

**DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN DISPOSITIVO
HÁPTICO DE 5 GRADOS DE LIBERTAD A PARTIR DE DOS
SISTEMAS NOVINT FALCON DE 3 GRADOS DE LIBERTAD**

JULIAN IDÁRRAGA DÍAZ

LAURA PAOLA QUINTERO CASTRO

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA EN MECATRÓNICA
BOGOTÁ D.C.
2012**

**DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN DISPOSITIVO
HÁPTICO DE 5 GRADOS DE LIBERTAD A PARTIR DE DOS
SISTEMAS NOVINT FALCON DE 3 GRADOS DE LIBERTAD**

**JULIAN IDÁRRAGA DÍAZ
LAURA PAOLA QUINTERO CASTRO**

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero en Mecatrónica

**DIRECTOR
Ing. Byron Alfonso Pérez Gutiérrez, M.Sc.**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA EN MECATRÓNICA
BOGOTÁ D.C.
2012**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, 10 de Abril de 2012

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado primeramente a mis padres Julio Cesar y Consuelo, por la confianza depositada en mí y porque gracias a su apoyo y dedicación incondicional hoy puedo ver culminada mi carrera profesional, agradezco también a mis hermanas Ana María y Daniela porque gracias a mi familia por su amor y su cariño soy quien soy hoy en día.

Julian Idárraga Díaz

A Dios, por darme la fuerza necesaria para seguir siempre adelante y haber llegado hasta aquí y por todas las personas y oportunidades que ha puesto en mi camino. A mi madre Blanca Castro por su esfuerzo para que nunca me falte nada, por su absoluta dedicación y todas sus enseñanzas para hacer de mí una mejor persona cada día.

Laura Paola Quintero Castro

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos en primer lugar a Dios porque gracias a él, realizar este sueño fue posible, por brindarnos esta oportunidad y por darnos la fuerza para desarrollar y culminar este trabajo.

A Byron Alfonso Pérez Gutiérrez, docente de la Universidad Militar Nueva Granada, por la confianza depositada al habernos tenido en cuenta para este proyecto, por la dedicación y apoyo brindados, por el respeto a las sugerencias e ideas y por sus valiosos aportes en el desarrollo de este proyecto.

A los docentes del programa de Ingeniería Mecatrónica que con sus enseñanzas nos dieron las bases para formar nuestro conocimiento como ingenieros.

A nuestros grandes amigos y compañeros por haber compartido con nosotros estos años de experiencias y aventuras en el transcurso de nuestra carrera.

Y a todas aquellas personas que de una u otra forma, colaboraron o participaron en la realización de este proyecto, hacemos extensivo nuestro más sincero agradecimiento.

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo el desarrollo y la evaluación de un dispositivo háptico con 5 grados de libertad (GDL) para el mejoramiento de habilidades motrices. El sistema general se divide en tres grandes partes; la primera es el diseño del dispositivo mecánico, el cual une los dos dispositivos *Novint Falcon*; la segunda es el prototipo de software que controla el sistema y sirve para poner en prueba el sistema desarrollado, la última parte es la evaluación del proyecto mediante un protocolo experimental que permite comparar el sistema de 3 GDL con el de 5 GDL.

La idea del proyecto surge de la curiosidad de unir dos dispositivos *Novint Falcon* para obtener un sistema con mayor número de grados de libertad, con el fin de realizar tareas de simulación más complejas con menos limitaciones de movimiento.

Palabras clave: Dispositivo háptico, Control de sistemas hápticos, Grados de libertad, *Novint Falcon*, Realidad virtual.

ABSTRACT

This project aims at the development and the evaluation of a haptic device with 5 degrees of freedom (DOF) for the improvement of motor skills. The general system is divided into three main parts: the first is the mechanic device design, made with rapid prototyping method which connects the two *Novint Falcon* devices; the second is the software prototype that controls the system and it is used to test the developed system; the last part is the evaluation of the project through an experimental protocol for comparing the 3-DOF system with the 5-DOF.

The project idea arises from the curiosity of joining two devices *Novint Falcon* to obtain a system with more number of degrees of freedom, in order to perform more complex simulation tasks with fewer movement limitations.

Keywords: Haptic devices, Control of haptic systems, Degrees of freedom, *Novint Falcon*, Virtual Reality.

Índice general

INTRODUCCIÓN	11
1. NÚCLEO TEMÁTICO	12
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.2. JUSTIFICACIÓN	13
1.3. OBJETIVOS	13
OBJETIVO GENERAL	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.4. DELIMITACIÓN DEL PROYECTO	14
1.5. METODOLOGÍA	14
2. MARCO TEÓRICO	15
2.1. ESTADO DEL ARTE	15
2.2. MARCO CONCEPTUAL	19
2.2.1. HÁPTICA	19
2.2.2. NOVINT FALCON	21
2.2.3. CHAI 3D	22
2.2.4. CINEMÁTICA DIRECTA	29
3. INGENIERÍA DEL PROYECTO	32
3.1. ANÁLISIS DEL PROBLEMA	32
MODELO CONCEPTUAL DEL SISTEMA	32
3.1.1. Modelo conceptual del sistema	32
FLUJO DE INFORMACIÓN Y DEFINICIÓN DE LAS VARI-	
ABLES DEL SISTEMA	34
3.1.2. Flujo de información y definición de las variables del sistema	34
3.2. DISEÑO	36
3.2.1. DISEÑO MECÁNICO	36
3.2.2. DISEÑO DEL SISTEMA HÁPTICO	40
3.2.3. DISEÑO DE SOFTWARE	43
3.2.4. PROTOCOLO EXPERIMENTAL	47

4. DESARROLLO	50
4.1. SISTEMA HÁPTICO	50
4.2. EVALUACIÓN	52
CONCLUSIONES	56
BIBLIOGRAFÍA	58
ANEXOS	61

Índice de figuras

2.1. Sinestecia	19
2.2. Dispositivo háptico <i>Novint Falcon</i>	21
2.3. <i>Gripper Novint Falcon</i>	22
2.4. Dispositivo háptico virtual de Windows	23
2.5. Estructura Escenario <i>CHAI 3D</i>	24
2.6. Estructura objetos virtuales	25
2.7. Cámara virtual <i>CHAI 3D</i>	25
2.8. Representación de las 2 mallas de la herramienta háptica. Malla Proxy y malla del dispositivo	26
3.1. Arquitectura interfaz háptica	33
3.2. Diagrama de bloques dispositivo mecánico 5 GDL	33
3.3. Interfaz háptica	34
3.4. Flujo de la información del sistema	35
3.5. Placa horizontal para modificar el <i>gripper</i> del <i>Novint Falcon</i>	37
3.6. <i>Gripper</i> modificado	37
3.7. Placa Vertical sistema mecánico	38
3.8. (a) Ensamble 1. sistema mecánico <i>gripper</i> izquierdo. (b) <i>gripper</i> derecho	38
3.9. Modificación de la rótula. (a) Tornillo mecanizado añadido. (b) Resultado rótula.	39
3.10. Ensamble 2. herramienta de agarre vertical, gráfica girada 90°.	39
3.11. Ensamble completo dispositivo 5 GDL.	40
3.12. Ejes coordenados de los dispositivos hápticos	41
3.13. Aplicación definitiva dispositivo 5 GDL	44
3.14. Unión de dos <i>Novint Falcon</i> simultáneamente en <i>CHAI 3D</i>	46
3.15. Evaluación del sistema	48
4.1. Modificación del <i>gripper</i> del <i>Novint Falcon</i>	50
4.2. Sistema háptico de 5 GDL implementado a los dos <i>Novint Falcon</i>	51
4.3. Evaluación Subgrupo 1	52
4.4. Evaluación Subgrupo 2	53
4.5. Evaluación Grupo 1 y 2	54
4.6. Fotos evaluación dispositivo háptico	55
4.7. Encuesta post-prueba	56

Índice de cuadros

3.1. Parámetros D-H <i>Falcon</i> izquierdo	41
3.2. Parámetros D-H <i>Falcon</i> derecho	42
3.3. Cuadro comparativo entre APIs	45

INTRODUCCIÓN

El movimiento es la principal capacidad y característica de los seres vivos. Se manifiesta a través de la conducta motriz y gracias al mismo podemos interactuar con las demás personas, objetos y cosas; gracias a la transformación de impulsos nerviosos en energía mecánica, que se ve reflejada como una fuerza o bien como un movimiento, se puede realizar una actividad muscular.

El movimiento reflejo es el comportamiento motor involuntario y no consciente, caracterizado por su alta velocidad de ejecución, en cualquier circunstancia suele usarse ya que es innato de todo ser humano. Este movimiento reflejo se ve involucrado en gran cantidad de juegos de destreza ya que el objetivo es obtener un máximo de éxito y mínimo de tiempo. Los juegos de habilidad de pulso suelen ser usados para adquirir destreza motriz y mejorar los reflejos, pero esta habilidad solo se adquiere por experiencia y practica en la ejecución repetitiva de dichas tareas.

En la actualidad se han desarrollado juegos de habilidad motriz virtuales que usan dispositivos hápticos con 2 o 3 grados de libertad (GDL). Estos dispositivos son de menor costo al compararse con los dispositivos de 5 o 6 GDL, sin embargo, estos dispositivos son limitados ya que solo pueden leer y escribir traslaciones en x , y , z .

Por lo tanto en este proyecto se plantea el desarrollo de un sistema háptico de 5 GDL al unir dos dispositivos hápticos *Novint Falcon*, por medio de un sistema mecánico desarrollado.

En el presente documento se dan a conocer los procesos llevados a cabo para lograr los objetivos planteados. En el capítulo 1 se establecen los parámetros bajo los cuales se desarrolló el proyecto, teniendo en cuenta aspectos como el problema a resolver, la metodología y la justificación. En el capítulo 2, se presenta el estado del arte del tema trabajado y sus antecedentes, así como teoremas y definiciones necesarias para el proyecto. En el capítulo 3, se presenta el capítulo de la ingeniería del proyecto, que se subdivide en dos etapas: análisis y diseño. La primera contiene todo lo concerniente al análisis del sistema, incluyendo variables, parámetros, elementos involucrados y procesos llevados a cabo; luego, se propuso un diseño, tanto a nivel mecánico como del sistema háptico. En el capítulo 4 se presenta el desarrollo como tal del proyecto con los resultados obtenidos de la evaluación del dispositivo.

Capítulo 1

NÚCLEO TEMÁTICO

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿Es posible mejorar la experiencia del usuario a nivel de interactividad en aplicaciones con realidad virtual al aumentar de 3 a 5 el número de GDL en un dispositivo háptico?

En este proyecto se plantea el desarrollo de un sistema háptico de 5 GDL al unir dos dispositivos hápticos *Novint Falcon* (disponibles en el Centro de Realidad Virtual), por medio de un sistema mecánico; desarrollando también un prototipo de software para la integración con el sistema mecatrónico de 5 GDL, se espera que con este sistema mejore la experiencia del usuario al compararse con el dispositivo de 3GDL.

Para la evaluación es necesario plantear un protocolo experimental que permita comparar los sistemas de 3 y 5 GDL y con este determinar si se mejora o no la experiencia del usuario.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Desde el punto académico se plantea este proyecto de grado para que los estudiantes de ingeniería mecatrónica desarrollen una aplicación que integre sistemas electrónicos y mecánicos con una interfaz de software y de esta manera fortalecer sus conocimientos en las diferentes áreas como realidad virtual, programación, robótica, diseño y desarrollen capacidades a la hora de integrar los sistemas en un solo proceso o aplicación.

Con este proyecto se propone una alternativa novedosa y de bajo costo utilizando equipos existentes en el Centro de Realidad Virtual de la Universidad Militar Nueva Granada. El sistema mecatrónico propuesto se puede integrar a simuladores en general o a cualquier simulador que requiera realimentación de fuerza con cinco grados de libertad.

1.3. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollo de un sistema mecatrónico háptico de 5 grados de libertad basado en 2 dispositivos Novint *Falcon* con un prototipo de software para su evaluación.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los requerimientos del sistema de 5 GDL a partir del estudio cinemático del dispositivo de 3GDL.
- Diseñar el sistema mecánico necesario para aumentar los grados de libertad.
- Construir el sistema mecánico.
- Implementar un prototipo de *software* para uso del sistema propuesto.
- Evaluar el desempeño del sistema propuesto mediante un protocolo experimental que permita compararlo con su contraparte de 3GDL.

1.4. DELIMITACIÓN DEL PROYECTO

Este proyecto incluye un sistema mecánico con el fin de unir los dos dispositivos *Novint Falcon*, el sistema desarrollado cuenta con un agarre con la capacidad de 5 grados de libertad de movimiento, este puede interactuar con los dispositivos hápticos simultáneamente. Cuenta con un prototipo de *software* para controlar el sistema mecatrónico, es un programa con ambiente virtual que permite al usuario interactuar con el sistema háptico de 5 grados de libertad para la validación del sistema. Cuenta también con un protocolo experimental para la evaluación del dispositivo y su posterior evaluación desarrollada con 10 usuarios.

1.5. METODOLOGÍA

La metodología propuesta para el desarrollo del trabajo de grado está dividida en las siguientes fases:

- Planteamiento del modelo del dispositivo *Novint Falcon*: En esta etapa se realizará una revisión del estado del arte relacionado con sistemas hápticos, en especial con la modificación de estos sistemas y su integración con otros dispositivos. Posteriormente se encontrará la cinemática del dispositivo para modelar su comportamiento.
- Diseño del eslabón necesario para aumentar los grados de libertad: En esta segunda etapa se determinarán los requerimientos del sistema que debe tener cinco grados de libertad y se estudiará la propuesta de diseño para el eslabón que unirá los dos *Novint Falcon*. Se realizará la evaluación de la propuesta y se determinará si es viable para aumentar los grados de libertad a cinco. Se elaborarán los planos necesarios para la construcción del sistema mecánico y se escogerá el material para su posterior construcción.
- Construcción del eslabón: De acuerdo con los resultados del diseño se construirá con el proceso de mecanizado en el laboratorio de mecanizado de la Universidad Militar Nueva Granada.
- Construcción del prototipo de software: En esta fase es necesario trabajar con el controlador de software para enlazar el sistema con el entorno virtual que se diseñará.
- Protocolo experimental: El entorno virtual, el cual será el medio de prueba para posterior validación del sistema, permitirá al usuario realizar una tarea con diferentes requerimientos de habilidades motrices. Se diseñarán una prueba para comparar el sistema existente de 3 GDL con el sistema propuesto de 5 GDL. Con los resultados se pretende determinar la funcionalidad del conjunto sistema mecatrónico-ambiente virtual y si hay o no mejora a nivel de interactividad al usar un sistema háptico con un número mayor de GDL.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

2.1. ESTADO DEL ARTE

En esta sección se mostrará el estado del arte del tema a trabajar, para dar una ubicación conceptual sobre el mismo y así dar bases para el posterior análisis e implementación del proyecto, para hacer posible un mejor entendimiento del mismo y de esta forma cumplir con los objetivos planteados.

Falcon de la empresa *Novint Technologies, Inc* 2007, el dispositivo háptico, permite controlar un juego en tres dimensiones, y también da la sensación de tacto y fuerza de respuesta en tres dimensiones. El controlador de movimientos *Falcon* tiene movimientos de derecha e izquierda, hacia adelante y hacia atrás, como un ratón, pero también se mueve arriba y abajo. Cuando se mueve el mando del *Falcon* para interactuar con un objeto virtual o el medio ambiente, los motores del dispositivo se actualizan aproximadamente 1000 veces por segundo, lo que le permite sentir la textura, forma, peso, dimensión y dinámica. El *Falcon* permite controlar e interactuar con los juegos de una manera más realista, lo que le permite desarrollar la habilidad física real y la memoria muscular, añadiendo una nueva dimensión al juego.[1]

Phantom Omni de la empresa *Sensible Technologies, Inc*, es un dispositivo háptico compuesto de una estructura serial compuesta de varios eslabones dotados con un sensor de posición en cada articulación y algunos actuadores para realimentar fuerza. Actualmente se dispone de varios modelos de esta estructura, cuyo número de grados de libertad en posicionamiento varía desde 3 hasta 6, pudiendo recibir realimentación de fuerza a lo largo de todos o algunos de estos grados de libertad. El espacio de trabajo de los distintos modelos varía considerablemente desde los modelos iniciales a los superiores. El *Phantom* renueva el estado de sus fuerzas cada milisegundo, y presenta una alta resolución posicional.[2]

En el año 2005 se presenta la librería de código libre *CHAI 3D*, para desarrollo háptico en C++, visualización y simulación interactiva en tiempo real. *CHAI 3D* es compatible con varios dispositivos hápticos disponibles en el mercado de tres, seis y siete grados de libertad. Esta especialmente adecuada para la educación y la investigación, ofreciendo una plataforma sobre las extensiones que se pueden desarrollar. *CHAI 3D* da un paso importante hacia la creación amistosa en el desarrollador de mundos virtuales multimodales, mediante la estrecha integración háptica y la representaciones visuales de objetos, disminuyendo la complejidad de los dispositivos táctiles individuales.[3]

El robot de configuración delta es un robot paralelo que cuenta con 3 brazos que están unidos a una base, estos dispositivos cuentan con 3-DOF, traslación en los ejes x y z, esta configuración no permite realizar rotaciones, su cinemática es de tipo cerrado. El dispositivo *Novint Falcon*[1] tiene esta configuración.[7]

Al analizar el mecanismo del robot paralelo Delta y el establecimiento de sistema de coordenadas en tanto plataforma estática y plataforma móvil, se puede establecer el jacobiano, el cual permite la posibilidad de aproximar linealmente la función en un punto dado.[8]

El Dept. of Electronic Engineering, University of Salford de Londres en el año 2005 presentó una interfaz háptica de escritorio con el fin de entrenamiento pre operativo de cirugía abierta para remplazo total de cadera, centrada en el planeamiento de la incisión con la posición y tamaño requerido para acceder a la unión de la cadera.[22]

El Centro de Realidad Virtual de la Universidad Militar Nueva Granada desarrolló en el año 2008 un simulador de cirugía endoscópica endonasal con el fin de entrenamiento a cirujanos visualizado en un entorno virtual, este grupo de personas usa un entorno virtual en donde la cámara se desplaza de acuerdo con un modelo de navegación adecuado teniendo en cuenta las colisiones con las paredes de las estructuras anatómicas relacionadas.[11]

En Canadá en el año 2008 el Department of Computing Science of University of Alberta desarrolló un estudio sobre el entrenamiento de habilidades motrices con dispositivos hápticos, para ello usan un dispositivo Phantom de la empresa SensAble Technologies, con el fin de realizar la prueba experimental con diferentes trayectorias a seguir con el dispositivo. [20]

CSIRO ICT Centre en Australia hizo en el año 2009 la caracterización del dispositivo *Novint Falcon* para aplicaciones como robot manipulador. El controlador usa una forma similar de la configuración robot-delta.[19] Este documento incluye la cinemática del dispositivo *Novint Falcon*.

El grupo de Robótica de la Facultad de Mecatrónica, Universidad Politécnica de Pachuca en México realizó un estudio sobre la cinemática del *Phantom*

Omni, con el fin de evaluar la representación virtual de la operador humano y también definir la interacción con los objetos virtuales a través de programas de contacto usando un algoritmo de deformación, para generar imágenes 3d con el movimiento del manipulador háptico. En este estudio usaron el dispositivo Phantom. [25]

Experimental Robotics and Graphics Laboratory of Simon Fraser University de Canadá, en el año 2009 desarrollo un simulador de disección animal que permite estudiar la anatomía de los animales sin necesidad de sacrificar animales, cada órgano posee una textura diferente que se percibe con la realimentación de fuerza del sistema háptico, este software cuenta con detección de colisiones y deformación mecánica de objetos virtuales.[23]

Istituto Italiano di Tecnologia, en el año 2010 examina el procedimiento de inserción de agujas en el cuerpo ya sea para obtener muestras o inyectar fluidos con los simulaciones actuales, centrándose en el soluciones táctiles del hardware utilizado, son cinco dispositivos hápticos de uso comercial (*SensAble Omni Technologies Phantom* de Escritorio y Premium 1.5 de 6 DGL, *Falcon Novint* y *Imita Mantis*), se evalúa la eficacia para su uso en simulaciones de inserción de aguja. Se concluye, con el asesoramiento para usuarios de dispositivos para simulación de háptica.[24]

Department of Mechanical Engineering, University of Utah USA en el año 2010 construyó un dispositivo háptico de 5 GDL económico comercialmente, uniendo con un dispositivo mecánico dos dispositivos de 3 GDL *Novint Falcon*, con una aplicación en el entorno de realidad virtual CHAI 3D, para el uso del dispositivo desarrollado.[18] Sin embargo este dispositivo no cuenta con la capacidad de interactuar utilizando un botón sobre el eslabón de agarre.

Department of Mechanical & Aerospace Engineering, University at Buffalo Canadá en el año 2010 desarrolló un modelo cinemático para el uso un dispositivo háptico de 5 grados de libertad llamado HD2 construido con arquitectura paralela con manipulador vertical la cual es conocida por su alta inercia y soporte de carga. Este dispositivo está construido a partir de dos dispositivos *Sensable PHANToM Premium 1.5* en paralelo, eso hace que este tenga 2 efectores finales para el uso de un solo manipulador vertical.[16]

El departamento de Mecatrónica de la Universidad de Politecnica Timisoara de Rumania, en el año 2010 desarrolló una investigación del uso de dispositivos hápticos, su entorno virtual fue CHAI 3D, el cual permitía interactuar con el medio.[21]

Centre for Intelligent Systems Research Lab, de la Universidad Deakin University de Australia, en el año 2011 realizó un artículo el cual indica como se desarrolló una pinza de fijación a bajo costo, la cual está unida a dos dispositivos

hápticos *Phantom Omnis*, con el fin de agarrar objetos virtuales en múltiples puntos en el entorno virtual *CHAI 3D*. [12]

En Clausthal University de Alemania, en el año 2011 desarrolló un entorno virtual de alta inmersión debido a que su capacidad gráfica está limitada únicamente a la tarjeta de renderización gráfica usada, en este entorno se desarrollan tareas y juegos que el usuario ejecuta a una mano (3GDL) o a dos manos (6GDL), realizando una evaluación lúdica de la ejecución de la tarea comparando el desarrollo de tareas de 3 GDL con 6 GDL. [14] En resalta que el desarrollo de tareas de simulación háptica con mayor número de grados de libertad involucra más al usuario con la capacidad de desarrollar tareas más completas.

State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems de la Universidad Beihang de China, en el año 2011 afirmó que los dispositivos hápticos desempeñan un papel importante en la mejora de la inmersión de un sistema de simulación de cirugía dental, a través de las características de manipulación de cirugía dental típicas. [?]

El grupo Virtual Reality Group de RWTH Aachen University de Alemania, en el año 2011 desarrolló un sistema háptico bimanual usando de dos sistemas hápticos Phantom de la empresa *Sensible technologies* que cuenta cada uno con 6 GDL, 3 activos y 3 pasivos; con el fin de simular tareas más complejas en ambientes virtuales que requieren las dos manos, teniendo en cuenta del uso de una mano dominante que realiza la tarea importante ayudada o apoyada de la mano no dominante. Se desarrolló en el entorno virtual Chai 3d. [15]

Yun Lin y Yu Sun de Department of Computer Science and Engineering, University of South Florida EEUU, en el año 2011 desarrollaron un sistema de bajo costo uniendo dos dispositivos *Novint Falcon* unidos por una barra rígida el cual es capaz de aplicar una fuerza de 5 grados de libertad en la yema del dedo con gran precisión, con el fin de ser usado como plataforma de calibración para la proporción de fuerza aplicada por del dedo usando como sensor una cámara que mide el cambio de color en la uña. [17] Es interesante como usan el sistema de unión de dos *Novint Falcon* para controlar la fuerza aplicada por el dedo aplicando fuerzas con 5 GDL.

2.2. MARCO CONCEPTUAL

Ésta sección contiene básicamente teoremas y definiciones necesarias que constituyen el fundamento del proyecto realizado.

2.2.1. HÁPTICA

Háptica:

Se define como la impedancia que imprime un objeto o un sistema al ser manipulado con las extremidades.¹

La háptica, significa todo aquello referido al contacto, especialmente cuando éste se usa de manera activa, es todo el conjunto de sensaciones no visuales y no auditivas que experimenta un individuo. La palabra proviene del griego háptō (tocar, relativo al tacto). Háptica es el estudio de cómo combinar el sentido humano del tacto con un mundo generado por el ordenador.²

Sinestesia:

Se define como la percepción de estímulos que permiten el monitoreo de las sensaciones de posición con las extremidades respecto a la posición de las extremidades respecto a la posición del cuerpo ¹.Figura 2.1

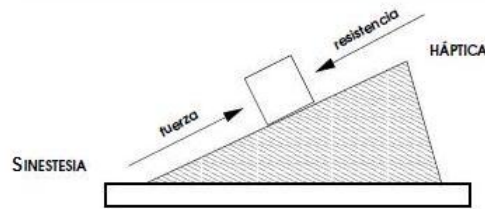


Figura 2.1: Sinestesia

Interfaz Háptico:

Un Interfaz Háptico es aquel dispositivo que interactúa con el ser humano mediante el sentido del tacto, permitiendo al usuario tocar, sentir o manipular objetos simulados en entornos virtuales y sistemas teleoperados. [10]

Algunos de los principales campos de aplicación de los interfaces hápticos son:

- Medicina: Simuladores quirúrgicos para entrenamiento médico. [11, 21, 20].

¹Tomado de: <http://www.maginvent.org/files/haptcontrolpr.pdf>

²Tomado de wikipedia: <http://es.wikipedia.org/wiki/Háptica>

- Educativo: Proporcionando a los estudiantes la posibilidad de experimentar fenómenos a escalas nano y macro, como entrenamiento técnico.
- Entretenimiento: Juegos de video y simuladores que permiten al usuario sentir y manipular objetos virtuales.[12, 23]
- Industria: Integración de interfaces hápticas en los sistemas CAD de tal forma que el usuario puede manipular libremente los componentes de un conjunto en un entorno inmersivo.[13]
- Artes gráficas: Exhibiciones virtuales de arte, museos, escultura virtual etc.

La importancia de los interfaces hápticos es determinante en la realización de tareas hápticas, o en las que se requiera un alto grado de entrenamiento, como pueden ser: tratamientos odontológicos, tomas de muestras de sangre, ensamblaje de maquinas complejas, entre otras. Estas ayudan a su vez, a incrementar la sensación de inmersión del usuario dentro de un entorno simulado, al proporcionar restricciones al movimiento de objetos.

Clasificación de los Interfaces hápticos:

Según Burdea los interfaces hápticos pueden clasificarse en tres grupos, según proporcionen: realimentación de fuerza, realimentación táctil, o realimentación propioceptiva, cada uno entrega información de un determinado campo, se debe seleccionar el tipo de interfaz a usar según la aplicación y sus características.[10]

- Interfaces que proporcionan realimentación de fuerza:

Aportan datos relacionados con la dureza, peso e inercia del objeto virtual y permiten adquirir datos como la geometría del objeto virtual, su peso, su rugosidad.

- Interfaces que proporcionan realimentación táctil:

Permiten al usuario sentir o percibir la dureza de una superficie, su rugosidad, seguir contornos lisos, o materiales elásticos, pero no características como su peso.

- Interfaces que proporcionan realimentación propioceptiva:

Proporcionan información acerca de la posición del cuerpo del usuario o su postura.

Elementos de una representación háptica:

Para realizar una representación háptica se cuenta con diversos elementos que se deben tener en cuenta los cuales son:

- Visualización
- Adquisición de datos modelados
- Fuerzas de retroalimentación
- Captura, almacenamiento y recuperación de datos hápticos
- Comprensión de datos hápticos.³

2.2.2. NOVINT FALCON

El *Novint Falcon* es dispositivo háptico comercial de bajo costo, usado principalmente como dispositivo de juego. Es un dispositivo de 3 GDL significa que tiene tres dimensiones de movimiento, éste permite recibir una sensación realista de contacto de objetos virtuales con respuesta de fuerza tridimensional.

Por medio del *gripper* del *Falcon*, se puede interactuar con objetos y entornos virtuales, por medio de texturas, superficies, siluetas, gravedad entre otras características dinámicas, la sensación de tacto es de gran fidelidad ya que los motores del dispositivo se actualizan aproximadamente 1000 veces por segundo.

El *Falcon* permite controlar e interactuar con los juegos de una manera más realista, lo que le permite desarrollar la habilidad física real y la memoria muscular, añadiendo una nueva dimensión al juego.



Figura 2.2: Dispositivo háptico *Novint Falcon*

³<http://es.scribd.com/doc/Diseño-de-un-dispositivo-haptico-para-modelado-virtual>



Figura 2.3: *Gripper Novint Falcon*

El espacio de trabajo del *Novint Falcon* es de 4 pulgadas en las tres dimensiones, la resolución de la posición es de 400 ppp (puntos por pulgada) y puede producir sensación de fuerza de aproximadamente 8 newtons. El dispositivo cuenta con 3 encoders que leen posición de los brazos, 4 botones y un LED de identificación del estado actual del dispositivo como muestra la figura 2.2.

El *Novint Falcon* cuenta con un *gripper* desmontable como muestra la figura 2.3, este controlador tiene 4 botones en la parte superior estos sirven para interactuar con el ordenador, Puede ser sustituido con un *gripper* de propósito especial tal como una empuñadura de pistola para juegos de acción, es necesario usar *gripper* ya que si el *Falcon* no detecta alguno, este no funciona.

2.2.3. CHAI 3D

CHAI 3D es un API (Interfaz de programación de aplicaciones) gráfico de C++ para desarrollo háptico, de visualización y simulación interactiva en tiempo real. Esta API soporta diferentes dispositivos hápticos. *CHAI 3D* tiene licencia GPL (licencia publica general)⁴ pero cuenta también con una licencia para edición profesional. Se desarrolló debido a la necesidad de una API que soportara dispositivos hápticos de diferentes fabricantes.⁵

Está especialmente adecuada para la educación y la investigación. *CHAI 3D* hace posible el desarrollo amigable de mundos virtuales, mediante la estrecha integración háptica y representación visual de objetos, disminuyendo la complejidad del uso de dispositivos hápticos individuales.

En el transcurso de los últimos años, *CHAI 3D* se ha convertido en uno de los recursos más populares de código libre con multi-plataforma háptica, y se ha utilizado en un gran número de proyectos de investigación y producción, en áreas tan diversas como juegos, simuladores, software educativo, arte interactivo, visualización científica y aplicaciones médicas.

Aunque no existen tutoriales de *CHAI 3D*, su código fuente está muy bien documentado y es fácil de entender. Los Autores de *CHAI 3D* recomiendan aprender con los ejemplos libres publicados por ellos. Con este método se puede

⁴<http://www.gnu.org/licenses/gpl.html>

⁵http://www.ms.mff.cuni.cz/~kadlp7am/kadlecek_petr_bachelor_thesis.pdf

obtener una clara visión de la API, pero no permite entender con claridad algunas características fundamentales, por lo que se requiere leer el código fuente eventualmente.⁶

La biblioteca *CHAI 3D* se divide en varios módulos y clases que proporcionan tareas específicas: dispositivos, gráficos, matemáticas, títulos, escenografía, herramientas hápticas, efectos hápticos, renderización de fuerza, detección de colisiones, temporizadores, ventanas, Motor dinámico gel y motor dinámico ODE, ver anexo 1.

Dispositivos CHAI 3D

Soporta dispositivos de empresas como *Force Dimension*, *Novint Technologies*, *MPB technologies* y *Sensable technologies*⁷. Cuenta con un dispositivo virtual para sistema operativo *Microsoft Windows* especialmente desarrollado para lectura háptica experimental⁸. Este contiene una representación háptica del espacio de trabajo, la herramienta háptica y la fuerza como un vector figura 2.4 y permite al usuario mover la herramienta háptica en 3 dimensiones utilizando el ratón del ordenador y el teclado.[6]

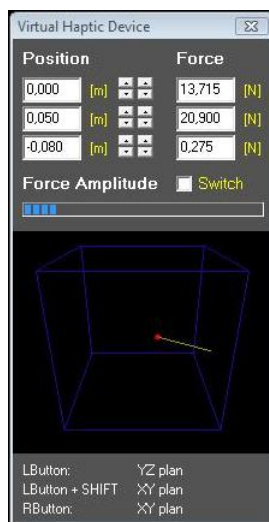


Figura 2.4: Dispositivo háptico virtual de Windows

Escenario

El escenario de *CHAI 3D* contiene objetos con siluetas y mallas, herramienta, cámaras virtuales y luces como lo muestra la figura 2.5.

⁶<http://www.chai3d.org/coding.html>

⁷<http://www.chai3d.org/support.html>

⁸<http://www.stanford.edu/class/cs277/>

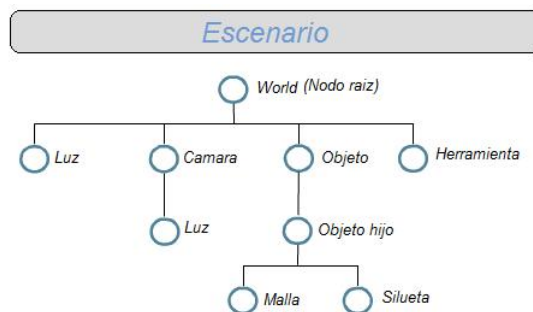


Figura 2.5: Estructura Escenario *CHAI 3D*

Objetos

Existe una clase principal para todos los objetos en la escena gráfica esta es `cGenericObject`. El objeto genérico crea una estructura de árbol de objetos usando una clase de arreglo estándar de objetos hijos en un miembro `m_children`. Todos los métodos para modificación de objetos o para establecer propiedades de objetos permiten la propagación de estos cambios a los objetos hijos con una función de parámetros opcional `a_affectChildren`, la cual por defecto no viene establecida. El escenario de *CHAI 3D* tiene una clase raíz nodo, la cual contiene todos los objetos en una escena llamada `cWorld`. Esta clase es esencial para habilitar la comunicación con las imágenes y con el sistema háptico. Formas de objetos estándar:

- Esfera (`cShapeSphere`) definida por un radio.
- Toroide (`cShapeTorus`) definida por el radio interno y el externo.
- Línea (`cShapeLine`) definida por dos puntos como vectores tridimensionales.

Para añadir un objeto en el escenario gráfico se llama a un constructor del objeto específico con propiedades definidas (por ejemplo, radio de la esfera) y añadiéndolo como hijo (usando el método `addchild`) en otro objeto que ya se encuentre en la escena o directamente del nodo raíz `World`. El renderizado gráfico y háptico es realizado a continuación por el nodo raíz recursivamente a los hijos. Junto con los objetos estándar de la API, es posible cargar complejos objetos de dos formatos:

- `.OBJ` - formato de archivo de Wavefront technologies
- `.3DS` - formato de archivo de 3d Studio AutoDesk

Los dos formatos de objetos contienen una lista de vértices con sus posiciones relativas, una lista de polígonos que forman el objeto, el material, la textura de referencia y mapeo de la textura por coordenadas como se puede ver en la Figura 2.2.3.[6]



Figura 2.6: Estructura objetos virtuales

Cámara y Luces

La cámara virtual de *CHAI 3D* inicia el proceso de renderizado gráfico llamando el método *renderView* con unos parámetros de la ventana como son las dimensiones de alto y ancho en pantalla y el índice de imagen que identifique el renderizado estéreo. La cámara virtual luego renderiza todos los objetos de el escenario *World* con todos los hijos agregados. La cámara utiliza tres componentes para mostrar el escenario como se pueden ver en la imagen 2.7:

- Posición de la cámara (Vector 3d)
- Punto de vista (Vector 3d)
- Vector hacia arriba (Vector 3d)

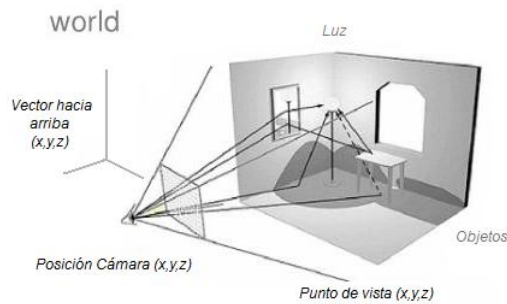


Figura 2.7: Cámara virtual *CHAI 3D*

La clase *cCamera* está escrita de manera modular permitiendo modificar la visualización del escenario añadiendo una nueva clase que altera la matriz de visualización.

Como se indica en la guía de referencia, la cámara mira hacia abajo en el eje *x* negativo el cual es convención estándar en la robótica en general. Esta convención del sistema coordinado puede ser confusa especialmente mientras

se trabaja con mallas complejas editadas con aplicaciones con diferente sistema coordinado.

El sistema de luces fue también adaptado de la librería OpenGL y provee las funciones básicas en la clase `cLight`. Hija del nodo raíz, administra una lista de Fuentes de luz, en las que el programador solo establece las propiedades y se agrega a la luz directamente en el escenario o adhiere la luz a la cámara como hija de instancia de la cámara como se puede ver en la Figura 2.5.[6]

Herramienta Háptica

La representación gráfica en el escenario de un dispositivo háptico es llamado herramienta. La clase abstracta que representa todas las herramientas en el escenario es `cGenericTool`. La única herramienta específica que provee *CHAI 3D* es una herramienta de 3 GDL identificada como `cGeneric3dofPointer`.

La herramienta requiere de un puntero para representar el controlador del dispositivo háptico. El puntero genérico de 3 GDL muestra la herramienta en el escenario como una esfera, aunque existen dos mallas representando la herramienta:

- Una malla del dispositivo (`m_deviceMesh`) la cual representa la posición real del dispositivo háptico.
- Una malla de proxy (`m_proxyMesh`) la cual representa un modelo del dispositivo háptico en el entorno virtual respetando las leyes físicas.

La malla de la herramienta Proxy es afectada por las restricciones físicas mientras que la malla del dispositivo háptico no, pero envía al dispositivo háptico la fuerza de realimentación ejercida por las restricciones físicas, ver figura 2.2.3.

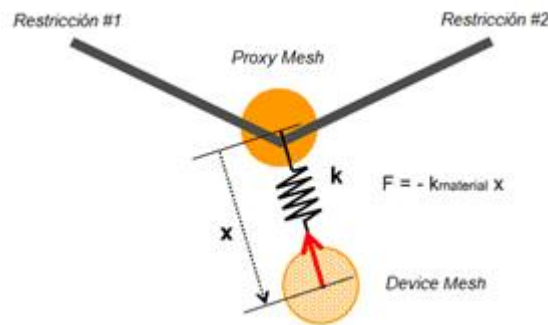


Figura 2.8: Representación de las 2 mallas de la herramienta háptica. Malla Proxy y malla del dispositivo

La malla de la herramienta Proxy es afectada por las restricciones físicas

mientras que la malla del dispositivo háptico no pero envía al dispositivo háptico la fuerza de realimentación ejercida por las restricciones.

El modelo de fuerza está definido por dos clases, `cProxyPointForceAlgo` que detecta la colisión contra los objetos virtuales y `cPotentialFieldForceAlgo` que procesa la interacción local relativa a los efectos hápticos. Una fuerza global contiene asignados efectos hápticos locales y fuerzas de interacción computadas basados en las propiedades del dispositivo háptico (ejemplo rigidez).

La detección de la interacción no siempre es precisa, especialmente en las mallas complejas y en el modelo proxy se queda atascado a veces generando una fuerza excesiva. La herramienta trabaja en un espacio de trabajo determinado por el radio. Es posible cambiar el radio y la posición del espacio de trabajo y aun también su rotación relativa en el escenario.

La herramienta está generalmente unida a la cámara de modo que el área de trabajo corresponde a la visión de la cámara.

Efectos Hápticos

El escenario de *CHAI 3D* proporciona un conjunto de efectos hápticos los cuales pueden ser asignados a objetos. Estos efectos son calculados usando una interacción local método `computeLocalInteraction` el cual está implícito en la superficie del objeto. Los efectos hápticos de la clase base abstracta `cGenericEffect` en la API son los siguientes:

- Efecto Magnético `cEffectMagnet` provee un efecto magnético cerca al objeto.
- Efecto adhesivo - deslizante `cEffectStickSlip` provee un efecto de adherencia de un objeto sobre otro causada por la fricción, como un borrador sobre un escritorio.
- Efecto Superficial `cEffectSurface` provee un efecto superficial básico de la herramienta empujando contra el objeto.
- Efecto vibratorio `cEffectVibrations` provee un efecto de una vibratorio con una frecuencia específica y amplitud sobre un objeto
- Efecto viscosidad `cEffectViscosity` provee un efecto de la herramienta moviéndose a través de un fluido

Todos los efectos son muy sensitivos con un buen ajuste de propiedades tales como el ajuste de rigidez máxima del dispositivo háptico. Un cambio relativamente pequeño de las propiedades puede hacer una gran diferencia en la percepción del efecto y a veces incluso una diferente operación puede dar como resultado un diferente comportamiento.

Colisiones CHAI 3D

Cuenta con un sistema de colisiones para objetos el cual permite determinar una colisión entre el objeto virtual con el puntero háptico o con otros objetos en

el escenario gráfico, recurriendo a algoritmos estándar de detección de colisiones proporcionados en ella. Cuenta con 2 métodos de detección de colisiones:

- `cCollisionBrute` un algoritmo de detección de fuerza bruta.
- `cCollisionAABB` (Axis Aligned Bounding Box) caja de ejes de coordenadas apropiado para detección de colisión de objetos con complejos mallados.

Otras clases de CHAI 3D

Existen algunas otras clases auxiliares en *CHAI 3D* que permite al programador gastar más tiempo en la lógica de la aplicación que en crear sistemas específicos funcionales.

Gráficas

Hay muchas clases las cuales ayudan controlando las gráficas como parte del escenario como: clase para definir el color de un objeto (`cColor`), vértices (`cVertex`), añadir textura de OpenGL (`cTexture2D`), establecer el material de un objeto (`cMaterial`), entre otros.

Matemática

La clase `cMaths` provee funciones muy útiles tal como valor absoluto, interpolación lineal o sujeción entre otras. La clase `cMatrix3D` define una matriz de tres dimensiones y la clase `cVector3D` define un vector de 3 dimensiones, estas se utilizan para representar rotaciones, traslaciones de objetos y parámetros en el escenario. La Clase `cString` es muy útil ya que facilita la conversión entre valores numéricos a cadena de caracteres.

Timers

Para renderizado háptico en tiempo real generalmente es necesario un timer preciso para calcular el tiempo de la iteración gráfica y háptica. Contiene una clase llamada `cPrecisionClock` la cual provee un timer de alta resolución con métodos de inicio, parada y de reseteo. El timer usa funciones muy precisas de conteo y de frecuencia con resolución del orden por debajo de microsegundos en la plataforma *Microsoft Windows*.

Letreros

Es la forma para crear interfaces gráficas 2D en frente de la escena tridimensional. Una clase `cBitmap` carga archivos de imagen en los formatos BMP y TGA usando la clase `cImageLoader` en todas las plataformas. En *Microsoft Windows CHAI 3D* usa `OleLoadPicturePath` la cual puede cargar mas formatos de archivos de imágenes.

Modulo ODE

La librería *CHAI 3D* no tiene implementado su propia simulación dinámica para cuerpos rígidos. Existe sin embargo un modulo que conecta el escenario de

CHAI 3D con la librería ODE (Motor de dinámica abierta).⁹

La comunicación de *CHAI 3D* con ODE es manejada por las clases `cODE`, `cODE-World` y `cODEGenericBody`. La API contiene las librerías ODE precompiladas para vincular la dinámica y estática con doble precisión. Las definiciones del preprocesador deben estar muy bien establecidas en orden para correr una aplicación correcta sin errores. Es necesario indicar a la librería ODE usar doble precisión agregando a preprocesador el símbolo `dDouble`. Como información puede ser muy útil el manual del modulo en la API o al menos los comentarios en el código recurso de los ejemplos con el modulo ODE para programadores son conocimiento en la librería ODE. Cada objeto en la simulación ODE puede ser agregada a un `cODEWorld` específico. Tal objeto es definido como un cuerpo genérico ODE con propiedades de simulación física e imagen en el escenario gráfico.

El modulo ODE habilita la creación de cajas dinámicas, esferas, capsulas y mallas de complejas objetos. Se requiere de planos estáticos que son los límites que contienen los objetos ODE. La gravedad global puede ser ajustada como un vector tridimensional describiendo una fuerza. Llamando el método de actualización dinámica del mundo, `ODE updateDynamics` con el parámetro de tiempo de iteración, se actualiza la simulación.

2.2.4. CINEMÁTICA DIRECTA

Consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, conocidos los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot.¹⁰

Algoritmo de Denavit-Hartenberg para la obtención del modelo cinemático directo.

Denavit-Hartenberg propusieron en 1955 un método matricial que permite establecer de manera sistemática un sistema de coordenadas (S_i) ligado a cada eslabón i de una cadena articulada, pudiéndose determinar a continuación las ecuaciones cinemáticas de la cadena completa.

Según la representación D-H, escogiendo adecuadamente los sistemas de coordenadas asociados para cada eslabón, será posible pasar de uno al siguiente mediante 4 transformaciones básicas que dependen exclusivamente de las características geométricas del eslabón.

Estas transformaciones básicas consisten en una sucesión de rotaciones y traslaciones que permitan relacionar el sistema de referencia del elemento i con el sistema del elemento $i - 1$. Las transformaciones en cuestión son las siguientes:

Parámetros.

⁹<http://www.ode.org/>

¹⁰http://www.aurova.ua.es/robolab/EJS4/PRR_Suficiencia_Intro_2.html

1. Rotación alrededor del eje Z_{i-1} , θ_i : ángulo que forman los ejes X_{i-1} y X_i , sobre el plano perpendicular a Z_i . El signo lo determina la regla de la mano derecha.
2. Traslación a lo largo de Z_{i-1} , d_i : es la distancia a lo largo del eje Z_{i-1} desde el origen del sistema S_{i-1} hasta la intersección del eje Z_i , con el eje X_i . En el caso de articulaciones prismáticas será la variable de desplazamiento.
3. Traslación a lo largo de X_i , a_i : distancia entre los ejes Z_{i-1} y Z_i , a lo largo de X_i . El signo lo define el sentido de X_i .
4. Rotación alrededor del eje X_i , α_i : es ángulo entre el eje Z_{i-1} y Z_i , sobre el plano perpendicular a X_i . El signo lo da la regla de la mano derecha.

Dado que el producto de matrices no es conmutativo, las transformaciones se han de realizar en el orden indicado. De este modo se tiene que:

$$A_{i-1}^i = T(z, \theta_i) T(0, 0, d_i) T(a_i, 0, 0) T(x, \alpha_i) \quad (2.1)$$

Y realizando el producto de matrices:

$$A_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i) \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i) \sin(\theta_i) & a_i \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) \cos(\theta_i) & a_i \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

donde θ_i , d_i , α_i , a_i son los parámetros D-H del eslabón i . De este modo, basta con identificar los parámetros θ_i , d_i , α_i , a_i , para obtener matrices A y relacionar así todos y cada uno de los eslabones del robot.

Como se ha indicado, para que la matriz A_{i-1}^i , relacione los sistemas (S_i) y (S_{i-1}), es necesario que los sistemas se hayan escogido de acuerdo a unas determinadas normas. Estas, junto con la definición de los 4 parámetros de Denavit-Hartenberg, conforman el siguiente algoritmo para la resolución del problema cinemático directo:

1. Numerar los eslabones comenzando con 1 (primer eslabón móvil de la cadena) y acabando con n (ultimo eslabón móvil). Se numerara como eslabón 0 a la base fija del robot.
2. Numerar cada articulación comenzando por 1 (la correspondiente al primer grado de libertad y acabando en n).

3. Localizar el eje de cada articulación. Si esta es rotativa, el eje será su propio eje de giro. Si es prismática, será el eje a lo largo del cual se produce el desplazamiento.
4. Para i de 0 a $n - 1$, situar el eje Z_i , sobre el eje de la articulación $i + 1$.
5. Situar el origen del sistema de la base (S_0) en cualquier punto del eje Z_0 . Los ejes X_0 e Y_0 se situaran de modo que formen un sistema dextrógiro con Z_0 .
6. Para i de 1 a $n-1$, situar el sistema (S_0) (solidario al eslabón i) en la intersección del eje Z_i con la línea normal común a Z_{i-1} y Z_i . Si ambos ejes se cortasen se situaría (S_i) en el punto de corte. Si fuesen paralelos (S_i) se situaría en la articulación $i + 1$.
7. Situar X_i en la línea normal común a Z_{i-1} y Z_i .
8. Situar Y_i de modo que forme un sistema dextrógiro con X_i y Z_i .
9. Situar el sistema (S_n) en el extremo del robot de modo que Z_n coincida con la dirección de Z_{n-1} y X_n sea normal a Z_{n-1} y Z_n .
10. Obtener θ_i como el ángulo que hay que girar en torno a Z_{i-1} para que X_{i-1} y X_i queden paralelos.
11. Obtener d_n como la distancia, medida a lo largo de Z_{i-1} , que habría que desplazar (S_{i-1}) para que X_i y X_{i-1} quedasen alineados.
12. Obtener a_i como la distancia medida a lo largo de X_i (que ahora coincidiría con X_{i-1}) que habría que desplazar el nuevo (S_{i-1}) para que su origen coincidiese con (S_i).
13. Obtener α_i como el ángulo que habría que girar entorno a X_i (que ahora coincidiría con X_{i-1}), para que el nuevo (S_{i-1}) coincidiese totalmente con (S_i).
14. Obtener las matrices de transformación A_{i-1}^i .
15. Obtener la matriz de transformación que relaciona el sistema de la base con el del extremo del robot $T = A_0^1, A_1^2, \dots, A_{n-1}^n$.
16. La matriz T define la orientación (submatriz de rotación) y posición (submatriz de traslación) del extremo referido a la base en función de las n coordenadas articulares.¹¹

¹¹ Algoritmo de Denavit-Hartenberg para la obtención del modelo.
<http://148.202.12.20/~cin/robotic/tarease/dh/dh.htm>

Capítulo 3

INGENIERÍA DEL PROYECTO

En el presente capítulo se presenta de manera ordenada la forma en que se llevó a cabo el proyecto dividido en dos etapas: el análisis, y diseño del dispositivo.

3.1. ANÁLISIS DEL PROBLEMA

El análisis del problema se contempla como una etapa donde se busca la comprensión de las necesidades y requerimientos a tener en cuenta en el diseño del sistema, mediante la definición de los componentes del sistema, sus restricciones, su estructura y su funcionamiento, definiendo con claridad los subsistemas que lo componen así como la función de cada uno de ellos, objetivos del análisis:

- Determinar los requerimientos del sistema.
- Establecer el modelo del sistema y de sus respectivos subsistemas.
- Describir las variables y parámetros del sistema.

Requerimientos del sistema

El sistema háptico diseñado deberá contar con las siguientes características mínimas de funcionalidad:

- a. El dispositivo debe contar con 5GDL de movimiento.
- b. El sistema debe tener retroalimentación de fuerza.
- c. Debe poder cambiar el sistema de funcionamiento entre 3 GDL y 5 GDL.

3.1.1. Modelo conceptual del sistema

En esta parte del análisis se muestra un diagrama de bloques representativo del sistema, donde se incluyen los subsistemas que lo conforman. Posteriormente,

están los diagramas de cada subsistema con los elementos que hacen parte de él, para poder identificar las variables y parámetros que afectan a cada uno de éstos.

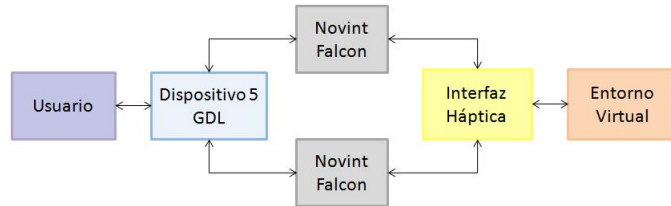


Figura 3.1: Arquitectura interfaz háptica

El sistema de 5 GDL cuenta con un subsistema mecánico que consta de la herramienta de agarre y los elementos necesarios para unir los *Falcon*, el usuario interactúa a través del sistema mecánico con la herramienta de agarre, produciendo el movimiento de los *Falcon*, estos sensan y entregan la señal de la velocidad y posición del dispositivo, esta información es enviada a la interfaz háptica, es la encargada construir un escenario y recrear una simulación en el entorno virtual con la información recibida por los *Falcon*.

Modelo conceptual subsistemas

Sistema mecánico dispositivo 5 DGL

Es el desarrollo realizado para unir los *Falcon*, permitiendo interactuar con el mediante la herramienta de agarre, esta cuenta con un botón el cual acciona el botón principal del *gripper* del *Novint Falcon*.

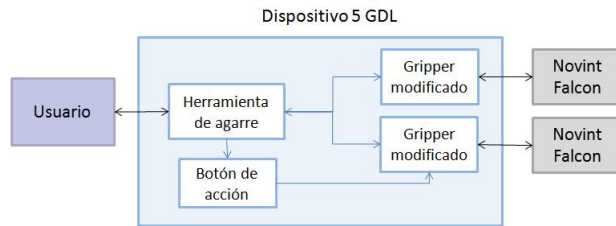


Figura 3.2: Diagrama de bloques dispositivo mecánico 5 GDL

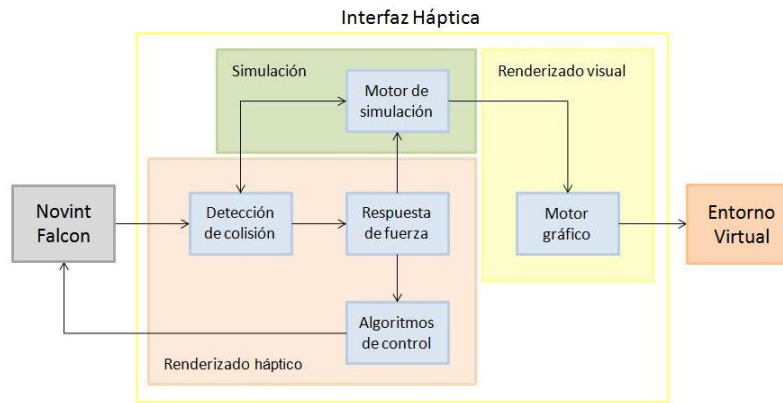


Figura 3.3: Interfaz háptica

Interfaz háptico

La interfaz háptica cuenta con tres sub sistemas:

Renderizado háptico Está dividido en tres bloques. *Detección de colisión* este proporciona información sobre las colisiones que ocurren con el cursor del *Falcon* en el entorno virtual. *Fuerza de Respuesta* es la interacción entre la fuerza del cursor y los objetos virtuales entregando su respuesta al *algoritmo de control*; este último retorna al dispositivo una fuerza aproximada de la interacción en el escenario en el entorno virtual.

Simulación El motor de simulación recibe la detección de colisión y la respuesta de fuerza experimentada en el escenario calculando el comportamiento del entorno virtual a través del tiempo para devolver a su vez una respuesta a la *detección de colisión* y al *motor gráfico*.

Renderizado Visual Recibe la información del motor de simulación para construir el escenario gráfico. un motor gráfico es aquel que usa gráficas simples, que no puede mostrar las 3d reales. Lo que hace es simular efectos 3D mediante la organización de gráficos en 2D.

3.1.2. Flujo de información y definición de las variables del sistema

La figura 3.4 describe el flujo de la información humano maquina del sistema. Este proceso inicia en el momento en que el usuario envía la orden desde el motor de comando a sus músculos de manipular el dispositivo háptico, el movimiento realizado en el *grripper* del dispositivo háptico es sentido por 3 encoder, cada uno ubicado en una extremidad del dispositivo, enviando un tren de pulsos a

el ordenador para determinar la posición y velocidad del *gripper*. El ordenador contiene el motor de realidad virtual el cual es el encargado de construir el escenario donde el usuario interactúa realizando la tarea deseada. La información de posición entregada por el dispositivo es procesada representando esta información en el entorno virtual, esta información es a la vez procesada enviando la señal de interacción virtual a los actuadores del dispositivo, entregando la sensación de tacto la cual es detectada por la piel enviando la señal al cerebro.

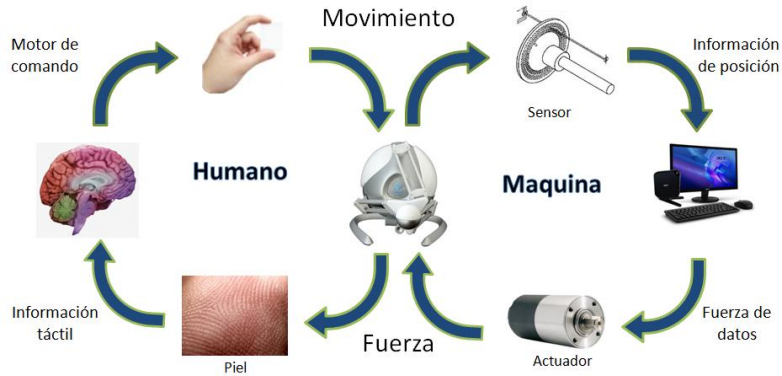
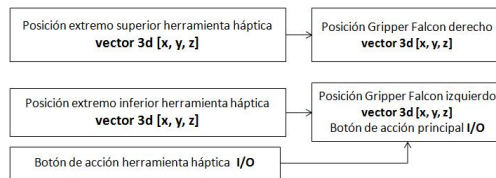


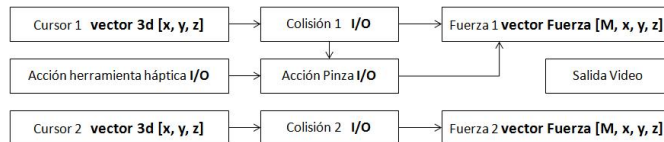
Figura 3.4: Flujo de la información del sistema

Variables del sistema

Sub sistema mecánico



Entorno virtual



3.2. DISEÑO

Esta sección contiene todo el desarrollo del diseño del sistema, dividido en cuatro subsecciones. Diseño mecánico, diseño del sistema háptico, diseño del software y finalmente el protocolo experimental.

3.2.1. DISEÑO MECÁNICO

El propósito del sistema desarrollado es poder usar los 2 *Novint Falcon* de 3 GDL disponibles en el Centro de Realidad Virtual de la Universidad Militar Nueva Granada, para ser configurado en forma de herramienta de barra vertical con 5 GDL cuando los dispositivos *Novint Falcon* de 3 GDL están en su posición cero.

El diseño parte de un sistema mecánico diseñado por el departamento de ingeniería mecánica de la universidad de Utah en EEUU para unir 2 *Novint Falcon*[18], al cual se le realizaron cambios por diferentes razones, entre las más destacadas están: cambio del material de diseño debido a su elevado costo, diferente uso de la herramienta de agarre, falta de acceso a materiales.

Iniciando el proceso de diseño se seleccionó el material a utilizar, se requería un material con buena resistencia mecánica, ligero, comercial, fácil de conseguir y económico, por esto se eligió Empack Pead 200 (polietileno de alta densidad).

El polietileno de alta densidad es un polímero que se caracteriza por:

- Excelente resistencia térmica y química.
- Muy buena resistencia al impacto.
- Es sólido, incoloro, translúcido, casi opaco.
- Muy buena procesabilidad.
- Es flexible, aún a bajas temperaturas.
- Es tenaz. Es más rígido que el polietileno de baja densidad.
- Presenta dificultades para imprimir, pintar o pegar sobre él.
- Es muy ligero. Su densidad es igual o menor a 0.952 g/cm³.
- No es atacado por los ácidos, resistente al agua a 100°C y a la mayoría de los disolventes ordinarios.¹

Siguiendo el proceso de diseño se modifica el *gripper* del *Novint Falcon*, ya que requiere que pueda soportar el peso del nuevo ensamble para la unión de ambos dispositivos hápticos, esto se hace con una placa plana que reemplaza la parte inferior del *gripper*, la pieza diseñada posee tres agujeros donde entran los

¹http://es.wikipedia.org/wiki/Polietileno_de_alta_densidad

tornillos que mantienen cerrado el *gripper*, esta pieza cuenta también con dos agujeros frontales roscados donde entran los tornillos encargados de sujetar la placa vertical detallada posteriormente.

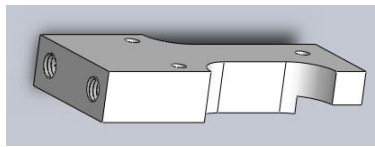


Figura 3.5: Placa horizontal para modificar el *gripper* del *Novint Falcon*

Para modificar los *grippers* disponibles, el primer paso es remover la parte inferior, para ello se deben remover los 3 tornillos de sujeción, estos mismos tornillos servirán para asegurar la pieza diseñada al *gripper*, después de reemplazar la pieza y de ensamblarla el resultado debe ser como la figura a continuación 3.6.

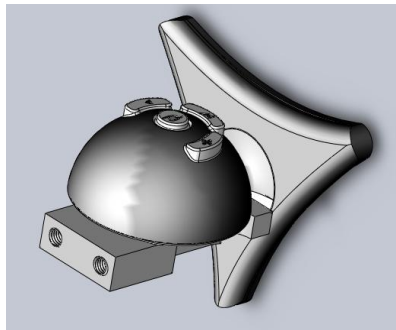


Figura 3.6: Gripper modificado

Los tornillos de sujeción de las placas verticales del *gripper* con las horizontales, son tornillos *phillips* M5 de 3/4" de largo.

Las placas verticales son 2, son de forma rectangular y cuentan con tres agujeros, 2 en la parte superior donde atraviesan los tornillos que sujetan la placa horizontal y uno centrado en la parte inferior, la primera placa sujeta a la placa horizontal del *gripper* hacia abajo y la segunda placa sujeta el otro *gripper* hacia arriba, esto con el fin de que la herramienta de agarre pueda quedar en forma vertical.



Figura 3.7: Placa Vertical sistema mecánico

Cada placa vertical va sujeta a un cilindro horizontal por el agujero centrado en el extremo inferior, para esto se requieren tornillos *phillips* M5 de 1" de largo. Para cada *gripper* se debe hacer un ensamble como el de la figura 3.8, la única diferencia entre ellos es la dirección de la placa vertical como se menciona anteriormente.

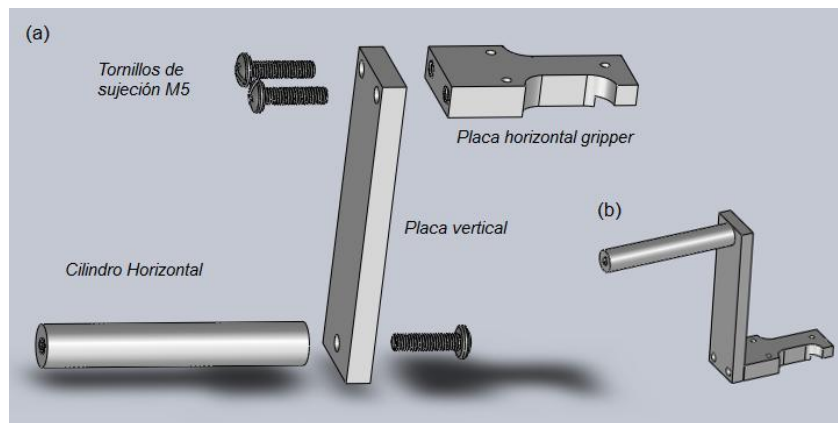


Figura 3.8: (a) Ensamble 1. sistema mecánico *gripper* izquierdo. (b) *gripper* derecho

Al final de cada cilindro horizontal debe ir ubicada una rótula unida a la herramienta de agarre, como la que se observa en la figura 3.9. Una rótula es un componente mecánico estandarizado que se auto-alinea y permite la ejecución de movimientos de alineación multi-direccional.²

Estás rótulas permiten desalinearse su aro interior, esto quiere decir que después de ensamblado todo el sistema mecánico, la herramienta de agarre podrá producir rotaciones sobre los ejes de giro X y Y moviendo así cada *Falcon* independientemente.

El objetivo inicial era usar dos rótulas de doble vástago macho, esto no fue posible ya que estas no son comerciales en Colombia, por consiguiente fue necesario adquirir 2 rótulas sencillas con un solo vástago macho, *ver anexo 2*.

Para que las rótulas tuvieran el segundo vástago se adquirieron 2 tornillos de 1/4" de 1" de largo y se mecanizaron como se ve en la imagen 3.9a dejando la cabeza cilíndrica de 5mm de diámetro que luego fueron añadidos a las rótulas

²<http://www.soltecnica.com/doc/es-rotulas-skf.pdf> , p4.

por presión. El resultado fue una rótula de doble vástago macho figura 3.9b, con las mismas propiedades de movimiento que la deseada inicialmente.

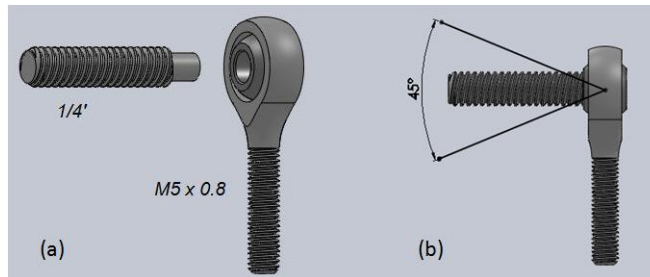


Figura 3.9: Modificación de la rótula. (a) Tornillo mecanizado añadido. (b) Resultado rótula.

La última pieza es la herramienta de agarre, de donde el usuario sujeta el dispositivo diseñado, la herramienta es una barra de 16 cm, con 2 agujeros roscados uno en cada extremo, donde entran las rótulas con el vástago de 1/4"; cuenta también con un agujero donde entra un botón pulsador, con este el usuario puede accionar el botón principal del *gripper*.

Bla bla bla.

La herramienta de agarre tiene una longitud confortable para la mano, está diseñada para ser agarrada como una pinza, la cual se acciona con el botón en la parte inferior, esta puede rotar libremente en el eje *Z* para buscar un mejor agarre más confortable.

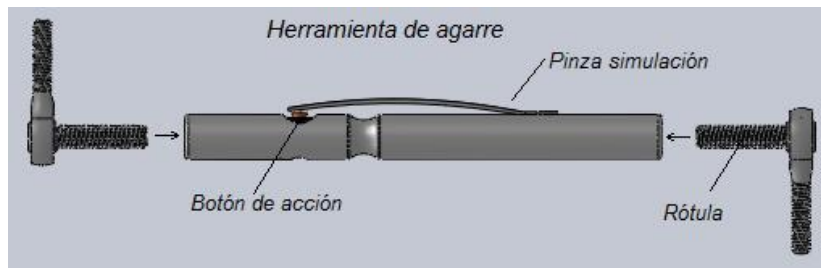


Figura 3.10: Ensamble 2. herramienta de agarre vertical, gráfica girada 90°.

Finalmente con los ensambles 1 del *gripper* izquierdo y derecho Figura 3.8 y el ensamble 2 de la herramienta de agarre, ya se puede unir todo el dispositivo de 5 GDL quedando de la siguiente manera:

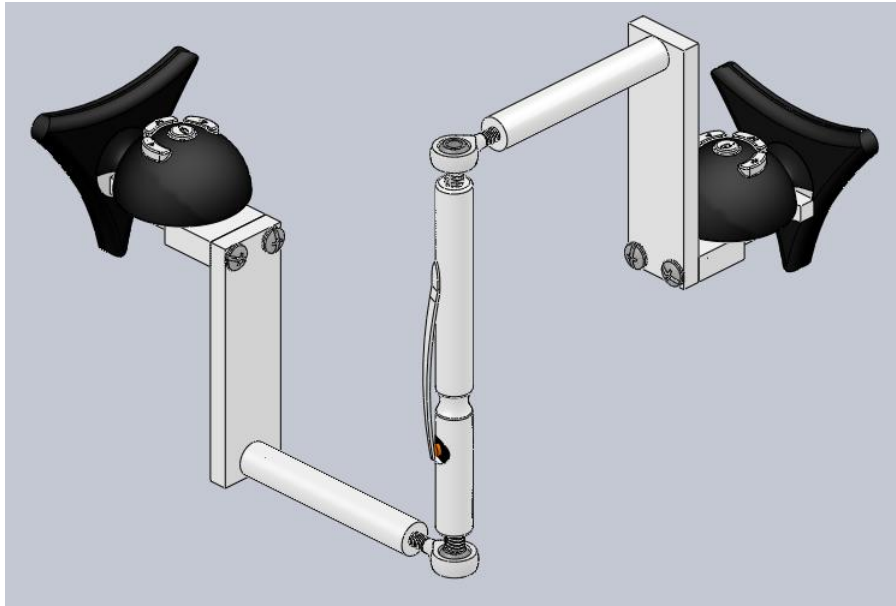


Figura 3.11: Ensamble completo dispositivo 5 GDL.

3.2.2. DISEÑO DEL SISTEMA HÁPTICO

Para el diseño del sistema háptico se requiere coordinar las fuerzas individuales de los *Falcon* de 3 GDL de tal manera que el usuario experimente con ambos como si usara un solo dispositivo de 5 GDL.

Se debe definir un sistema coordinado global de tal manera que cuando los *Falcon* estén en su respectiva posición cero, la herramienta de agarre esté también en su posición cero y la herramienta en la aplicación del *software* también.

Se debe trasladar el eje coordinado de cada *gripper* al punto donde se encuentran las rótulas en los extremos de la herramienta de agarre, para esto se debe rotar las coordenadas de cada dispositivo en el eje Z, y luego trasladarlo un medio de la longitud de la barra en el eje Z.

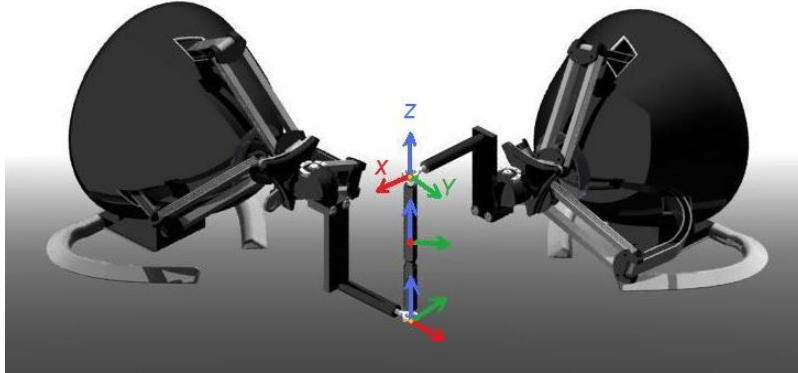


Figura 3.12: Ejes coordenados de los dispositivos hápticos

El nuevo sistema coordenado quedará como el sistema original de 3 GDL: el eje Z será representado verticalmente, el eje Y será representado horizontalmente, y el eje X será representado hacia el usuario como se ve en la figura 3.12.

Entonces en el sistema modificado, cuando se esté refiriendo al *Falcon* Izquierdo se estará refiriendo a la rótula frente a este *Falcon*, y al referirse al *Falcon* derecho se estará refiriendo a la rótula frente al *Falcon* derecho.

El sistema coordenado de cada *Falcon* fue rotado 45° en Z como ilustra la figura 3.12 . El *Falcon* derecho -45° y el izquierdo 45° , quedando así sus ejes X perpendiculares uniéndose en el punto en donde se encuentra la herramienta de agarre. Según la cinemática directa para obtener la posición del nuevo sistema mecánico se tuvo en cuenta las coordenadas base y con la matriz homogénea de transformación podrá obtener la posición en el mundo virtual. Se toma la matriz de rotación respecto a Z, la cual cumple con la condición (rotar el eje 45° y -45° respectivamente para cada *Falcon*).

Con la rotación se hace que las coordenadas de cada *Falcon* queden con la misma orientación, que las coordenadas del sistema de 5 (GDL), pero ahora hay que llevarlo hasta el centro del sistema de 5 (GDL), para que tengan la misma orientación y posición. Para esto se traslada en el eje Z la mitad de lo que mide la barra ya que para que llegue a este punto debe compensar la medida en cada *Falcon*.

Para tener más claridad de lo anteriormente dicho se usaron los parámetros de *Denavit-Hartenberg*.

Articulación	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	-45°	$-\frac{l}{2}$	0	0

Cuadro 3.1: Parámetros D-H *Falcon* izquierdo

Esta tabla contiene los parámetros para el *Falcon* izquierdo, la única dife-

rencia con el *Falcon* derecho es que el angulo θ_i es -45° .

Articulación	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	45°	$\frac{l}{2}$	0	0

Cuadro 3.2: Parámetros D-H *Falcon* derecho

Con los cuadros 3.1 y 3.2 se calculan la matrices Rotación en Z y traslación en Z de acuerdo con los parámetros D-H.

Falcon izquierdo

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos(45) & \sin(45) & 0 & 0 \\ \sin(45) & \cos(45) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{l}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

entonces

$$A_0^1 = A_1 * A_2$$

$$A_0^1 = \begin{bmatrix} \cos(-45) & -\sin(-45) & 0 & 0 \\ \sin(-45) & \cos(-45) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{l}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-45) & \sin(-45) & 0 & 0 \\ \sin(-45) & \cos(-45) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{l}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Falcon derecho

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos(45) & -\sin(45) & 0 & 0 \\ \sin(45) & \cos(45) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{l}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

entonces

$$A_0^1 = A_1 * A_2$$

$$A_0^1 = \begin{bmatrix} \cos(45) & -\sin(45) & 0 & 0 \\ \sin(45) & \cos(45) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{l}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(45) & -\sin(45) & 0 & 0 \\ \sin(45) & \cos(45) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{l}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Las anteriores son las matrices de transformación homogénea, resultado del análisis de los parámetros DH, estas son las que modifican la posición y orientación de los cursores en la aplicación de software para usar el sistema háptico de 5 GDL.

El siguiente paso en la aplicación de software es implementar el cálculo anterior de la posición de los cursores, esto se hace en la actualización háptica del programa, primero se obtiene la posición donde se encuentra el cursor del dispositivo háptico y con ella se calcula su nueva posición.

```

cVector3d P_R; //Posición Falcon derecho
cVector3d P_L; //Posición Falcon izquierdo

//Falcon izquierdo
hapticDevices[0] -> getPos (newPos);
P_L.x = (cos(-45 * pi/180 ) * newPos.x) - (sin(-45 * pi/180 ) * newPos.y);
P_L.y = (sin(-45 * pi/180 ) * newPos.x) + (cos(-45 * pi/180 ) * newPos.y);
P_L.z = (newPos.z) + l/2;

//Falcon derecho
hapticDevices[1] -> getPos (newPos);
P_R.x = (cos(45 * pi/180 ) * newPos.x) - (sin(45 * pi/180 ) * newPos.y);
P_R.y = (sin(45 * pi/180 ) * newPos.x) + (cos(45 * pi/180 ) * newPos.y);
P_R.z = (newPos.z) - l/2;

```

Finalmente con la posición calculada, está se establece a los 2 cursores y luego se envía la posición a la herramienta, para ser graficada verticalmente en el escenario.

```

cursor0 -> setPos (P_L);
cursor1 -> getPos (P_R);
cyl_tool->m_pointA = P_L;
cyl_tool->m_pointB = P_R;

```

3.2.3. DISEÑO DE SOFTWARE

Inspirados en el juego “Operando”³ se desarrolló la aplicación de software donde se probó el dispositivo háptico diseñado de 5 GDL y el dispositivo de 3 GDL para comparar y evaluar su comportamiento, se eligió este juego ya que la herramienta de agarre se diseñó para que el usuario experimente el uso de una pinza. Este juego Operando se desarrolla con una pinza con las que se debe coger objetos del tablero de juego, se pensó en este juego ya que la idea del dispositivo es que el usuario desarrolle una tarea interesante, dinámica en el menor tiempo posible.

³[http://en.wikipedia.org/wiki/Operation_\(game\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Operation_(game))

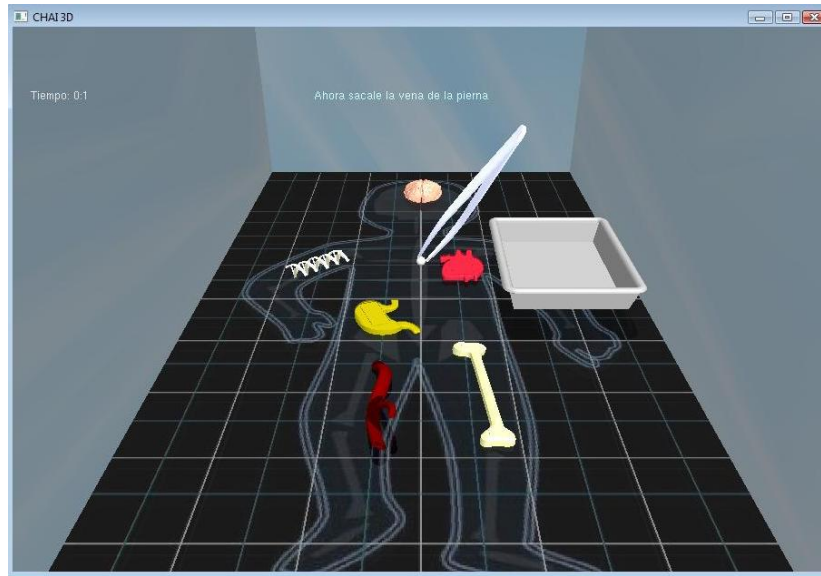


Figura 3.13: Aplicación definitiva dispositivo 5 GDL

La aplicación diseñada Fig 3.13, consiste en un escenario donde el usuario debe retirar con una pinza 6 objetos de un cuerpo y luego llevarlos a una bandeja, la cual se lleva los objetos fuera del escenario, se indica aleatoriamente que pieza debe ser removida para que el juego siempre sea diferente y dinámico, mientras el usuario desarrolla la tarea, se mide el tiempo de duración el cual es el puntaje del usuario, el objetivo es retirar las 6 partes del cuerpo en el menor tiempo posible con menor cantidad de errores.

Iniciando la fase de diseño se selecciono la API a utilizar, el cuadro 3.3 presenta una comparación entre 3 API seleccionadas entre las más comunes para desarrollo háptico 3D, ellas son H3DAPI, CHAI3D y OpenHaptics, esta tabla califica las características más importantes de 1 a 5 siendo 1 el peor y 5 el mejor. Estado de desarrollo es un estado general del proyecto acerca de las actualizaciones, la actividad y los errores corregidos.⁴

⁴Petr Kadlecek. A Practical Survey of Haptic APIs Charles University in Prague. 2010, pp 31-32.

API	H3DAPI	CHAI3D	OpenHaptics
Recurso Libre	Si	Si	No
Licencia	GPL v2/Com.	GPL v2/Com.	Com./Acad.
Estado de desarrollo	4	5	5
Manual API	Si	No	Si
Referencias API	Si	Si	Si
Ejemplos	Si	Si	Si
Soporte de dispositivos	4	5	4
Calificación General	4	4	3

Cuadro 3.3: Cuadro comparativo entre APIs

Teniendo en cuenta el cuadro 3.3, se eligió *CHAI 3D* como la API a usar, debido a que cumple con las características principales necesarias para el desarrollo del proyecto, entre la más importante el soporte de dispositivos ya que permite el uso simultaneo de diferentes dispositivos hápticos, el único inconveniente es que no existen tutoriales para su aprendizaje, pero su código fuente está muy bien documentado y es fácil de entender. *CHAI 3D* cuenta con ejemplos libres publicados por sus autores, estos están clasificados por orden de dificultad, los autores recomiendan aprender con estos ejemplos. Con este método se puede obtener una clara visión de la API, pero no permite entender con claridad algunas características fundamentales, por lo que se requiere leer el código fuente eventualmente.⁵

La versión que se adquirió inicialmente fue *CHAI 3D* 2.0.0 para plataforma Windows de 32 bits, está disponible para la descarga en la página de *CHAI 3D*.⁶

Inicialmente se desarrolló una aplicación usada con la interfaz de programación *CHAI 3D*, la cual usa simultáneamente 2 herramientas hápticas con diferentes dispositivos en el mismo escenario, para usar los dos dispositivos hápticos primero se indica que se usaran 2 dispositivos con la función *numHapticDevices*, los cuales luego se inicializan y se añade cada uno a una herramienta háptica tool.

Después de tener los dos cursores en pantalla se calcula la posición del efector final de los 2 dispositivos *Falcon* usados `m_deviceMesh` como esta explicado en Diseño del sistema háptico anteriormente y traza una línea entre ellos, sobre la cual grafica posteriormente un cilindro uniéndolos. *CHAI 3D* actualiza la posición del dispositivo háptico en cuestión de mili segundos viendo simultáneamente el movimiento del dispositivo háptico con el objeto virtual.

⁵<http://www.chai3d.org/coding.html>

⁶<http://www.chai3d.org/download.html>

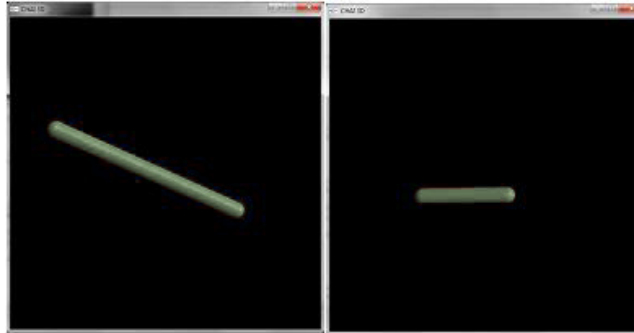


Figura 3.14: Unión de dos *Novint Falcon* simultáneamente en *CHAI 3D*.

Después de tener esta aplicación se creó un escenario virtual con el que se pudiera interactuar con los 2 *Novint Falcon*, se desarrolló un ODE World para que los objetos en el fueran afectados por leyes físicas como la fricción y la gravedad.

Inicialmente se crearon objetos `ODEBody` con la clase `cODEGenericBody`, son objetos que interactúan en un escenario ODE, al comienzo se hicieron objetos sencillos como esferas y cubos como aprendizaje, pero luego se crearon los objetos característicos del juego, estos objetos 3D los cuales deben ser recolectados en la aplicación, corazón, estómago, fémur, adn, vena, cerebro, bandeja fueron creados en el software SolidWorks y guardados en extensión `.vrm` (Lenguaje para Modelado de Realidad Virtual) para luego ser transformados en objetos `.obj` ya que *CHAI 3D* solo reconoce objetos 3D de extensión `.obj` o `.3ds`.

La mesa donde se encuentran estos objetos está creada por cajas, estas cajas forman pequeños huecos donde los objetos entran inicialmente antes de ser movidos, estas también son objetos ODE pero se define su forma con la función `createDynamicBox` la cual recibe como parámetros el tamaño en `x,y,z` y un cuarto parámetro con el que se define que no sean objetos dinámicos, para que interactúe con los objetos ODE pero permaneciendo estáticas en su puesto.

Los objetos en el escenario poseen diferentes características físicas dadas por el material del objeto, estas se definen con la clase `cMaterial` donde se puede definir las características visuales como la textura del objeto.

Paralelamente con los objetos se deben crear los planos que contienen los objetos en el escenario `ODEPlane`, son los límites donde los objetos tienen la libertad de moverse, si no se crean estos planos el objeto caería por efecto de la gravedad infinitamente en la simulación, se deben crear 6 planos ya que estos planos forman una caja contenedora la cual determina el espacio de trabajo.

Luego de tener la mesa y los objetos en el escenario se crearon texturas planas 2D con la clase `cTexture2D`, las cuales son las paredes laterales y de fondo del escenario y la imagen del cuerpo sobre la mesa donde están todos los objetos, estas texturas permiten cargar una imagen en formato `.jpg` y graficarlas en un plano 2D, además requiere los parámetros de textura como rigidez, fricción dinámica y estática para la sensación de contacto con ellas.

Después de tener el escenario creado con todos los objetos, se añadió al escenario una pinza que representa la herramienta de agarre, esta se gráfica entre el cursor de los 2 dispositivos `m_deviceMesh` reemplazando el cilindro graficado en la Figura 3.14; el cursor del dispositivo representado en la parte inferior de la pinza puede agarrar objetos cuando se activa la función `Grasp` al presionar el botón de acción del dispositivo. Para agarrar un objeto el cursor debe colisionar con el objeto y al presionar el botón podrá levantarlo y llevarlo a la bandeja.

El tiempo de duración de la tarea es calculado en el proceso de actualización de imágenes este termina cuando los 6 objetos son llevados a la bandeja, se crearon varios Labels creados con la función `cLabel` los cuales indican información en pantalla como el tiempo y los mensajes indicando cual debe ser el objeto retirado, este orden de selección es aleatorio, para evitar la monotonía del juego.

Después de tener la estructura de la aplicación deseada, se decidió crear animaciones que mostraran cuando los objetos salen del escenario una vez que se ha detectado que están dentro de la bandeja, estas animaciones presentaron inconvenientes ya que el programa detectaba errores de colisión y de posición de los objetos cuando se hacían cambios programados en su posición.

La universidad de Stanford dicta un curso llamado, Háptica Experimental y su información se encuentra libre para su uso en la pagina del curso. Ellos tienen en la pagina una versión beta mas avanzada del *CHAI 3D*, la versión 2.3.0 y es libre de descarga, con el fin de corregir los errores mencionados anteriormente se decidió cambiar el *CHAI 3D* 2.0.0 por esta versión beta.⁷

Al cambiar el programa a la versión CHAI 3D 2.3.0 fue posible corregir los problemas de colisión presentados anteriormente en el programa desarrollado, permitiendo seguir con las animaciones de movimiento de la bandeja al retirar los objetos del escenario.

3.2.4. PROTOCOLO EXPERIMENTAL

Es el método que se establece para obtener datos basados en ciertos parámetros que influyen a la hora de evaluar el dispositivo en su estado original (3 GDL) y en su estado modificado (5 GDL). Este protocolo se llevará a cabo en un programa el cual permite evaluar ambos dispositivos, en donde el usuario deberá realizar la tarea en el menor tiempo posible.

La figura 3.15 muestra como se lleva a cabo el protocolo experimental.

⁷<http://www.stanford.edu/class/cs277/homework/index.html>



Figura 3.15: Evaluación del sistema

Determinar parámetros

1. La tarea a realizar en el juego es sacar los 5 órganos presentes en el escenario en una bandeja por medio del dispositivo háptico Falcón Novint.
2. Se realizarán por cada sesión 5 repeticiones.
3. Se hará una sesión por día, durante dos días para el estudio total.
4. Se tomarán dos grupos; el grupo experimental con 10 personas y el grupo de control con 2 personas.
5. La variable a medir será el tiempo que cada usuario establezca en el juego, para la comparación.
6. Se tendrá en cuenta varios parámetros para la evaluación parcial de cada usuario:
 - 6.1. ¿Es usted Diestro?
 - 6.2. ¿Alguna vez ha utilizado el programa a evaluar?

Desarrollo del protocolo experimental

Se desarrolló un software en forma de juego que llamara la atención a las personas, para que pudieran realizar la prueba de forma que se sintieran a gusto y pusieran a disposición todas sus habilidades motrices para el desarrollo de este experimento. Seguido de esto se recluta el número adecuado de personas que cumplan con el objetivo del juego, para recolectar los datos necesarios para así posteriormente realizar un análisis de los datos obtenidos.

Reclutamiento de los usuarios

Antes de reclutar a las personas se determinaron los grupos necesarios para llevar a cabo este análisis, se tomaron dos grupos, un grupo experimental y un grupo de control este segundo sería el grupo base para la evaluación del grupo experimental; para el grupo experimental se reclutaron 10 personas las cuales no

podrían haber interactuado con el juego antes, estas personas fueron reclutadas de forma voluntaria sin ninguna retribución.

Realizar de Estudios

Como se dijo anteriormente se reclutaron 10 personas, estas personas constituirán el grupo experimental, dentro de este grupo se formaran dos subgrupos cada uno estará formado por 5 personas; Cada subgrupo iniciara el juego con un dispositivo diferente es decir, con el dispositivo original (3 GDL) y con el dispositivo modificado (5 GDL). Antes de iniciar la prueba cada usuario puede probar la aplicación a usar durante 1 minuto para conocer su funcionamiento y posterior a esto iniciara el juego.

El subgrupo 1 iniciara la prueba con el dispositivo original (3 GDL) y posteriormente continuara con el dispositivo modificado (5 GDL) y el subgrupo 2 iniciara la prueba con el dispositivo modificado (5 GDL) y posteriormente continuara con el dispositivo original (3 GDL). El subgrupo 1 será el primero en comenzar la sesión, cada uno de los integrantes de este subgrupo tendrá 1 minuto para descansar e iniciar la prueba nuevamente. El subgrupo 2 posteriormente continuara la sesión, y como el subgrupo 1 también tendrá 1 minuto para descansar y seguir con las pruebas.

El juego es aleatorio es decir cada vez que inicie la tarea tendrá que recoger los órganos en orden diferente, esto con el fin de que no sea aprendida la rutina y tenga un grado más alto de dificultad.

Después de cada ensayo se guardará el tiempo para luego realizar un estudio estadístico, el objetivo de separar el grupo experimental en dos grupos es poder obtener datos más reales, ya que si todo el grupo experimental inicia la tarea con un dispositivo, cuando realice la segunda parte de la prueba en el siguiente dispositivo todos habrán aprendido su uso y los datos serán todos muy similares.

Análisis de datos

Esta actividad de analizar el conjunto de datos obtenidos por los usuarios que realizaron la prueba se hace con el objetivo de poder verificarlos, dándole al mismo tiempo un análisis racional, para comparar si hay o no aprendizaje en el uso del dispositivo háptico de 5(GDL).

Capítulo 4

DESARROLLO

4.1. SISTEMA HÁPTICO

Luego haber escogido el Empack como material de diseño para la producción de las piezas, se adquirió una barra de 15mm Ø de 1 metro de largo y una placa de Empack de 30cm x 30cm, el método de producción elegido fue mecanizado manual, Las piezas cilíndricas se produjeron en un torno convencional y las demás piezas fueron producidas con un taladro fresador; todo el proceso de mecanizado se desarrolló pieza por pieza en el laboratorio de mecanizado de la UMNG.

Fue necesario adquirir comercialmente 2 *gripper Novint Falcon* para el desarrollo del dispositivo, luego de producir las placas horizontales en Empack se procedió a modificar los *gripper* como muestra la figura 4.1 reemplazando su parte inferior por la placa.



Figura 4.1: Modificación del *gripper* del *Novint Falcon*.

Después de tener el *gripper* modificado se adquirió los elementos de unión como los tornillos y las rótulas y se produjo todo el sistema mecánico y fue implementado en los *Novint Falcon*, quedando terminado el sistema de 5GDL, el montaje completo se puede ver en la figura 4.2.



Figura 4.2: Sistema háptico de 5 GDL implementado a los dos *Novint Falcon*.

El espacio de trabajo del dispositivo es limitado por esto es necesario escalar el movimiento sentido por el dispositivo háptico en el software de simulación. Cada *Falcon* entrega una fuerza de 3 GDL a la respectiva rótula, dando como resultado total 3 GDL de fuerza y 2 GDL de torque aplicado a la herramienta de agarre.

Los *Falcon* están montados sobre una base común, es aconsejable su uso ya que mantiene los *Falcon* debidamente alineados y provee balance adicional pero no es estrictamente necesaria. Estos están rotados 45° hacia el centro, perpendicularmente con el otro. Esta rotación proporciona que la herramienta de agarre sobresalga del borde de la mesa para tener así un espacio de trabajo total sin limitaciones verticalmente.

El sistema permite a la herramienta de agarre tener una longitud confortable para la mano y poder hacer largas rotaciones sin chocarse con la mesa, manteniendo el mismo espacio de trabajo que el sistema de 3 GDL pero con la posibilidad de rotar libremente. La longitud y el diámetro de la herramienta de agarre, como la distancia de separación entre los *Falcon*, fueron cuidadosamente elegidas basadas en el confort y el rango de movimiento. Las colisiones de la herramienta de agarre con otros componentes se producen un poco más allá de los límites del espacio de trabajo de los *Falcon*. Todos los componentes del sistema mecánico están diseñados para ser fabricados a partir de sencillos procedimientos de mecanizado, manteniendo el bajo costo del hardware.

Un *Falcon* no funcionará si su *gripper* es removido, así que cualquier modificación requiere que permanezca en su puesto. Afortunadamente, el diseño del *gripper* facilita las modificaciones de diseño como de los botones de acción. Para

acoplar el botón de acción en la herramienta de agarre no fue necesario remover los botones del *gripper* ni modificarlo electrónicamente, se soldó los cables de este botón sobre el botón del *gripper* en paralelo, este botón está instalado en un extremo de la barra de agarre facilitando su accionamiento con el dedo índice.

4.2. EVALUACIÓN

Se realizaron las pruebas para determinar la influencia de la respuesta del sistema y su variabilidad (expresada como desviación estándar de respuesta del sistema) en la tarea de recoger los órganos; Los resultados mostraron que el rendimiento de las personas (expresado como el tiempo de demora) disminuía notoriamente en cada ensayo.

La variabilidad en la respuesta del sistema tiene la mayor influencia en la tarea ya que dependía de que tan bien cogiera y manipulara la pieza capturada hasta el punto de llevarla a la bandeja para que se habilitara el siguiente órgano. Las tablas de los datos tomados se encuentran en el anexo 3.

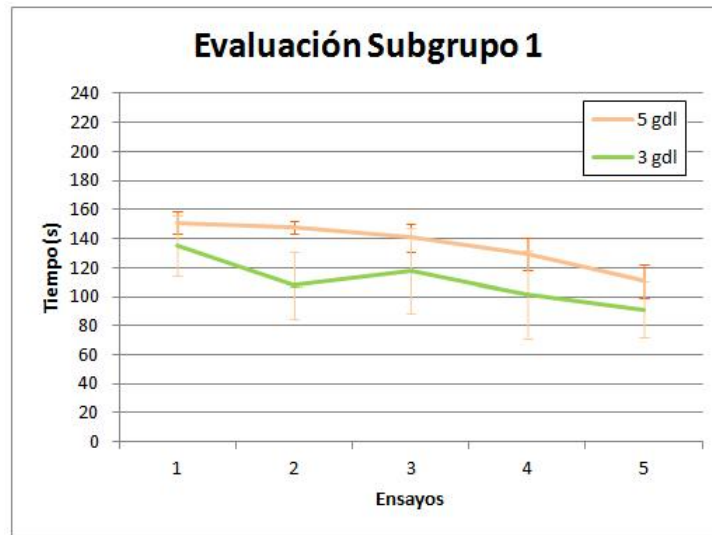


Figura 4.3: Evaluación Subgrupo 1

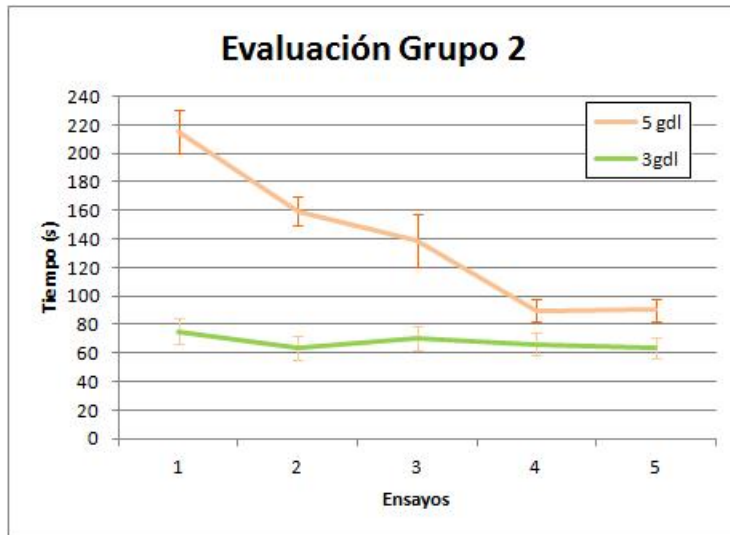


Figura 4.4: Evaluación Subgrupo 2

El grupo experimental tuvo un desempeño variable ya que cada subgrupo tuvo una distribución de tiempo diferente. El subgrupo 1 comenzó la prueba con el dispositivo de 3 GDL lo que le dio una experiencia notable a la hora de realizar la tarea con el dispositivo de 5 GDL, haciendo la tarea mejor en un tiempo más corto, ver Figura 4.3.

El subgrupo 2 comenzó la prueba con el dispositivo de 5 GDL, a este subgrupo se le dificultó el desarrollo de la tarea un poco más inicialmente pero el aprendizaje fue bastante bueno, se puede notar con la segunda parte de la prueba con el dispositivo de 3 GDL, que realizaron tiempos bastante buenos con una desviación muy pequeña, ver Figura 4.4

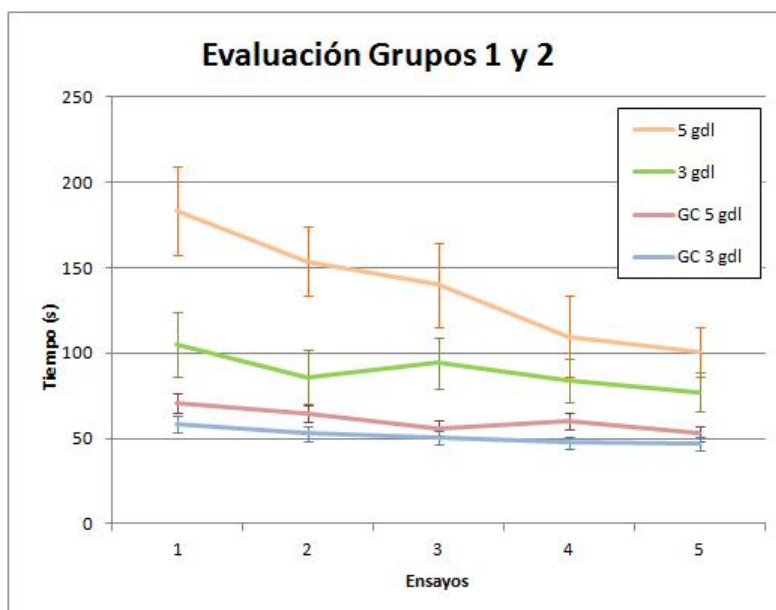


Figura 4.5: Evaluación Grupo 1 y 2

Al evaluar el grupo 1 y 2 se ve notoriamente que el grupo 2 (grupo de control) ya no tenía un aprendizaje notorio ya que a medida que realizaba los ensayos era más constante y ya había realizado la tarea muchas veces. En el momento de unir los subgrupos uno y dos se pudo notar que el dispositivo de 5 GDL a pesar de tener más libertad de movimiento tuvo un tiempo más largo para cumplir con la tarea, esto se debe al peso que tenía este dispositivo, lo que hacía que la tarea fuera un poco más compleja a pesar de ser mejor. Sin embargo se notó que a medida de cada ensayo los tiempos mejoraron considerablemente casi a llegar a un mismo punto que con el dispositivo de 3 GDL.

El dispositivo de 5 GDL inicialmente es bastante complicado de usar, sin experiencia alguna como muestran los resultados del grupo experimental en los cuadros anteriores; la demostración de que este dispositivo puede llegar a ser utilizado efectivamente es el resultado del grupo de control en la Figura 4.5 donde el resultado llegó a ser tan bueno como la tarea realizada con el dispositivo de 3 GDL.

La Figura 4.6 contiene algunas fotos de la evaluación del dispositivo realizadas por diferentes usuarios en el Centro de Realidad Virtual.



Figura 4.6: Fotos evaluación dispositivo háptico

Encuesta post-prueba

Después de realizada la prueba de evaluación, cada usuario presentó una pequeña encuesta con el fin de comparar algunas características entre los dispositivos de 3 y 5 GDL, el grupo de evaluación fue de 10 usuarios, las preguntas realizadas fueron:

- a. ¿Cuál de los dispositivos prefiere usted?
- b. ¿Cuál de los dos dispositivos cree que es más difícil de usar?
- c. ¿Qué dispositivo permite sentir mayor inmersión en el juego?

Los resultados obtenidos de estas preguntas se pueden ver en la Figura 4.6

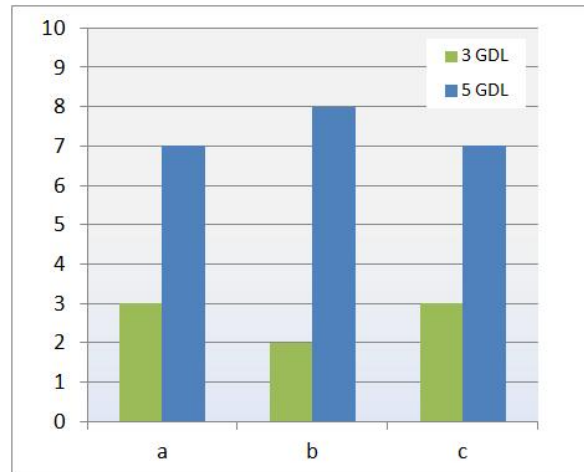


Figura 4.7: Encuesta post-prueba

De la pregunta *a* se puede concluir notoriamente que el dispositivo diseñado de 5 GDL es el dispositivo preferido para el juego por el 70 % de los usuarios.

La pregunta *b* demuestra que el 80 % de los usuarios piensan que el dispositivo diseñado de 5 GDL es más difícil de usar, y solo el 20 % restante opina que es el de 3 GDL, es interesante ver que aunque creen que es más difícil de usar el dispositivo de 5 GDL, es el preferido por los usuarios.

El 70 % de los usuarios cree que el dispositivo de 5 GDL permite sentir mayor inmersión en el juego que el de 3 GDL según la pregunta *c*, el restante 30 % se inclina por éste segundo, ya que piensa que la dificultad o el peso del dispositivo de 5 GDL causa desconcentración o cansancio al realizar la tarea.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- El material y los elementos seleccionados para la construcción del dispositivo de unión de los *Falcon*, mostraron un adecuado desempeño frente a los requerimientos, ya que el material usado *Empack* (pead 200) logro una buena resistencia al esfuerzo sometido en el ensamble completo, cumpliendo con el requisito de bajo peso y a su vez de bajo costo. Así mismo la rótula de doble vástago diseñada se comporto como se esperaba sin aumentar notoriamente su peso.
- La librería gráfica de desarrolló háptico *CHAI 3D*, resultó ser muy adecuada para esta aplicación, debido a que se integraron los dos dispositivos hápticos Novint Falcon en el mismo escenario donde cada uno tiene un cursor con el cual se puede interactuar con los elementos en el entorno grafico; y permitió modificar la posición y configuración de cada cursor para representar una sola herramienta, en el escenario.
- Se logró una correcta integración del sistema háptico con el software desarrollado ya que los movimientos producidos sobre el dispositivo, son reflejados en el entorno virtual, eficientemente mostrando los cambios de posición en tiempo real, permitiendo también manipular los objetos del escenario virtual, ejerciendo fuerzas sobre los objetos y recibiendo a su vez la fuerza de retroalimentación háptica entregada por el dispositivo.
- Los resultados obtenidos de la evaluación del dispositivo de 5GDL realizada por los usuarios permiten inferir que aunque inicialmente es bastante complicado de usar, sin experiencia alguna como muestran los resultados del grupo experimental; la demostración de que el dispositivo puede llegar a ser utilizado efectivamente es el resultado del grupo de control, ya que llega a ser tan efectivo como el dispositivo de 3 GDL, pero con la ventaja que permite sentir al usuario mayor inmersión en la tarea a desarrollar, mejorando la experiencia del usuario a nivel de interactividad.
- Este dispositivo desarrollado cuenta con todas las características para ser utilizado como dispositivo háptico en simulaciones académicas, médicas o

con fines de rehabilitación realizando tareas de simulación más complejas con menos limitaciones de movimiento que un dispositivo de 3 GDL.

TRABAJOS FUTUROS

- En el software desarrollado se puede implementar la compensación de gravedad del peso del dispositivo háptico diseñado en un ODEWorld. Esto se logra compensando el peso del dispositivo con los actuadores de los Novint Falcon; luego de compensada la gravedad debe contar con la capacidad de interactuar con objetos ODE en el escenario virtual, logrando así que el usuario no experimente cansancio o fatiga muscular.
- Este desarrollo cuenta con la capacidad de visualización 3D por estereoscopia. Puede implementarse el trabajo en un monitor 3D con el fin de añadir mayor inmersión a la aplicación aunque es necesario configurar la frecuencia de actualización para evitar producir fatiga o mareo.
- Durante la evaluación del sistema desarrollado surge la idea de rediseñar el sistema mecánico el cual une los Novint Falcon para que permita intercambiar la herramienta de agarre del dispositivo háptico con el fin de tener tareas personalizadas según la tarea a desarrollar, como por ejemplo un lápiz, un escalpelo o un destornillador.
- Puede implementarse alguna aplicación médica real con el fin de simulación o entrenamiento, esto requiere de un desarrollador 3d para realizar simulaciones más reales.

Bibliografía

- [1] Novint Falcon háptic device. <http://www.Novint.com/index.php/products/novintfalcon>.
- [2] Specifications for the PHANTOM® Desktop™ and PHANTOM Omni® haptic devices, http://www.sensable.com/documents/STI_Jan2009_DesktopOmniComparison_print.pdf , Consultado 15 de diciembre 2011.
- [3] CHAI 3D: The open source haptics project, <http://www.chai3d.org/>.
- [4] Open source haptics H3D API <http://www.h3dapi.org/>
- [5] The Univerisity of Utah Telerobotics Lab, <http://www.telerobotics.utah.edu>
- [6] PETR Kadlec. "A Practical Survey of Haptic APIs", Department of Software and Computer Science Education, Charles University in Prague, 2010.
- [7] MUSTAFA, M.; MISUARI, R.; DANIYAL, H.; , "Forward Kinematics of 3 Degree of Freedom Delta Robot," Research and Development, 2007. SCORed 2007. 5th Student Conference on , vol., no., pp.1-4, 12-11 Dec. 2007
- [8] JINGJUN Zhang; LIHONG Shi; RUIZHEN Gao; CHAOYANG Lian; , "The mathematical model and direct kinematics solution analysis of Delta parallel robot," Computer Science and Information Technology, 2009. ICCSIT 2009. 2nd IEEE International Conference on , vol., no., pp.450-454, 8-11 Aug. 2009
- [9] BURDEA G. "Force and touch feedback for virtual reality" New York USA, 1996.
- [10] MARTÍN Doñate, Cristina., INTERFACES HÁPTICOS. APLICACION EN ENTORNOS VIRTUALES, XVI CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA GRÁFICA.
- [11] PÉREZ-Gutiérrez, B.; ARIZA-Zambrano, C. & HERNÁNDEZ, J. C. (2011), Mechatronic Prototype for Rigid Endoscopy Simulation, in Randall Shumaker, ed., 'Virtual and Mixed Reality', Springer Berlin / Heidelberg, , pp. 30-36.

- [12] ANG, Q.-Z.; HORAN, B.; NAJDOVSKI, Z. & NAHAVANDI, S. (2011), Grasping virtual objects with multi-point haptics, in 'Virtual Reality Conference (VR), 2011 IEEE', pp. 189 -190.
- [13] MONRROY M.; OYARZAFBAL M.; FERRE M,(2007), Dispositivos hápticos: Una forma de realizar la interacción hombre máquina. II Congreso Internacional sobre Domótica, Robótica y Teleasistencia para Todos, pp. 40-46.
- [14] WELLER, R. & ZACHMANN, G. (2011), 3-DOF vs. 6-DOF - Playful evaluation of complex haptic interactions, in 'Consumer Electronics (ICCE), 2011 IEEE International Conference on', pp. 273 -274.
- [15] ULLRICH, S.; KNOTT, T.; LAW, Y.C.; GROTTKE, O.; KUHLEN, T.; , "Influence of the bimanual frame of reference with haptics for unimanual interaction tasks in virtual environments," 3D User Interfaces (3DUI), 2011 IEEE Symposium on , vol., no., pp.39-46, 19-20 March 2011
- [16] LEE, L.-F.; NARAYANAN, M.; MENDEL, F.; KROVI, V. & KARAM, P. (2010), 'Kinematics analysis of in-parallel 5 DOF haptic device', , 237 -241.
- [17] LIN, Y. & Sun, Y. (2011), 5-D force control system for fingernail imaging calibration, in 'Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on', pp. 1374 -1379.
- [18] SHAH, A. V.; TEUSCHER, S.; McClain, E. W. & Abbott, J. J. (2010), 'How to Build an Inexpensive 5-DOF Haptic Device using Two Novint Falcons', LNCS 6191, 136-143.
- [19] MARTIN, S., HILLIER, N.: Characterisation of the Novint Falcon haptic device for application as a robot manipulator. In: Proc. Australasian Conf. Robotics and Automation (2009) .
- [20] YANG, X.-D.; Bischof, W. & Boulanger, P. (2008), 'Validating the Performance of Haptic Motor Skill Training', , 129 -135.,
- [21] SOFRONIA, R. E.; SAVII, G. & Davidescu, A. (2010), 'Haptic devices in engineering and medicine', , 373 -378.
- [22] TSAGARAKIS, N.G.; CALDWELL, D.G.; , "A 5 dof haptic interface for pre-operative planning of surgical access in hip arthroplasty," Eurohaptics Conference, 2005 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005. World Haptics 2005. First Joint , vol., no., pp. 519- 520, 18-20 March 2005
- [23] VAFAI, NASIM Melony; Payandeh, S. (Jun 2010), Toward the development of interactive virtual dissection with haptic feedback, in 'Virtual Reality', Springer Science & Business Media, , pp. 85 - 103.
- [24] COLES, T.R.; John, N.W.; , "The Effectiveness of Commercial Haptic Devices for Use in Virtual Needle Insertion Training Simulations," Advances in Computer-Human Interactions, 2010. ACHI '10. Third International Conference on , vol., no., pp.148-153, 10-15 Feb. 2010

- [25] SILVA, A.J.; RAMIREZ, O.A.D.; VEGA, V.P.; Oliver, J.P.O.; ,
"PHANTOM OMNI Haptic Device: Kinematic and Manipulability,"
Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, 2009.
CERMA '09. , vol., no., pp.193-198, 22-25 Sept. 2009

- [26] LI, Chaobin; WAN Gang, Dangxiao; ZHANG, Yuru; , "iFeel3: A Haptic
Device for Virtual Reality Dental Surgery Simulation," Virtual Reality
and Visualization (ICVRV), 2011 International Conference on , vol.,
no., pp.179-184, 4-5 Nov. 2011

ANEXOS

1. Especificaciones CHAI 3D

Visión general

- C + + API
- Acceso completo al código fuente
- Multi-plataforma (Windows, Mac OS-X, Linux)

La representación de gráficos

- Open GL
- Iluminación dinámica
- 2D y 3D texturizado
- Propiedades de los materiales
- GLUT y NET. Viewports

Haptic Rendering

- Finger-Proxy modelo con radio variable
- Los modelos de potencial del campo
- Estática y dinámica de los modelos de fricción
- Stick-slip, viscoso, de vibraciones, efectos magnéticos

Detección de colisiones

- AABB modelos
- Modelos esféricos

Soporte de archivos

- Los archivos de imagen:.. BMP TGA
- Archivos de mallas: 0,3 DS OBJ.

Dispositivos hápticos

- Háptica universal de controlador de dispositivo
- Dispositivo háptico virtual
- omega.x y apoyo delta.x dispositivo
- Novint Falcon dispositivo de apoyo
- Libertad 6 dispositivo de apoyo
- Dispositivos fantasmas de apoyo
- Plantilla para la integración de dispositivos personalizados

E / S Juntas

- Servo2Go I / O
- Sensoray 626 I / O

Temporizadores

- Reloj de alta precisión (nanosegundos)
- Temas

Extensiones

- ODE (motor de la dinámica abierta)
- GEM (modelos deformables)
- BASS (Biblioteca de audio)

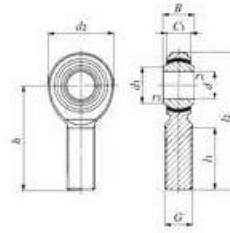
Copyright 2009

<http://www.chai3d.org/concept2.html>

2. Ficha Técnica Rótula



Maintenance-free Type PILLOBALL Rod Ends **With Male Thread**



POS...EC

Identification number	Mass (Ref.) g	Boundary dimensions mm										Dynamic load capacity C_d N	Static load capacity C_s N	
		d	Thread G	d_2	C_1	B	d_1	l_2	h	l_1	$r_{1s \text{ min}}^{(1)}$			Ball dia. mm (inch)
POS 5EC	12.5	5	M 5×0.8	16	6	8	7.7	41	33	20	0.2	11.112 ($\frac{7}{16}$)	6 540	3 340

Note(1) Minimum allowable value of chamfer dimension r_1

Remarks1. Neither oil hole nor grease nipple is provided.

2. When a metric fine thread specification is required, please contact IKO.

1N=0.102kgf=0.2248lbs. K44
1mm=0.03937inch

IKO needle Roller Bearing Series Catalogue. p 243. http://pdf.directindustry.com/pdf/iko-nippon-thompson-america/needle-roller-bearing-series/15950-3580-_243.html

3. Tablas de datos evaluación del sistema

Sub Grupo 1						
Usuario	Prueba	Trials				
		1	2	3	4	5
1	A	135	92	127	67	98
	B	130	150	98	81	92
2	A	144	117	135	134	128
	B	229	227	250	236	178
3	A	115	115	109	109	58
	B	119	108	122	95	80
4	A	122	107	84	88	80
	B	118	95	88	78	76
5	A	159	108	134	110	91
	B	159	157	145	158	129
Promedio	A	135	108	118	102	91
	B	151	147	141	130	111
Desviación	A	8	4	10	11	11
	B	21	23	29	30	19

Sub Grupo 2						
Usuario	Prueba	Trials				
		1	2	3	4	5
6	B	239	170	206	104	101
	A	100	51	74	63	55
7	B	182	172	127	85	92
	A	72	58	65	44	48
8	B	208	177	134	94	89
	A	50	46	42	60	56
9	B	230	120	90	77	80
	A	88	93	77	74	87
10	B	218	160	139	90	91
	A	68	72	95	90	72
Promedio	B	215	160	139	90	91
	A	76	64	71	66	64
Desviación	B	10	10	19	5	3
	A	9	8	9	8	7

6. Plano Herramienta de Agarre y cilindro horizontal

