

Desarrollo de Aplicaciones de Realidad Virtual y Sistemas Hápticos en Ingeniería, Medicina y Arte

Hugo Medellín, Germánico González, Raquel Espinosa, Eder Govea y Theodore Lim

H. Medellín, G. González, R. Espinosa, E. Govea y T. Lim.

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Álvaro Obregón 64, Centro Histórico, 78000 San Luis Potosí

Unidad Académica M. Zona Media.

Escuela de Ciencias de la Comunicación

Heriot-Watt University, Riccarton, EH14 4AS, Edinburgh, Scotland, United Kingdom

hugoivanmc@uaslp.mx

M. Ramos., V. Aguilera., (eds.) .Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Handbook -©ECORFAN- Valle de Santiago, Guanajuato, 2014.

Abstract

The technological growth in the last years have conducted to the development of virtual reality (VR) systems able immerse the user into a three-dimensional (3D) virtual environment o virtual world, where the user can interact in real time with virtual objects. This interaction is mainly based on visualizing the virtual environment and objects. However, with the recent beginning of haptic systems the interaction with the virtual world has been extended to also feel, touch and manipulate virtual objects. Virtual reality has been successfully used in the development of applications in different scientific areas ranging from basic science, social science, education and entertainment.

The research activities regarding the virtual reality and haptic systems technologies carried out by the authors in the last years in collaboration with national and international research groups are presented in this paper. These research activities have conducted to the development of applications for the simulation and analysis in the areas of engineering, medicine and art. In the area of engineering, a system for the planning, evaluation and training of assembly and manufacturing tasks has been developed. On the other hand, in the area of medicine a surgical simulator for planning and training orthognathic surgeries has been developed. Finally, in the area of art an interactive cinema system for blind people has been also developed. The development of these applications and the results obtained from these developments are presented and discussed in this paper.

7 Introducción

El incremento en las tecnologías computacionales en las últimas cuatro décadas, ha permitido el desarrollo de sistemas modernos de graficación en los cuales se pueden representar ambientes virtuales muy cercanos a la realidad.

La mayoría de los sistemas computacionales modernos consideran al sentido de la vista como el sentido más importante. Sin embargo, los otros sentidos juegan también un papel importante cuando se trata de desarrollar sistemas virtuales lo más cercanos a la realidad, e incluso pueden llegar a ser más importantes que la vista. En la mayoría de las aplicaciones, la combinación de los distintos sentidos produce la sensación de una completa realidad.

De esta manera, la representación de ambientes reales requiere la generación de información y señales para todos los sentidos, no solo el de la vista (Ramesh, 2000). Actualmente los sistemas computacionales cuentan con representación del sonido. Recientemente con el surgimiento de los sistemas hápticos (Brooks *et al.* 1990) ahora también es posible tocar y sentir objetos en ambientes virtuales. Actualmente existen trabajos de investigación enfocados al desarrollo de sistemas computacionales con capacidad de oler y probar. En un futuro se espera que en los sistemas computacionales se pueda interactuar con los cinco sentidos: vista, oído, tacto, gusto y olfato.

Los ambientes virtuales generados por computadora, en donde el usuario tiene un alto nivel de inmersión e interacción, están siendo estudiados en la actualidad para agilizar y optimizar los procesos de producción, diseño, planeación, análisis y entrenamiento en el área de la ingeniería. Sin embargo otras áreas además de la ingeniería están siendo objeto de desarrollo de aplicaciones de realidad virtual y sistemas hápticos.

Dichas áreas incluyen la medicina y rehabilitación, la arquitectura, la psicología, el entretenimiento y arte, etc.

El objetivo de este trabajo es presentar el desarrollo de diversas aplicaciones de realidad virtual y sistemas hápticos en el área de ingeniería, medicina y arte. Estos desarrollos forman parte de las actividades de investigación realizadas por los autores en los últimos años y en colaboración con otros grupos de investigación a nivel nacional e internacional. Las aplicaciones y los resultados de investigación obtenidos son presentados y discutidos en este trabajo.

Realidad virtual y sistemas hápticos

Realidad Virtual

Los orígenes de la Realidad Virtual (RV) datan desde el proyecto “the ultimate display” (Sutherland, 1965), en donde se hacía referencia a la pantalla o monitor como una ventana mediante la cual se puede ver un mundo virtual el cual se percibe, se comporta, suena y se siente como si fuera real. Existen diversas definiciones de RV, por ejemplo, Ellis (1994) la define como “la proyección interactiva de imágenes virtuales mejoradas y el uso de modalidades no visuales, como la retroalimentación háptica y auditiva, para hacer creer al usuario que está interactuando con objetos reales”.

Por otro lado Jayaram y Connacher (1997) la definen como “el uso de ambientes sintéticos generados por computadora y el hardware asociado para proveer al usuario con la ilusión de presencia física dentro de dicho ambiente”. Sin embargo, todas las definiciones coinciden en que la RV es un ambiente sintético generado por computadora y otros dispositivos externos que permiten al usuario interactuar con un mundo virtual 3D en el cual los objetos virtuales pueden comportarse como si fueran reales. El concepto fundamental detrás de la RV es el de la ilusión (Mujber et al. 2004).

El grado de inmersión en la RV se refiere a que tan profundamente el usuario está sensorialmente involucrado al ambiente virtual, es decir, que tanto puede ver, oír, sentir e incluso oler o saborear los objetos virtuales. Existen diferentes niveles de inmersión; por ejemplo, en el más alto nivel de inmersión el usuario estaría completamente aislado del mundo real y utilizaría los cinco sentidos (vista, oído, tacto, olfato y gusto) para interactuar con el ambiente virtual.

A la fecha no existe ningún ambiente virtual que permita una inmersión completa de todos los sentidos. Un nivel de inmersión bajo puede involucrar únicamente uno o dos sentidos, siendo la vista el más común, donde por medio de proyecciones estereoscópicas 3D el usuario puede ver objetos virtuales como si fueran objetos reales. También es cada vez más común el uso de dispositivos hápticos los cuales permiten sentir la forma, textura, peso e inercia de los objetos virtuales. Mujber *et al.* (2004) clasifican los sistemas de RV en tres tipos: 1) no inmersivos (desktop systems), 2) semi-inmersivos, y 3) totalmente inmersivos, Tabla .

Tabla 7 Tipos de sistemas de Realidad Virtual (Mujber *et al.* 2004).

Características	Sistemas de Realidad Virtual		
	No inmersivos	Semi-inmersivos	Totalmente inmersivos
Dispositivos de entrada	Ratón, teclado, joysticks y esferas o bolas.	Josticks, esferas espaciales, guantes de datos	Guantes, comandos de voz
Dispositivos de salida	Monitor estándar de alta resolución	Monitor y proyectores de pantalla grande, sistemas de múltiple proyección	Pantallas de montaje en la cabeza (HMD), CAVE
Resolución	Alta	Alta	Bajo – Media
Sentido de inmersión	Ninguna – baja	Media-Alta	Alta
Grado de interacción	Baja	Media	Alta
Costo	Bajo	Alto	Muy alto

Una de las características más importantes de los sistemas de RV es que pueden ser utilizadas como una herramienta para la adquisición de información, conocimientos y habilidades, así como la representación o modelado de conceptos, ideas o lugares que de otra manera pudiera ser imposible de representar o acceder. Por tanto los sistemas de RV tienen aplicaciones en diversas áreas del conocimiento dentro de las que destacan la ingeniería, donde recientemente ha cobrado gran importancia como una poderosa herramienta de diseño debido a su capacidad de proveer un ambiente tridimensional que permite interactuar con representaciones digitales de un producto utilizando los movimientos naturales del cuerpo, esto mediante dispositivos periféricos adicionales como guantes, sistemas de tele-presencia, e incluso los sistemas hápticos.

Sistemas hápticos

La palabra háptico proviene de la palabra griega haptesthai que significa tocar, o lo que es relacionado al sentido del tacto y se puede interpretar bajo diversos conceptos como son:

Percepción háptica, que se refiere al proceso mediante el cual se perciben los objetos a través del sentido del tacto;

Retroalimentación háptica, que se refiere a recibir una fuerza o señal externa para estimular el sentido del tacto; y

Interfaz háptica, que se refiere a los dispositivos encargados de generar la señal de retroalimentación háptica. Por otro lado, el renderizado háptico es el nombre que se le da al proceso general de sentir o tocar objetos virtuales.

Esto involucra retroalimentación táctil para sentir propiedades tales como la textura superficial, y retroalimentación kinestésica para sentir las formas, tamaños y peso de los objetos. Similar a la gráficas computacional, el renderizado háptico computacional provee la proyección de objetos a las personas de una manera interactiva, pero con la diferencia de que los objetos virtuales pueden ser palpados.

Las interfaces hápticas son comúnmente utilizadas para habilitar el sentido del tacto y cinestesia al manipular objetos virtuales en sistemas de RV. También pueden ser utilizadas para la manipulación a distancia de objetos reales; por ejemplo, controlar un brazo robótico para el manejo de residuos peligrosos o brindar terapias de rehabilitación a distancia.

De acuerdo con Burdea (1996) los dispositivos hápticos permiten obtener de manera general tres tipos de retroalimentación:

- Retroalimentación táctil o cutánea, la cual es útil para reconocer la textura, forma o incluso la temperatura de los objetos virtuales.
- Retroalimentación de fuerza cinemática, la cual permite reconocer el peso, inercia y dureza de los objetos virtuales, y en su caso, colisiones con otros objetos virtuales.
- *Retroalimentación propioceptiva* la cual permite capturar la posición y orientación del objeto virtual en un espacio tridimensional.

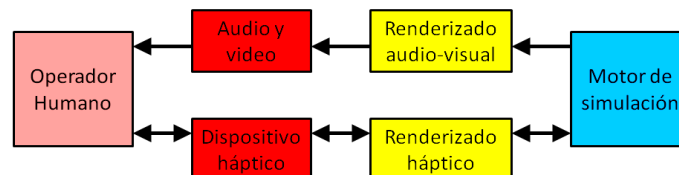
Los dispositivos o interfaces hápticas se comportan como un pequeño robot que intercambia energía mecánica con el usuario. Aunque estas interfaces pueden estar en contacto con cualquier parte del cuerpo humano del usuario, las interfaces manuales han sido las más desarrolladas e utilizadas hasta la fecha. Existen actualmente en el mercado varios dispositivos hápticos, entre los que destacan el Phantom Omni y el Phantom Desktop de Sensable®, el Falcon de Novint®, y el Virtuose de Haption®.

Las características de retroalimentación que brindan los sistemas hápticos permiten crear aplicaciones más intuitivas donde el usuario tiene un mayor nivel de participación e influencia en ambientes virtuales. La retroalimentación háptica es crucial para incrementar el nivel de inmersión e interacción del usuario en las aplicaciones de realidad virtual. Algunas tareas como el entrenamiento de procesos repetitivos, planeación quirúrgica, diseño, escultura, prototipado, entre otros, pueden ser optimizadas al utilizar plataformas o sistemas que involucren el uso de dispositivos hápticos.

La arquitectura principal de un sistema de realidad virtual que incorpora la parte visual, auditiva y renderizado háptico, comprende los siguientes elementos básicos (Salisbury et. al. 2004), Figura 1:

- *Motor de simulación* (simulation engine), responsable de calcular el comportamiento físico del ambiente virtual en el tiempo.
- *Algoritmos visuales, auditivos y de renderizado háptico*, los cuales calculan los gráficos del mundo virtual, los sonidos y la respuesta en fuerza para el usuario.
- *Transductores o interfaces*, los cuales convierten las señales visuales, auditivas y de fuerza de la computadora, a señales que el usuario puede percibir.

Figura 7 Arquitectura general de un sistema de RV que incorpora el renderizado háptico.



Aplicaciones

Actualmente diversas compañías e instituciones se encuentran investigando el desarrollo y aplicación de técnicas de realidad virtual en diversas áreas del conocimiento, entre las que destacan la ingeniería y la medicina. Las aplicaciones incluyen:

- Medicina: se han desarrollado sistemas virtuales para el diseño de prótesis e implantes (Scharver, 2004), sistemas de cirugía por computadora (Girod et al. 1995, Bell et al. 2011), entrenamiento quirúrgico (Pohlenz et al. 2010), rehabilitación, y tratamientos o terapias para cierto tipo de enfermedades como las fobias (Castañeda et al. 2011).
- Ingeniería: desarrollo de sistemas de diseño y manufactura virtuales (Henderson y Kattethota, 1999, Fischer, et al. 2009), simulación virtual de procesos industriales (Aras y Yip-Hoy, 2007, Lim, et al., 2009), entrenamiento virtual de operarios (Pérez y Sanz, 2007, Brough, et al. 2007), fábricas virtuales (Mujber et al. 2004), etc.
- Ciencia: representación y simulación virtual de fenómenos físicos, biológicos, químicos, visualización de información científica.
- Educación: creación de escenarios a escala nano, micro, macro o astronómico, para proveer a los estudiantes el experimentar diversos fenómenos en un mundo virtual (Castañeda y Espinosa, 2008).
- Entretenimiento: videojuegos y simuladores que permiten al usuario sentir y manipular objetos virtualmente, o incluso llevar una segunda vida virtual (second life, 2014).
- Arte: exhibiciones virtuales de arte, museos virtuales, conciertos virtuales, esculpido virtual de objetos, etc.

A continuación se describen tres sistemas desarrollados por los autores, sus características principales, sus aplicaciones, y los conceptos básicos de estos sistemas de realidad virtual.

Sistema HAMS

7.1 Descripción

En el área de la ingeniería, se ha propuesto y desarrollado el sistema HAMS (Haptic Assembly and Manufacturing System) (González *et al.* 2014) para la planeación, evaluación, simulación y entrenamiento de tareas de ensamble y manufactura virtual. El sistema HAMS comprende tres módulos principales, Figura 2:

Módulo gráfico: es el encargado del renderizado gráfico, el cual incluye la creación y representación gráfica de la escena virtual y de los modelos tridimensionales, la visualización de trayectorias de ensamble, la visualización de información en forma de texto, así como la creación y visualización de botones virtuales llamados *widgets* para modificar parámetros de la simulación. Para ello el sistema HAMS emplea las librerías “*Visualization Toolkit (VTK) v5.10*”.

Módulo físico: es el responsable del comportamiento físico de los objetos virtuales, dándoles un movimiento dinámico realista, además de detección y respuesta a colisiones. En la plataforma de ensambles desarrollada se utilizan tres simuladores de física – Bullet physics v2.81, PhysX SDK v2.8, y PhysX SDK v3.1.

Módulo háptico: es el encargado de calcular y proveer la fuerza de retroalimentación que habilita el sentido del tacto y cinestesia para que el usuario pueda reconocer y manipular los objetos virtuales. Se utilizan las librerías HLAPI de OpenHaptics v3.0. El sistema HAMS permite la manipulación de objetos utilizando un dispositivo háptico Phantom Omni en cada mano.

La integración de los tres módulos en el sistema HAMS permite realizar el proceso de ensamble virtual de una manera intuitiva y realista, por medio de la interacción del usuario con el ambiente virtual a través de un par de dispositivos hápticos, con los cuales se obtiene retroalimentación de fuerza desde el ambiente virtual.

7.2 Implementación

El sistema HAMS ha sido implementado en la plataforma MFC (Microsoft Foundation Classes) de Visual Studio 2010. En la Figura 3 se observa la interfaz gráfica de usuario mientras que en la Figura 4 se muestra la interfaz háptica del sistema HAMS. El sistema posee paneles de control y widgets que permiten manipular los parámetros y variables de simulación, incluyendo el simulador físico, en tiempo de ejecución con el fin de analizar el efecto que tienen sobre el desempeño del ensamble.

Estas características hacen del sistema HAMS una plataforma de ensambles virtuales completa, flexible y robusta para la planeación, evaluación, simulación y entrenamiento de tareas de ensamble de una manera natural e intuitiva.

Figura 7.1 Arquitectura del sistema de ensambles virtuales HAMS

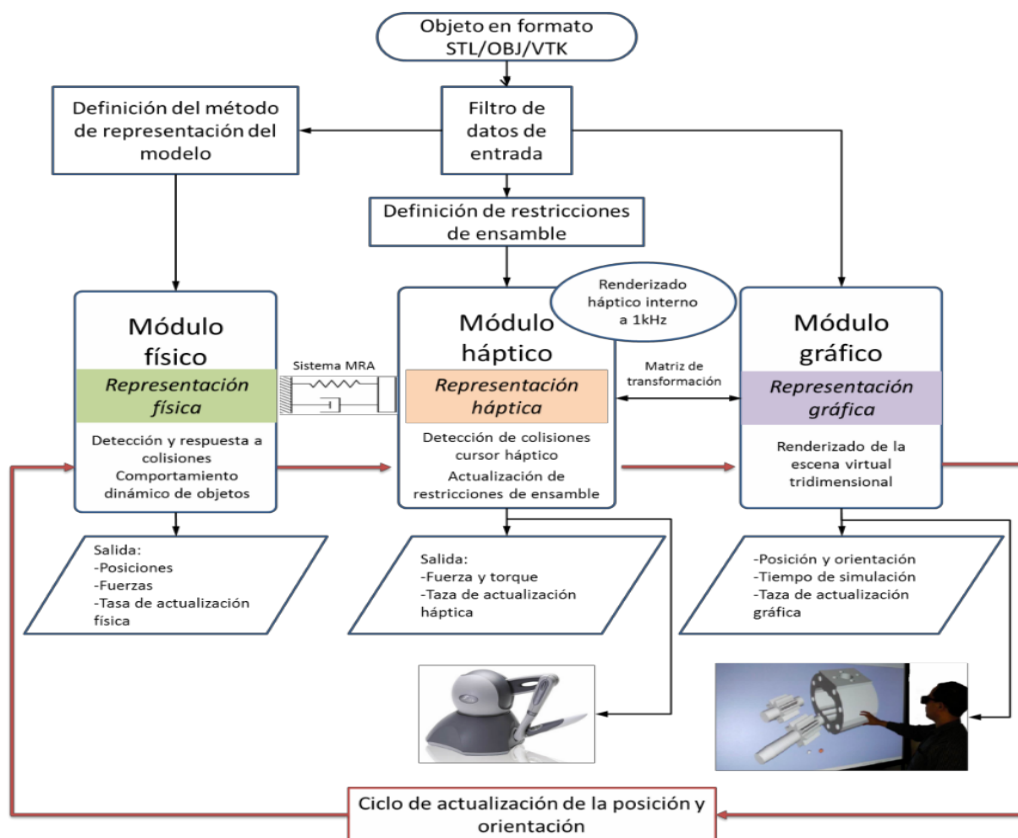


Figura 7.2 Interfaz gráfica de usuario del sistema HAMS

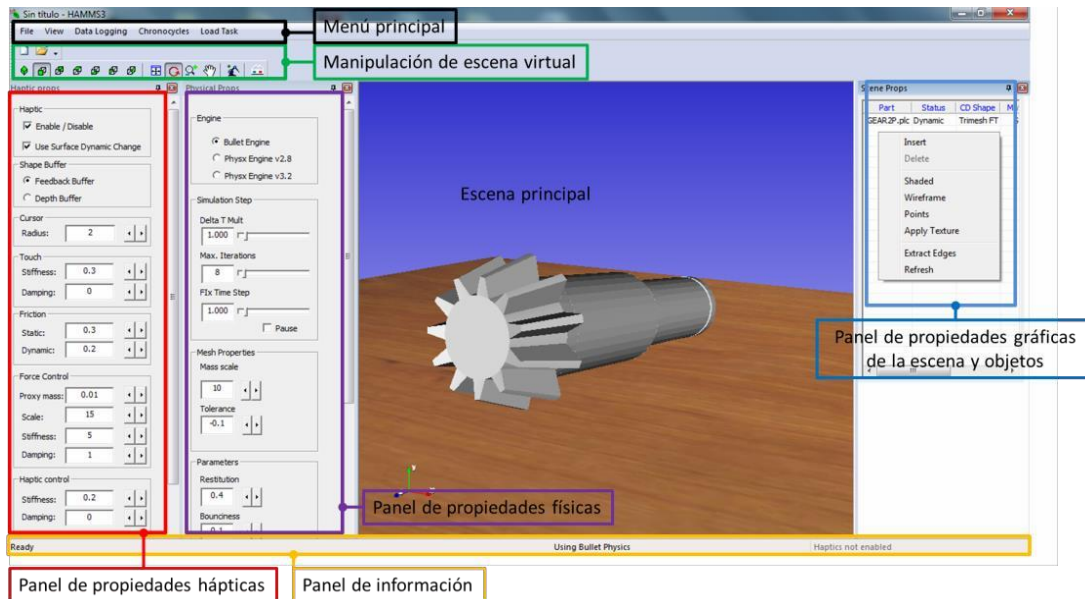


Figura 7.3 Interfaz háptica del sistema de ensamblaje virtuales HAMS

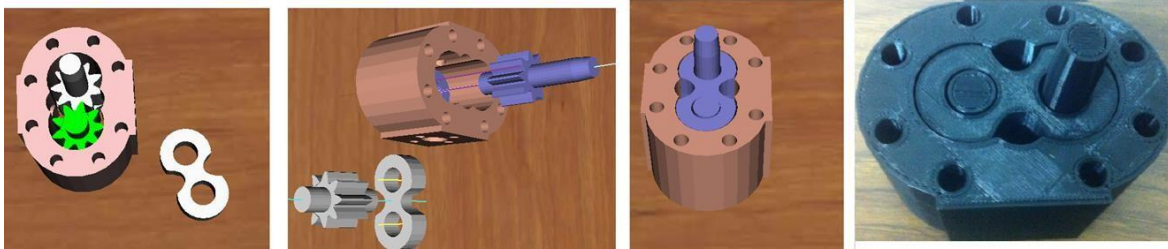


7.3 Evaluación y resultados

Con el fin de evaluar el desempeño general del sistema HAMS, se pidió a un grupo de participantes realizar el ensamble de una bomba de engranes, Figura 5. Cada participante tuvo una sesión previa de entrenamiento y después realizó el ensamble seis veces.

Durante el ensamble se midió el tiempo para completar el ensamble y se pidió a cada usuario contestar dos cuestionarios a cerca de su percepción y experiencia en el uso del sistema HAMS. Los resultados arrojaron un tiempo promedio para completar el ensamble de 2 minutos y 50 segundos.

Figura 7.4 Bomba de engranes: a), b), c) ensamble virtual en el sistema HAMS, d) ensamble real.



En relación a los resultados de la evaluación cualitativa al sistema HAMS, se obtuvo que el parámetro mejor evaluado por los usuarios es la retroalimentación de fuerza. Además, los usuarios percibieron que el tiempo de ensamble virtual es mayor al tiempo de ensamble real, lo cual concuerda con los resultados cuantitativos de la experimentación realizada.

Los demás parámetros muestran valores satisfactorios, por encima de 0.5, lo que indica un buen desempeño de la plataforma de ensambles virtuales. Se observa una mejor percepción general del proceso de ensamble cuando se utilizan restricciones de ensamble excepto en el parámetro de realismo, lo cual es la desventaja de este método.

Con respecto a la percepción global del sistema, los usuarios comentaron lo siguiente:

Consideran la experiencia de ensamble virtual como útil e interesante.

Consideran que la precisión del sistema es buena, es decir, perciben que la mayoría del tiempo los objetos se comportan como objetos reales.

Intuyen fácilmente el procedimiento para manipular los objetos y realizar el ensamble.

El sistema reproduce de manera correcta los movimientos.

La rapidez del sistema es el principal factor para poder utilizarlo en casos reales.

No consideran relevante que el tiempo de ensamble virtual deba ser igual al tiempo de ensamble real para que el sistema pueda tener una aplicación práctica.

El sistema puede ser utilizado en planeaciones o análisis de ensambles reales.

El sistema es intuitivo y amigable, además ofrece una simulación realista del proceso de ensamble. Se tiene dificultad para manipular la orientación de la cámara, además se requiere práctica para poder realizar los ensambles con mayor fluidez.

Consideran que el sistema puede ser empleado como una plataforma de diseño, planeación y entrenamiento en operaciones riesgosas, repetitivas o donde se requiera alta precisión. Así como en casos de rehabilitación.

Mejorar la rapidez de la detección de colisiones y agregar la manipulación de los objetos por medio de la interacción completa de la mano y los dedos. Mejorar la simulación de

materiales para observar deformaciones y posibles daños al material.

De los resultados obtenidos se puede decir que el sistema HAMS permite la simulación del ensamble de componentes con geometría y complejidad variable, ofrece facilidad y estabilidad para controlar los objetos virtuales, y provee retroalimentación de fuerza al usuario por medio de los dispositivos hápticos.

En términos generales se considera que el sistema HAMS tiene un desempeño satisfactorio y puede ser empleado de manera exitosa en la planeación de ensambles reales. Además del análisis comparativo del sistema desarrollado contra otros sistemas similares reportados en la literatura, se puede observar que HAMS cuenta con ciertas características que lo sitúan al mismo nivel de los sistemas analizados, e incluso posee algunas funciones no reportadas en otros sistemas.

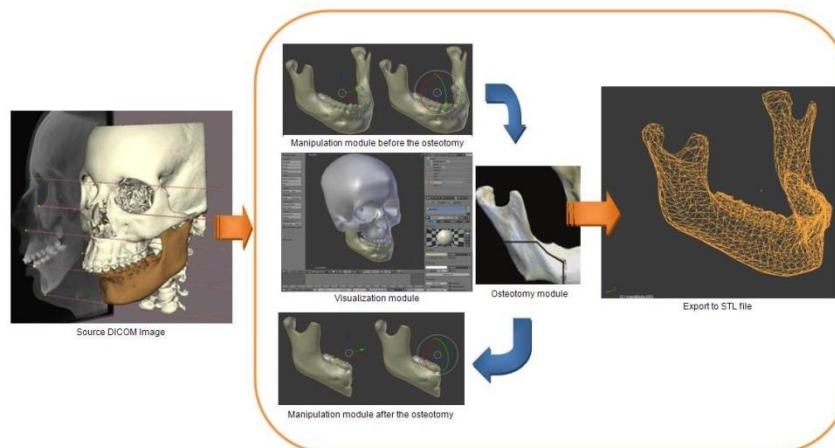
Sistema VOSS

Descripción

En la parte médica se ha propuesto y desarrollado un simulador virtual 3D para planeación de cirugías de osteotomía mandibular ortognática (Govea-Valladares et al. 2012). El sistema de simulación virtual de Osteotomías (Virtual Osteotomy Simulator System, VOSS) tiene la arquitectura que se muestra en la Figura 6. El sistema VOSS está compuesto de cuatro módulos:

- Módulo de visualización, responsable de llevar a cabo el renderizado gráfico de todos los objetos y ambientes virtuales.
- Módulo de osteotomía, para realizar el corte virtual de hueso
- Módulo de manipulación, para permitir la manipulación y movimiento 3D de los objetos y herramientas virtuales de una manera libre.
- Módulo de exportación de datos, para exportar cualquier información relacionada a la planeación de la osteotomía (por ejemplo: modelos STL).

Figura 7.5 Arquitectura del sistema VOSS



Los modelos anatómicos pueden ser reconstruidos a partir de imágenes obtenidas de tomografías computarizadas (CT), para luego ser importados al sistema VOSS en formato STL.

Implementación

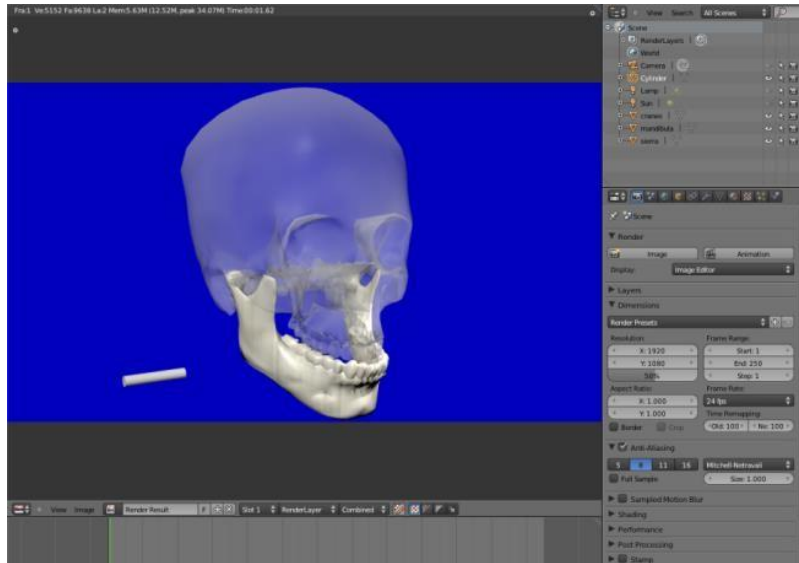
El sistema VOSS ha sido implementado usando Python y Blender 2.59. La interfaz gráfica del sistema se muestra en la Figura 7. Algunas de las características principales del sistema VOSS son:

- Ambiente de realidad virtual y respuesta en tiempo real.
- Visualización 3D de herramientas y modelos anatómicos.

- Manipulación e interacción 3D libre de herramientas de corte, hueso y fragmentos de hueso.
- Simulación de una y múltiples osteotomías.
- Osteotomías con trayectorias de corte libres.

Adicionalmente el sistema VOSS propuesto permite definir diferente texturas, intensidad de luz y propiedades visuales para incrementar el nivel de realismo del escenario o ambiente virtual.

Figura 7.6 Interfaz gráfica de usuario del sistema VOSS



7.4 Evaluación y resultados

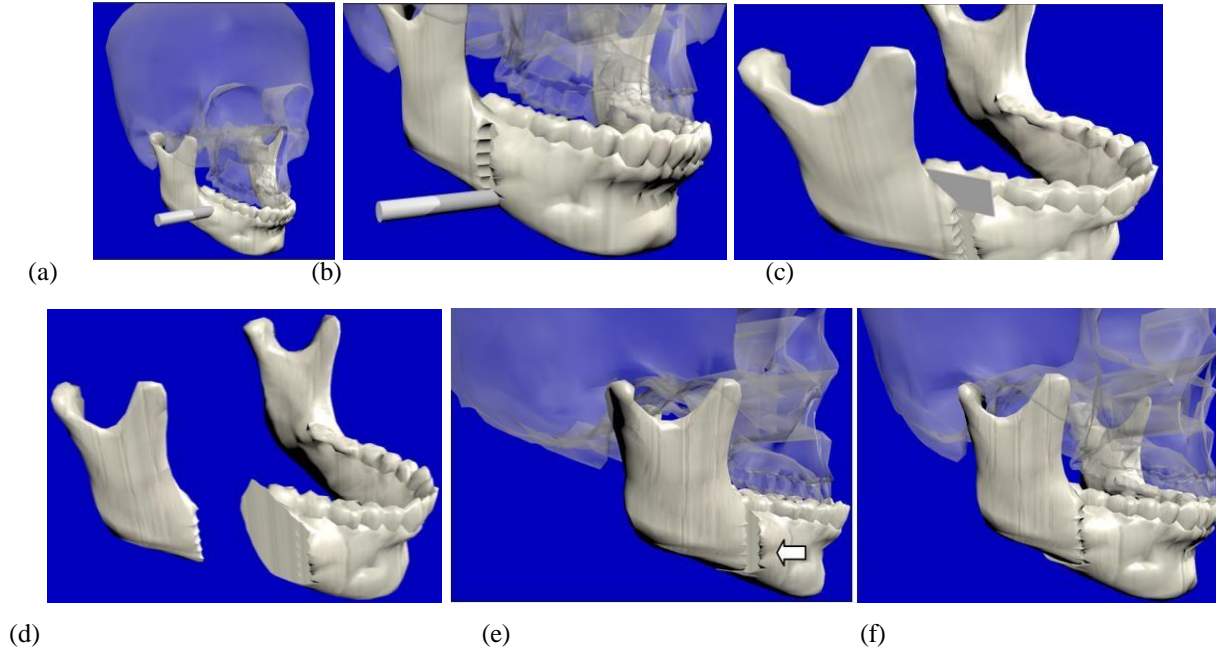
Para evaluar la funcionalidad del sistema VOSS, se desarrolló un caso de estudio correspondiente a una Osteotomía Sagital Bilateral de Rama Mandibular (OSBRM), la cual representa la técnica más frecuentemente utilizada en Cirugía Ortognática para corregir defectos de mandíbula. El procedimiento comienza con la selección de la herramienta de corte y su posicionamiento en la zona donde se realizará el corte, Figura 8a.

Una vez que la herramienta está localizada en su posición inicial, se procede a realizar el corte y éste puede repetirse cuantas veces sea necesario para lograr un corte sagital en la mandíbula. La manipulación y localización de la herramienta puede hacerse de manera libre; esto es, el usuario puede mover libremente la herramienta en cualquier trayectoria o dirección 3D para realizar el corte.

La Figura 8b muestra la simulación del corte utilizando una fresa como herramienta de corte, mientras que la Figura 8c muestra el corte utilizando una sierra sagital para separar la mandíbula. Tal como en el procedimiento quirúrgico real, la mandíbula es entonces separada en dos partes las cuales pueden ser movidas y manipuladas libremente y de manera independiente. La Figura 8d muestra los segmentos de hueso después de su separación.

Después de la separación y relocalización de los segmentos de hueso de la mandíbula, Figura 8e, se procede a la unión de los huesos de la mandíbula en su posición final para corregir de esta manera el defecto mandibular, Figura 8f, tal como se hace en la cirugía real en donde por medio de placas y tornillo de titanio se une el hueso.

Figura 7.12 BSSROM virtual procedure: a) Initial positioning of the tool, b) milling cutting process, c) sawing cutting process, d) manipulation of the jaw, e) repositioning of the jaw, f) final jaw position



La rapidez o desempeño del procedimiento de corte en el sistema VOSS depende del tamaño del modelo anatómico (en particular el número de elementos triangulares en la malla STL. El tiempo promedio para realizar un corte varía de 250 a 300 ms, para un tamaño estándar de mandíbula y herramienta de corte.

Los resultados de las pruebas de evaluación realizadas han demostrado la funcionalidad del sistema VOSS para llevar a cabo la planeación y/o entrenamiento de osteotomías virtuales. Adicionalmente se puede decir que el sistema ha sido desarrollado usando software libre (open-source) y sin sacrificar el nivel de realismo del mundo y objetos virtuales. Como trabajo futuro se considera la integración del renderizado háptico al sistema VOSS.

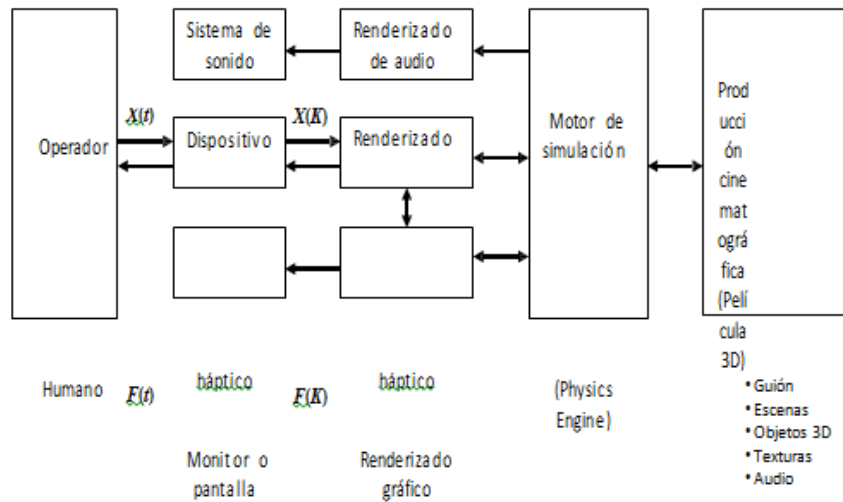
Sistema CIGI

Descripción

Como parte de un desarrollo novedoso en el área del arte, y en particular en la industria del cine, se ha propuesto y desarrollado un novedoso Sistema Cinematográfico Interactivo para Gente Invidente (CIGI) (Medellín et. al., 2011). El sistema CIGI incorpora el sentido del tacto al cine mediante el uso de la realidad virtual y los sistemas hápticos. En el sistema CIGI se genera un mundo virtual el cual puede ser explorado táctilmente por el invidente al mismo tiempo que escucha un espacio auditivo denominado cinecuento. El mundo virtual y el cinecuento se desarrollan con base en el guión cinematográfico, y su integración se le ha llamado película virtual 3D.

La arquitectura general del sistema CIGI se muestra en la Figura 9, en donde se puede observar que además de integrar el renderizado háptico, visual y auditivo, se integra un módulo adicional el cual corresponde a la producción cinematográfica, y en donde se definen y configuran las diferentes escenas virtuales y audios de la película de acuerdo al guion cinematográfico. El motor de simulación física realiza el renderizado háptico, visual y auditivo correspondiente a la producción cinematográfica, y la interacción de los objetos en el ambiente virtual.

Figura 7.13 Arquitectura del sistema CIGI



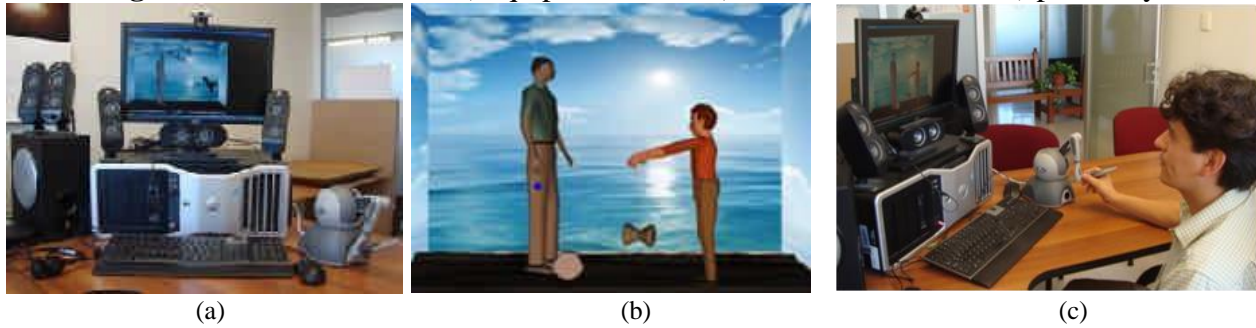
El sistema CIGI se desarrolló en la plataforma Visual C++, utilizando las siguientes librerías:

OpenAL (librería de sonido 3D de código abierto con la cual se puede simular la localización del sonido en un espacio tridimensional de varios canales), OpenHaptics (librería de renderizado háptico la cual integra los pasos básicos para aplicaciones graficas /hápticas y están escritas en C++), OpenGL (es una especificación estándar que define una API multilenguaje y multiplataforma para escribir aplicaciones que produzcan gráficos 2D y 3D). El renderizado háptico se realiza utilizando un dispositivo háptico Phantom Omni de Sensable ®. El sistema CIGI y la película interactiva-táctil 3D desarrollados se muestran en la Figura 10. En la Figura 10b se puede apreciar una esfera azul la cual representa la posición del explorador háptico en el ambiente virtual.

Algunas de las características del sistema CIGI son:

- Los objetos virtuales 3D pueden ser explorados libremente y por el usuario.
- Las escenas virtuales y el audio pueden ser adelantadas o atrasadas a deseo del usuario.
- El tiempo de exploración de los escenarios u objetos virtuales no está limitado.
- Es posible reproducir otras películas, para ellos se requiere el modelado 3D de los escenarios, objetos, texturas y el audio; es decir, se debe contar con la película virtual 3D.

Figura 7.14 Sistema CIGI: a) equipo utilizado, b) escenarios virtuales, c) pruebas y evaluación.



7.5 Evaluación y resultados

Para llevar a cabo las pruebas de evaluación del sistema CIGI se seleccionó un grupo de 8 personas: 4 con ceguera total, 3 con ceguera parcial y 1 débil visual. Cabe hacer mención que se tomaron en cuenta personas con diferentes niveles de invidencia con el fin de identificar la influencia del grado de invidencia en el reconocimiento táctil de los objetos tridimensionales. Por lo anterior, a ninguno de los participantes se le permitió ver la pantalla.

Las expresiones faciales que manifestaron los participantes a la percepción virtual táctil de objetos tridimensionales se muestran en la Tabla 2. De estos resultados se observa que muchas de las expresiones faciales fueron sonrisas, levantamiento de cejas y movimientos de manos que expresaban sorpresa. Todos los participantes manifestaron mucha emoción.

Tabla 7 Expresiones faciales manifestadas ante la percepción virtual táctil.

Participante	Expresiones corporales	Expresiones verbales
1	Sonrisas y risas, muecas de asombro	¡Que padre, si se siente!
2	Muchas sonrisas, acercamientos a la pantalla, movimientos de la mano emocionado	¡Que bonito sentí!
3	Asombro. Movimientos delicados. Duda al expresar la figura	
4	Se encuentra un poco perdido y su expresión facial lo refleja. Sonríe y	
5	Trata de explorar la figura, movimientos bruscos, ríe, emoción	
6	Muy entusiasmada. Sonríe y ríe. Se sorprende al explicarle que dentro de los objetos no hay nada	Wuju! ¡Sí! ¡Órale, esto está bien padre! Se siente bien padre, que pasa si le pico? ¡Es muy extraño he!
7	Se sorprende al saber que sus movimientos de la mano son en el aire y	¿Cómo? ¿Esta dibujado en la pantalla entonces?
8	Cuando se le permitió ver, exploraba los objetos a 3 cm de distancia	Pues si se siente.

Al final de las pruebas se les preguntó a los participantes ¿Cómo fue tu experiencia al sentir figuras geométricas a través del sistema CIGI? Las respuestas obtenidas se muestran en la Tabla 3. De estos resultados se observa que la mayoría de los participantes gustó de la experiencia de sentir objetos 3D por medio del sistema CIGI. La experiencia de saber que tocaban lo que se veía en pantalla fue lo que más les emocionaba, como lo expresan con comentarios tales como el sentirse sorprendidos por nunca haber sentido de esa manera. Asimismo, la mayoría de los participantes de forma exploratoria utilizaban el tacto activo con las dos manos para sentir la interface háptica en busca de un objeto real, sorprendiéndose de no encontrar objetos físicos frente a ellos, sino objetos virtuales presentes sólo en la pantalla del ordenador.

Tabla 7.1 Experiencias de personas ciegas y débiles visuales en el sistema CIGI.

Participante	Expresiones corporales
1	Pues más que nada quede sorprendido, porque nunca había sentido las figuras, así, o sea, porque pues usted las puede estar viendo y yo no, y es interéstate el cómo se presentan
2	Pues fue bien bonito porque nunca había sentido como se sienten las imágenes, entonces fue como una experiencia nueva.
3	Yo sí le batalle un poco. Es que con eso de que se metía la pluma (el cursor) a la figura, sí le batallaba, pero sí estuvo padre la experiencia.
4	Si me gustó
5	Muy emocionado, me gustó mucho, aunque se me hizo difícil.
6	Sus acciones fueron el: explorar el brazo del OMNI@; hacer movimientos bruscos; esperar que el dispositivo se moviera solo y la guiara a través de las figuras 3D. Se emocionaba mucho al identificar los objetos. Preguntaba entusiasmada para explorar con la mano los botones del OMNI. Como experiencia comentó: Se me hizo un poco difícil.
7	Se me hizo un poco difícil porque uno como ciego está acostumbrado a tocar imágenes pero en relieve, no tanto así en espacio, ni dibujadas. Pero una vez que le empiezas a agarrar la movida de cómo se utiliza la pluma en ese tipo de figuras, ya más o menos te das una idea de cómo es.
8	No me es difícil encontrar la figura mientras sí las pueda ver. Cuando se me cubren los ojos, tardo en reconocer los objetos pero sí los identifico.

7.6 Conclusiones

Los avances de las tecnologías de realidad virtual y sistemas hápticos han originado el desarrollo de numerosas aplicaciones en diversas áreas del conocimiento. En este trabajo se ha presentado el desarrollo y evaluación de tres aplicaciones realidad virtual y sistemas hápticos para el análisis y simulaciones de procesos en el área de la ingeniería, medicina y arte.

El sistema HAMS permite la planeación, evaluación y entrenamiento de tareas de ensamble y manufactura. Por otro lado, el sistema VOSS ha sido desarrollado para simular, planear y entrenar cirugías ortognáticas, en particular osteotomías (corte de hueso).

Por su parte del sistema CIGI permite reproducir películas 3D en las cuales la persona invidente puede interactuar con el mundo y objetos virtuales. Estos desarrollos son resultado del trabajo de investigación en colaboración con varios cuerpos académicos y de investigación nacionales e internacionales.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo otorgado por el CONACYT (proyecto No. 154430), CONACULTA (proyecto No S/N), PROMEP de la SEP (proyecto No. 103.5/07/2574), UASLP, Heriot-Watt University, y el EPSRC de Reino Unido, para la realización de los proyectos de investigación.

Referencias

Aras, E., y Yip-Hoi, D. (2007). Geometric modeling of cutter/work piece engagements in 3-axis milling using polyhedral models. ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2007), November 11–15, Seattle, Washington, USA. Paper no. IMECE2007-41414, pp. 371-382.

Bell R. Bryan, DDS, MD (2011). Computer Planning and Intraoperative Navigation in Orthognathic Surgery. J Oral Maxillofac Surgery, 69, pp. 592-605.

- Brooks, Frederick P., Ouh-Young, Ming, Batter, James J., Kilpatrick, P. Jerome (1990). Project GROPE Haptic displays for scientific visualization. CM SIGGRAPH Computer Graphics, Proceedings of the 17th annual conference on Computer graphics and interactive techniques SIGGRAPH '90, Vol. 24, Issue 4, September. ACM Press.
- Brough, J., Schwartz, M., Gupta, S.K., Anand, D. K., Kavetsky, R., y Pettersen, R. (2007). Towards the development of a virtual environment-based training system for mechanical assembly operations. *Virtual Reality*, vol. 11(4), pp. 189-206.
- Burdea, G. C. (1996). *Force and touch feedback for virtual reality*. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA.
- Castañeda Roldán Carolina Yolanda, Espinosa y Victoria José Rafael (2008). “Realidad Virtual, una herramienta computacional para el estudio de Sistemas Orgánicos y los Sentidos del Tacto y Olfato a Nivel Primaria”, en *Revista Impulso*. Agosto.
- Castañeda Roldán C. Y., Vázquez García F. E. (2011). Realidad Virtual, un apoyo en la Terapia de Acrofobia, Claustrofobia y Agorafobia. *Memorias del VIII Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico (CIINDET 2011)*, Noviembre, Cuernavaca Morelos, México.
- Ellis, S.R. (1994). What are virtual environments? *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 14(1), pp. 17-22.
- Fischer, A., Vance, J.M., Vo, D.M. (2009). Haptic feedback to guide interactive product design. *ASME-AFM 2009 World Conference on Innovative Virtual Reality (WINVR2009)* February 25–26, 2009 , Chalon-sur-Saône, France.
- Girod Sabine, Keeve Erwin, Girod Bernd (1995). Advances in interactive craniofacial surgery planning by 3D simulation and visualization. *Int. J. Oral and Maxillofacial Surgery*, 24, pp. 120-125.
- Gonzalez-Badillo Germanico, Medellin-Castillo Hugo, Lim Theodore, Ritchie James, Garbaya Samir. (2014). The development of a physics and constraint-based haptic virtual assembly system. *Assembly Automation*, 34/1, pp. 41–55.
- Govea-Valladares E.H., Medellin-Castillo H.I., Lim T., Khambay B., Rodriguez-Florido M., Ballesteros J. (2012). Development of a Virtual Simulator for Planning Mandible Osteotomies in Orthognathic Surgeries. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, Vol. 33, No. 2, pp. 147-158.
- Mujber, T.S., Szecsi, T., Hashmi, M.S.J. (2004). Virtual reality applications in manufacturing process simulation. *Journal of materials processing technology*, 155-156, pp. 1834-1838.
- Henderson, M., y Kattethota, G. (1999). Manufacturability evaluation for rapid fabrication: A system form traditional machining and layered manufacturing planning. *CAD Conference*, Neuchatel, Switzerland, Feb. 22-24.
- Jayaram, S. Connacher, H.I. y Lyons, K.W. (1997). Virtual assembly using virtual reality techniques. *Computer Aided Design*, vol. 29(8), pp. 575-584.

Lim, T., Medellín, H., Sung R., Ritchie, J.M. y Corney, J. (2009). Virtual bloxing assembly rapid prototyping of near net shapes. ASME-AFM 2009 World Conference on Innovative Virtual Reality (WINVR2009) February 25–26, 2009 , Chalon-sur-Saône, France.

Medellín Castillo Hugo I., Martínez Hernández Claudia A., Espinosa Castañeda Raquel, Castañeda Roldán Yolanda. (2011). Desarrollo de un Sistema de Proyección de Películas Virtuales para Gente Invidente. Revista Impulso, revista de las academias del Instituto Tecnológico de Puebla. Año 4, No. 2, Diciembre.

Pérez Acal A., Sanz Lobera A. (2007). Virtual reality simulation applied to a numerical control milling machine. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDEM). vol. 1(3), pp. 143-154.

Pohlenz Philipp, Groß Alexander, Petersik Andreas, Von Sternberg Norman, Pflesser Bernhard, Pommert Andreas, Hoffmann Karl-Heinz, Tiede Ulf, Springer Ingo, Heiland Max (2010). Virtual Dental Surgery as a New Educational Tool in Dental School. Journal of Cranio- Maxillo-Facial Surgery, 38, pp. 560-564.

Ramesh, Jain (2000). Real Reality. Computer Graphics and Applications, IEEE, Vol. 20, issue 1, Jan/Feb, pp. 40-41.

Salisbury, K., Conti, F., Barbagli, F. (2004). Haptic rendering: introductory concepts. Computer Graphics and Applications, IEEE, Vol. 24, Issue 2, March-April, pp. 24 – 32. Second life. Disponible: <http://secondlife.com/> [2014, Abril].

Scharver Chris, Evenhouse Ray, Johnson Andrew, Leigh Jason (2004). “Designing cranial implants in a haptic augmented reality environment”, en Communications of the ACM, Vol. 47, No. 8, August, pp. 33-38.

Sutherland I.E. (1965). The ultimate display. Proceedings of IFIPS Congress, vol. 2, New York, NY, pp. 506–508.