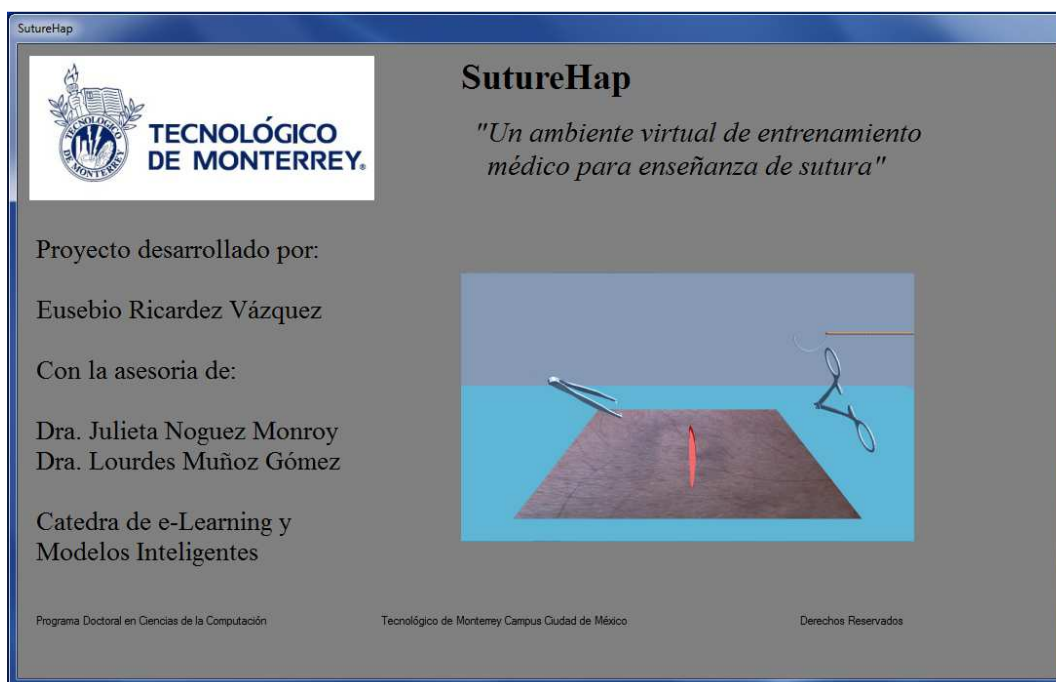


Figura 11.6 Pantalla de bienvenida

A continuación, se mostrará la pantalla principal del sistema (Figura 11.7) en esta se observan cuatro botones:

Simulador: Permite entrar al simulador de sutura.

Tutorial: Mostrará en el reproductor de video predeterminado el video demostrativo de una sutura real realizado en piel de cerdo.

Video del simulador: Mostrará en el reproductor de video predeterminado video demostrativo del simulador de sutura SutureHap.

Acerca de SutureHap: Mostrará los créditos del programa

Para salir del programa solo basta cerrar la ventana.



Figura 11.7 Pantalla principal de SutureHap

Simulador:

Al activar este botón por primera vez, se hará un recordatorio al usuario para que verifique que los dispositivos se coloquen en la posición de inicio. Esto permitirá que los dispositivos estén calibrados al iniciar la aplicación, si los dispositivos no se encuentran correctamente calibrados se tendrán problemas al intentar ubicar el instrumental en el simulador. La posición de inicio de los dispositivos es la que se muestra en la Figura 11.3.



Figura 11.8 Pantalla de aviso para calibración

Después de verificar la posición de nuestros dispositivos y aceptar el aviso, se observará en la pantalla principal el avance de una barra de tiempo, hasta que se muestra la pantalla de inicio del simulador.



Figura 11.9 Pantalla principal de SutureHap con barra de tiempo

Dependerá de la capacidad del equipo el tiempo que tarde en iniciar el simulador, cuando esto ocurra se mostrara la pantalla de bienvenida. (Figura 11.10)

Esta pantalla muestra la ayuda para el usuario, para entrar al ambiente de simulación, es necesario sujetar ambos dispositivos hápticos y levantarlos más allá de la mitad de su recorrido.

Cuando se levantan los dispositivos se dará inicio al simulador (Figura 11.11), el usuario observará: Un segmento plano de piel mostrando una cortadura en el centro, segmentos de color azul claro que simulan los campos de trabajo, la pinza de disección, la pinza porta aguja y una aguja curva con un segmento de hilo sujeto a la misma.

Para salir del programa, presionar la tecla ESC.

El ambiente muestra una vista en perspectiva con profundidad, por lo que el usuario deberá familiarizarse con la sensación de profundidad dentro del ambiente.

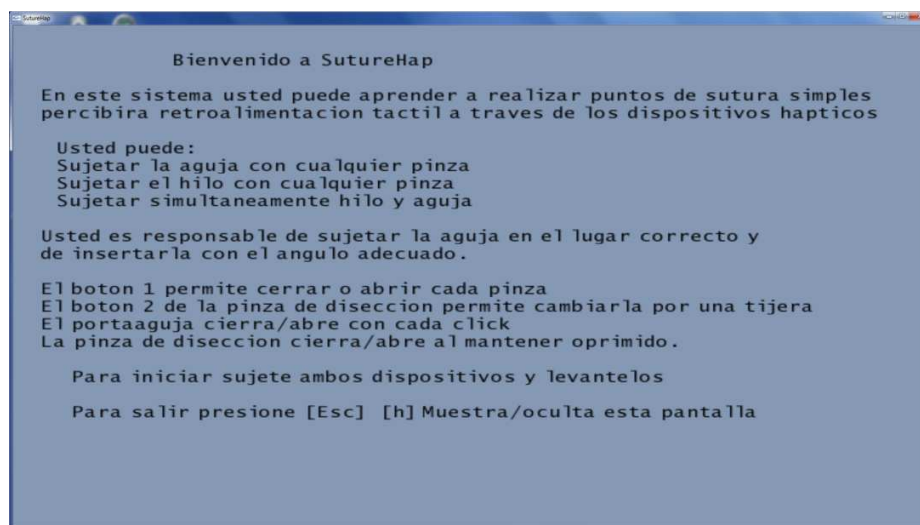


Figura 11.10 Bienvenida al simulador

Dentro del ambiente de sutura, el háptico de la mano izquierda controlará la pinza de disección y la tijera mientras que la mano derecha controlará la pinza porta aguja.

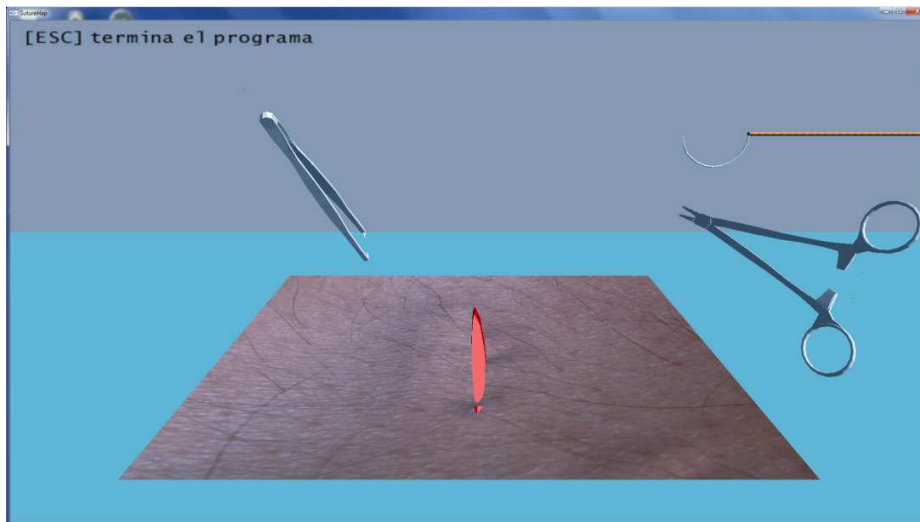


Figura 11.11 Ambiente de simulación de sutura

La posición de las pinzas dentro del simulador estará controlada de manera directa y proporcional al movimiento y posición de los dispositivos hápticos, los dispositivos permiten colocar la pinza en cualquier lugar dentro del ambiente y con cualquier ángulo de rotación.

El cierre de las pinzas está controlado por el botón 1 del dispositivo háptico, en cada pinza el comportamiento es diferente, tal como se describe a continuación:

Pinza porta-aguja: Al oprimir el botón 1, la pinza cerrará y permanecerá cerrada, para abrirla, es necesario presionar nuevamente el botón.

Pinza de disección: Al oprimir el botón 1, la pinza cerrará y permanecerá cerrada mientras el botón este presionado.

Cambio de Pinza a Tijera: El dispositivo 1 puede cambiar el tipo de instrumental de pinza de disección a tijera al presionar el botón 2. Mientras sea tijera, el botón 1 cerrará la tijera mientras este presionado. Para regresar a la pinza de disección, debe presionarse nuevamente el botón 2.

Aguja:

La aguja puede ser sujeta por cualquier pinza, en nueve puntos diferentes a lo largo de la misma, en cualquier ángulo y posición. Para sujetarla es necesario que el centro de la punta

de la pinza esté en contacto con la aguja. Con el fin de facilitar la sujeción, al acercar la pinza cerrada a la aguja, será posible sujetarla.

El usuario es el responsable de sujetar la aguja en el ángulo y posición correctos de acuerdo a la operación que desee realizar, el sistema no realiza ninguna corrección de ángulos o posición.

La Figura 11.12 muestra diversas posiciones y ángulos en las que es posible sujetar la aguja con el porta aguja. La pinza de disección también puede sujetarla en los mismos ángulos y posiciones.

La aguja puede ser sujeta solo por una pinza a la vez, si se intenta sujetar con ambas pinzas, solo la primera que la haya sujetado la conservará.

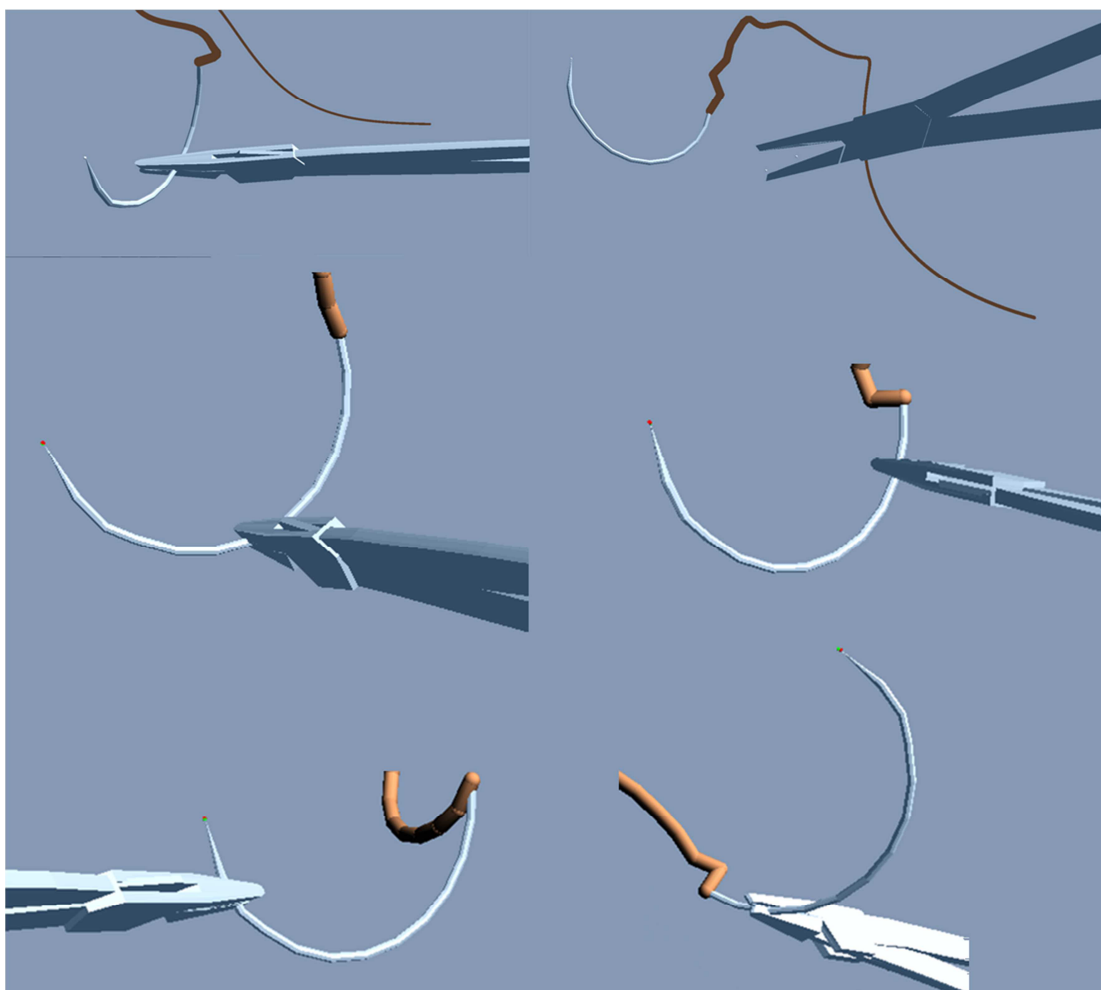


Figura 11.12 Porta aguja sujetando aguja

Hilo:

El hilo está siempre fijo a la aguja, puede ser sujetado con cualquiera de las pinzas y ambas pueden sujetarlo al mismo tiempo, no es afectado por la fuerza de gravedad. El hilo colisiona consigo mismo y con la pinza porta aguja, pero no con la de disección.

Es posible realizar nudos con el hilo y cuando la está activa la tijera, se podrá ser cortado por ésta.

Si el hilo es sujetado por ambas pinzas y se estira lo suficiente, enviará al dispositivo háptico la retroalimentación correspondiente a la distancia que se haya estirado. En la Figura 11.13 se muestra el hilo sujeto por ambas pinzas.

Es posible elaborar nudos con el hilo, En la Figura 11.14 se muestra el proceso de elaboración de un nudo, en donde el hilo es inicialmente enrollado sobre la pinza porta-aguja.

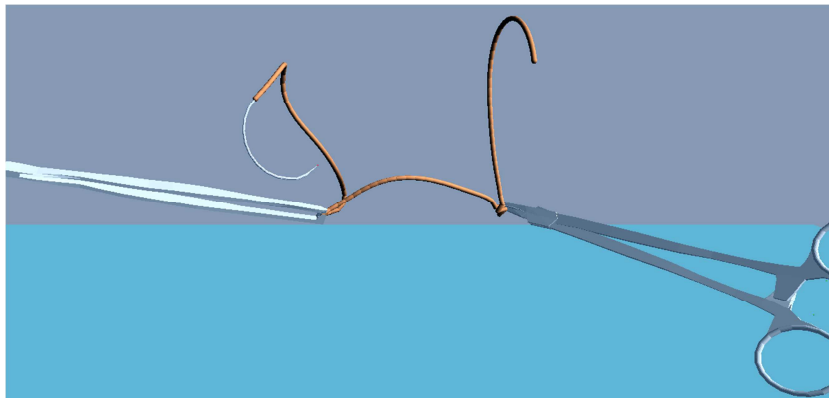


Figura 11.13 Hilo sujetado por ambas pinzas

Cuando el nudo se encuentra cercano a la piel, se fijará automáticamente a esta, forzando a que el usuario suelte el hilo e inicie la elaboración de otro nudo.

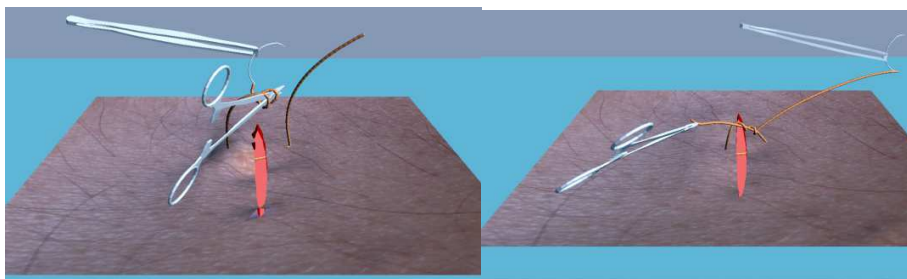


Figura 11.14 Elaboración de un nudo

Es posible la elaboración de un nudo sobre otro, tal como se muestra en la Figura 11.15.

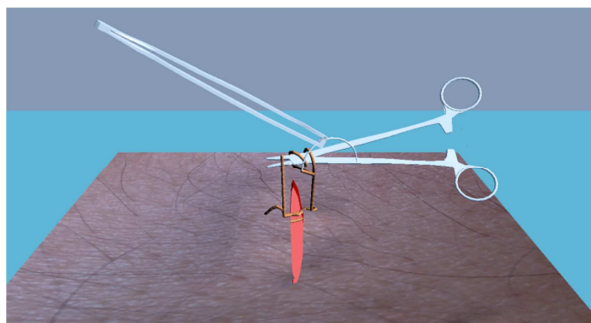


Figura 11.15 Elaboración de un segundo nudo.

Con el nudo elaborado, es posible cortar el hilo, para hacerlo, es necesario cambiar la pinza de disección a tijera. La tijera solo puede cortar el hilo que se encuentra del lado de la aguja y solo una línea del mismo, al realizar el corte, se formará un nuevo hilo de la misma longitud que el original y quedará ubicado en la posición original del hilo cuando inició el sistema.

En la Figura 11.16 se observa el momento del corte y posteriormente el nuevo hilo en su posición inicial. Con este nuevo hilo, es posible generar un nuevo punto de sutura.

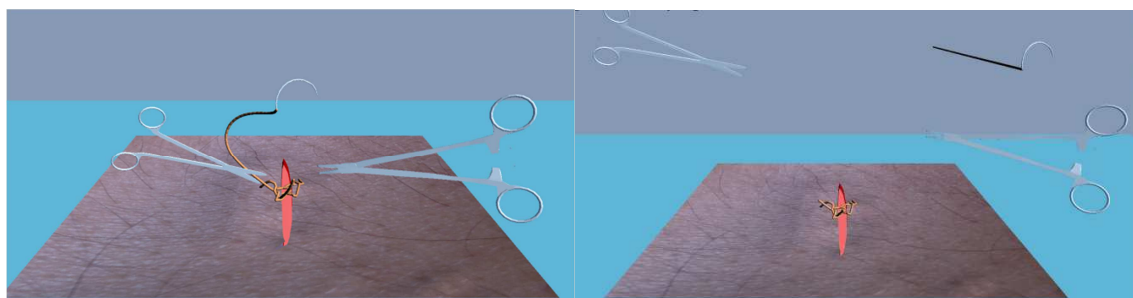


Figura 11.16 Hilo en el momento del corte y después del corte

Teclas de Control:

Dentro del ambiente de SutureHap, estan habilitadas las siguientes teclas de control:

Control de la Cámara:

w.- Acerca la cámara a la escena

Anexos – Manual de usuario

s.- Aleja la cámara de la escena

q.- Eleva la cámara

e.- Baja la cámara.

a.- Desplazamiento a la derecha

d.- Desplazamiento a la izquierda

Si se mueve el ratón y al mismo tiempo se presiona el botón izquierdo, se cambiará la orientación de la vista de la cámara.

Control del ambiente:

z.- Aumenta la fricción de la piel

Z.- Disminuye la fricción de la piel

c.- Aumenta el tamaño de la esfera háptica

C.- Disminuye el tamaño de la esfera háptica

g.- Activa/desactiva la gravedad (afecta solo a la piel)

b.- Hace más o menos rígida la piel.

Control del programa

n.- Muestra el modo de mallas (wireframe)

h.- Muestra la pantalla de ayuda

ESC.- Termina la ejecución del programa

Es importante notar que cuando se cambia la orientación o posición de la cámara, el marco de referencia de los dispositivos hápticos no cambia, por lo que pueden generarse apreciaciones incorrectas.

Tutorial

Al activar el botón del tutorial, se presentará al usuario en el reproductor de video predeterminado el video de realización de un punto de sutura elaborado sobre una piel de cerdo, con una explicación en audio del procedimiento. En la f se muestra una imagen del video en cuestión.

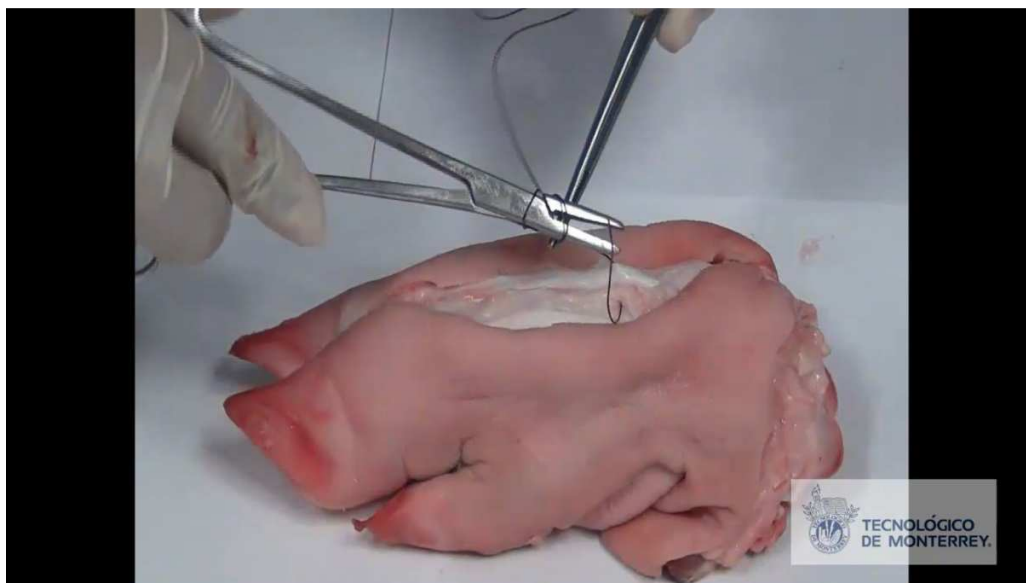


Figura 11.17 Tutorial de video

Video del simulador:

Al activar este botón, se mostrará en el reproductor predeterminado un video de la forma como se elabora la práctica dentro del ambiente del simulador, se muestra como realizar la sutura, elaborar tres nudos y realizar el corte del hilo. Al finalizar el video, se muestra como queda listo el hilo para iniciar un nuevo punto simple de sutura.

La Figura 11.18 muestra una imagen del simulador de sutura cuando se está realizando la operación.

Anexos – Manual de usuario

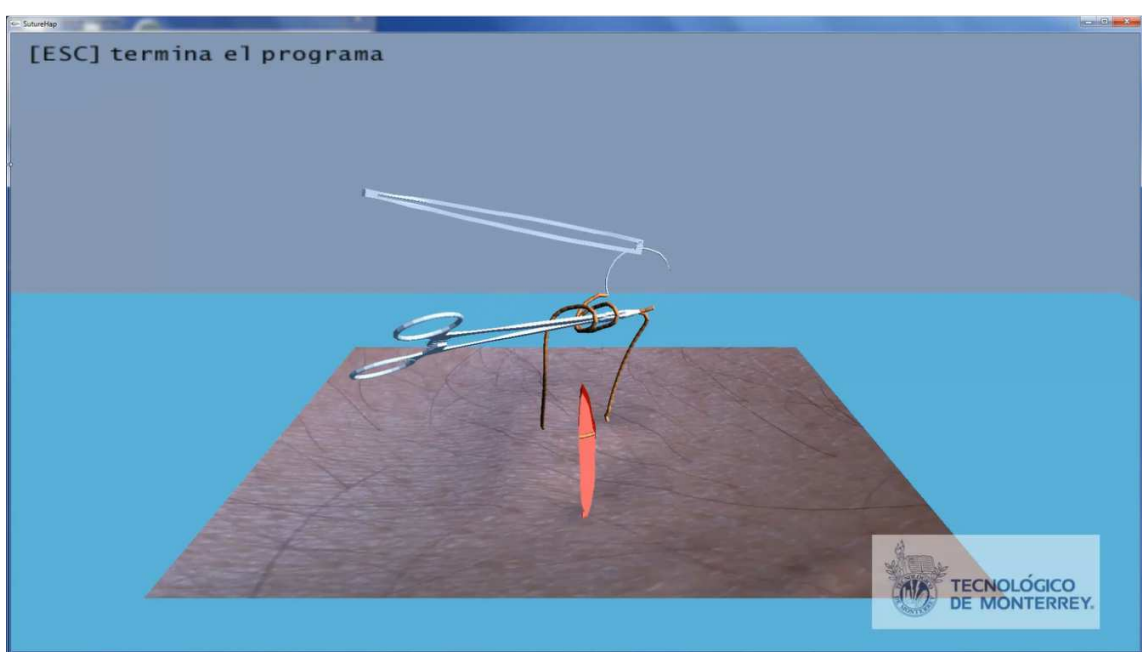


Figura 11.18 Video del simulador de sutura

Acerca de SutureHap

En esta sección, se muestra la pantalla que proporciona los agradecimientos e información acerca de la aplicación. (Figura 11.19)

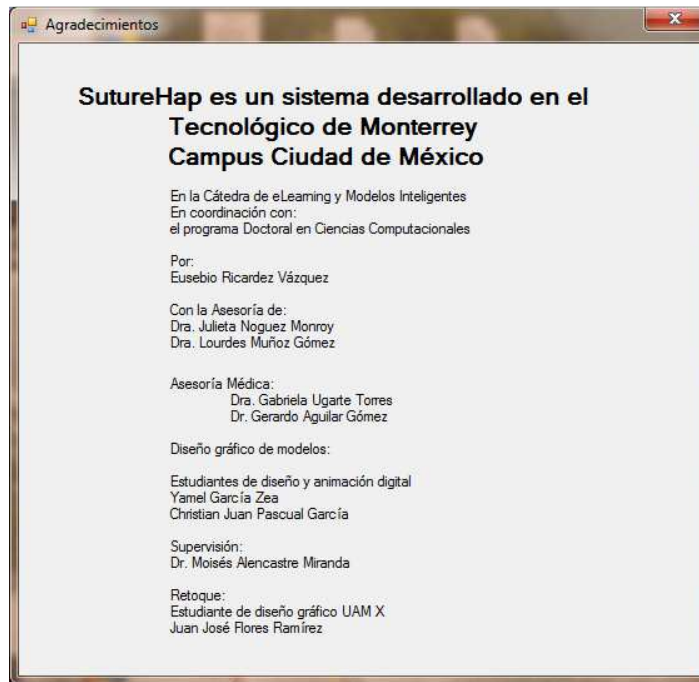


Figura 11.19 Agradecimientos

Este proyecto fue realizado gracias al apoyo de una beca de colegiatura para estudios de doctorado del Tecnológico de Monterrey Campus Ciudad de México y forma parte de una investigación doctoral.



