



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Comparación de dispositivos de entrada no convencionales en entornos virtuales

Miguel Alejandro Parra Romero

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial
Bogotá, Colombia
2012

Comparación de dispositivos de entrada no convencionales en entornos virtuales

Miguel Alejandro Parra Romero

Tesis de grado presentada como requisito para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Ingeniería de Sistemas y Computación

Director:
Ph.D. Jean Pierre Charalambos Hernández

Línea de Investigación:
Computación Gráfica
Grupo de Investigación:
RemixLab

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial
Bogotá, Colombia
2012

A mi familia.

Agradecimientos

Agradecimientos a la Universidad Nacional de Colombia, mi director de tesis y mis compañeros del grupo de investigación por su guía y aportes constantes. Un agradecimiento muy especial a las personas que participaron en los experimentos quienes donaron parte de su tiempo y mucho de su paciencia para completar este trabajo de investigación.

Resumen

Este trabajo es el resultado de la evaluación cualitativa y cuantitativa de algunos dispositivos no convencionales. Se realizaron dos experimentos con condiciones controladas contando con la participación de dos grupos de personas de diferentes niveles académicos y diferentes niveles de acceso a la tecnología. Los dispositivos evaluados fueron: Wiimote de Nintendo, Falcon de Novint, Kinect de Microsoft, SpaceNavigator de 3D Connexion y un ratón estándar como dispositivo de referencia, del cuál se conocen bien sus medidas de desempeño. El primer experimento, en un ambiente bidimensional realizando una tarea de *click*; el segundo en un ambiente tridimensional ejecutando una tarea de *seguir el camino*. Los resultados muestran que en ambientes bidimensionales el ratón tiene una ventaja con una medida de desempeño (*Throughput (TP)*) de 3,50 bps (bits por segundo), seguido por el Wiimote 2,44 bps, el Kinect con un 1,08 bps y el Falcon con 0,89 bps. El experimento en tres dimensiones arrojó resultados diferentes, pues el *Kinect* superó a los demás dispositivos en la navegación (0,606 bps), seguido por el ratón (0,599 bps), luego el Wiimote (0,584 bps) y por último el *Space Navigator* (0,567 bps).

Palabras clave: HCI, Ley de Fitts, dispositivos de entrada no convencionales, entornos virtuales, Kinect, Wiimote, Falcon Novint, SpaceNavigator, ratón.

Abstract

This work aims to show the way some unconventional devices were qualitative and quantitatively assessed, with the participation of a group of people with different educational levels and different levels of using technology. Two experiments were conducted. The different devices used were: Nintendo's Wiimote; Novint's Falcon; Microsoft's Kinect, Space Navigator's 3DConnexion and a standard mouse as baseline, whose *Throughput (TP)* measures are well known. The first experiment, in a two-dimensional performing a task click the second in a three dimensional environment running a task to follow the path. The research's results show that in the two-dimensional task the mouse is the one with the mayor *TP* of 3,50 bps, followed by Wiimote with a *TP* of 2,44 bps, the Kinect with *TP* of 1,08 bps and the Falcon is 0,89 bps *TP*. The three-dimensional experiment yielded different results, because the Kinect outperformed other devices (0,606 bps), followed by the mouse 0,599 bps), then the Wiimote (0,584 bps) and finally the Space Navigator(0,567 bps).

Keywords: HCI, Fitts' Law, non-conventional input devices, virtual environments, Kinect, Wiimote, Falcon Novint, SpaceNavigator, mouse.

Contenido

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
1. Introducción	3
2. Evaluación de dispositivos	5
2.1. Ley de Fitts	5
2.2. Trabajos previos	6
3. Evaluación con tareas de apuntar	8
3.1. Descripción del Experimento	8
3.1.1. Hardware	8
3.1.2. Software	12
3.2. Análisis Cuantitativo	13
3.3. Análisis Cualitativo	15
3.4. Resultados	16
4. Evaluación en ambientes tridimensionales	19
4.1. Análisis demográfico	19
4.2. Descripción del Experimento	20
4.2.1. Hardware	22
4.2.2. Software	26
4.3. Análisis Cuantitativo	29
4.4. Análisis Cualitativo	34
4.5. Resultados	35
5. Conclusiones y recomendaciones	37
5.1. Conclusiones	37
5.2. Recomendaciones	38
A. Anexo: Otros resultados	39
A.1. tester-device	39

A.2. devices3d	39
A.3. Conferencias	40
Bibliografía	41

Lista de Figuras

2-1. Ley de Fitts para tareas de apuntar	6
3-1. Experimento en un espacio bidimensional para una tarea de apuntar.	9
3-2. Participante ejecutando el experimento con el Falcon de Novint	9
3-3. Ratón óptico Genius Traveler 100	10
3-4. Wiimote, control remoto de la consola Wii	11
3-5. Sensor Kinect, diseñado para la consola XBox 360	11
3-6. Falcon de Novint	12
3-7. Respuestas al cuestionario luego de ejecutar los experimentos.	15
3-8. Throughput total por dispositivo calculado con ID_e , índice de dificultad ajustado.	17
3-9. Comparación entre el Throughput y la preferencia de los participantes.	17
4-1. Experimento en un espacio tridimensional	20
4-2. Nivel académico de los participantes	21
4-3. Modelo de cámara, sistema coordinado para la visualización en primera persona	21
4-4. Esquema de un <i>intento</i> en el experimento en 3D	22
4-5. Participante ejecutando el experimento en 3D con el Kinect.	23
4-6. Space Navigator de 3D connexion.	26
4-7. Esquema para el cálculo de error en los intervalos	30
4-8. Gráfica de ID vs. MT para el Kinect. Pendiente: 3.18, intercepto: -2.93	32
4-9. Gráfica de ID vs. MT para el ratón. Pendiente: 0.83, intercepto: 4.88	32
4-10. Gráfica de ID vs. MT para el Space Navigator. Pendiente: 3.03, intercepto: -0.80	33
4-11. Gráfica de ID vs. MT para el Wiimote. Pendiente: 1.98, intercepto: 0.24	33
4-12. Respuestas al cuestionario luego de ejecutar los experimentos en 3D	34
4-13. Throughput total por dispositivo calculado con ID_e , índice de dificultad ajustado para el experimento 3D	36

Lista de Tablas

3-1. Índices de dificultad usados en el experimento	9
4-1. Distribución de edades en el experimento 3D	20
4-2. Índices de dificultad para el experimento en tres dimensiones	23
4-3. Mapeo del ratón en el experimento 3D	24
4-4. Mapeo del Wiimote en el experimento 3D	25
4-5. Mapeo del Kinect en el experimento 3D	25
4-6. Mapeo del Space Navigator en el experimento 3D	26
4-7. Preferencia de uso de dispositivos, siendo 1 el que los participantes prefieren usar para tareas 3D	35

1. Introducción

Los computadores personales han tomado parte importante en la vida de las personas, principalmente por su capacidad como máquinas multipropósito, permitiendo desde cálculos avanzados en ambientes académicos, pasando por eficientes sistemas de administración y planeación en las empresas hasta herramientas para adquirir conocimientos básicos en las escuelas. Según estimaciones de la firma Gartner¹, en solo el año 2012 se venderán alrededor de 368 millones de unidades de PC's en el mundo. Debido a la masificación de su uso, surge el problema de optimizar la forma en que se interactúa con los computadores, ésta es la principal área de estudio de la HCI (Human Computer Interaction) o Interacción Humano-Computador.

Tradicionalmente el teclado y el ratón se han usado como los principales dispositivos de interacción, sin embargo, en los últimos años importantes empresas en el área de los videojuegos han creado métodos de control poco convencionales como el Wiimote de Nintendo y el Kinect de Microsoft, lo que ha generado el desarrollo de librerías y aplicaciones que permiten su uso en el PC, algunos con fines de entretenimiento, otros como verdaderas alternativas al uso de los métodos tradicionales de entrada ([1], [11]).

A partir de los esfuerzos para mejorar la relación con los PCs, no solo usando dispositivos de videojuegos, sino muchos dispositivos creados a través de la historia de la computación, surge en el 2000 el estándar ISO 9241 parte 9 titulado: *Requirements for non-keyboard input devices*, generando a su vez la propuesta para estandarizar la evaluación de dispositivos presentada por Soukoreff y MacKenzie [18].

En este trabajo se realizaron dos sistemas de comparación, para cada uno de los cuales se ejecutó un experimento, el primero, una evaluación de cuatro dispositivos, donde cada uno de ellos representa una forma de interacción diferente, el Falcon de Novint, un controlador en 3D sostenido por tres soportes, el Wiimote, un control remoto con sensores de aceleración e infrarrojos, el Kinect, un dispositivo de reconocimiento de diferentes partes del cuerpo y el ratón estándar, como una guía para la evaluación de los demás dispositivos. Se comprueban los valores de TP del ratón y el Wiimote y se presentan las medidas para el Kinect y el Falcon. Para esto se empleó una tarea común que consiste en hacer click en un punto y luego

¹<http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=1944914>

en otro lo más rápido posible. La razón para usarla es que está muy bien caracterizada y sobre ella hay diversas investigaciones, este es el caso de la Ley de Fitts y los estudios de Scott MacKenzie.

Para el segundo sistema de comparación, en el experimento se usó un ambiente tridimensional con el fin de determinar el desempeño de los dispositivos en tareas más complejas. Sin embargo no se contó con el Falcon de Novint debido a problemas de interacción presentados en el primer experimento. Como reemplazo de un dispositivo con un actuador en tres dimensiones se empleó el Space Navigator que cuenta con seis grados de libertad. La tarea de este experimento era seguir una ruta de esferas a través de un espacio, haciéndolo lo más rápido posible. En este caso se aplicó la metodología para tareas de apuntar, pero su composición permitió caracterizar las rutas en el espacio tridimensional.

Aunque la representación cuantitativa provee métricas para comparar en ciertos aspectos los dispositivos, se resaltan los datos obtenidos respecto a la percepción expresada en los cuestionarios, ya que en algunos casos brinda información sobre el primer acercamiento a los computadores e invita a emplear métodos que resulten más naturales y consistentes con el mundo físico, como formas alternativas para la introducción al uso de los PCs.

2. Evaluación de dispositivos

En HCI se han hecho investigaciones en detalle sobre cómo evaluar los dispositivos que permiten interactuar con los computadores. Tradicionalmente se ha usado la Ley de Fitts para estudiar los movimientos de los humanos en este contexto.

2.1. Ley de Fitts

El psicólogo Paul Fitts propone en 1954 un modelo del movimiento humano basado en la Teoría de la Información de Shannon ([8]), específicamente en el teorema de Shannon-Hartley que relaciona la capacidad de un canal de una banda determinada con ruido, y que más tarde se denominó la Ley de Fitts. La Ley de Fitts predice que el tiempo que tarda un movimiento humano en una tarea (Figura 2-1) de apuntar desde un objeto inicial i a un objeto final f , solo está determinada por la distancia entre ambos y el ancho del objeto final. Este modelo tiene como condición que los participantes hagan el movimiento lo más rápido posible. Dicha relación es lineal y está dada por la ecuación (2-1).

$$MT = a + b * ID \quad (2-1)$$

donde a es el intercepto de la recta que relaciona Índice de Dificultad ID con el Tiempo de Movimiento MT y b su pendiente. Los valores de a y b se hallan de manera experimental usando una regresión lineal de mínimos cuadrados, estos valores caracterizan el dispositivo con el que se realiza la tarea.

$$ID = \log_2 \left(\frac{2D}{W} \right) \quad (2-2)$$

En la ecuación (2-2) ID modela el Índice de Dificultad de la tarea siendo D la distancia entre el punto inicial y el centro del punto final y W el ancho del punto final u objetivo. Debido a que la Ley de Fitts relaciona el tiempo que tarda el movimiento MT y las características de la tarea que se realiza (D y W), es posible realizar experimentos con un dispositivo determinado con suficientes participantes y obtener valores para a y b que representen el rendimiento (Throughput TP) que caracteriza dicho dispositivo, como se describe en la

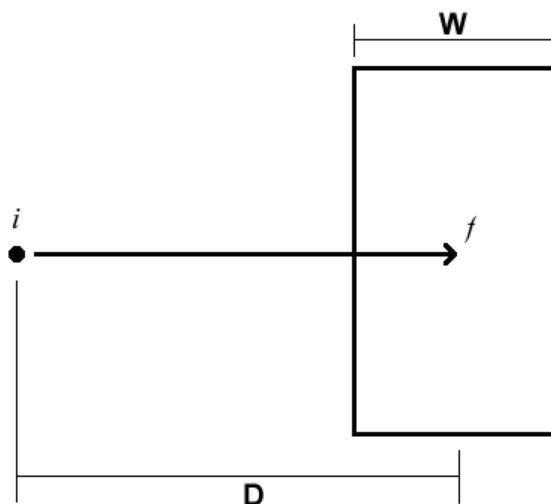


Figura 2-1.: Ley de Fitts para tareas de apuntar

ecuación (2-3). Es así como la Ley de Fitts puede ser usada como un criterio de comparación en tareas específicas.

$$TP = \frac{ID}{MT} \quad (2-3)$$

La Ley de Fitts ha sido verificada en diferentes condiciones, por ejemplo en personas con cuadraplegia, en movimientos con la cabeza [2]. También ha sido usada con éxito en estudios de interacción de niños y niñas, tal es el caso de [5] y [6].

Además de algunas variaciones del modelo inicial de Fitts que siguen comprobando su eficacia. Jax *et al* [10] hacen una extensión de la Ley a tareas con obstáculos y luego tareas tridimensionales con obstáculos [21].

2.2. Trabajos previos

Phillips *et al* [17] resaltan la importancia de la Ley de Fitts como un modelo del movimiento humano y usan su definición para el Índice de Dificultad ($ID = (2D/W)$). Aunque la Ley de Fitts es sin duda de gran utilidad para éste campo de estudio, no todas las investigaciones han usado los mismos valores para determinar el ID , motivando trabajos como el de Drewes [7] donde hace una revisión de las fórmulas usadas para calcular el índice de dificultad. Sin embargo desde el año 2000 una de ellas ha sido la más difundida, haciendo parte del estándar

de *Requerimientos para dispositivos de entrada diferentes al teclado* ISO 9241-9, descrita en los trabajos de Soukoreff y MacKenzie [18]. El valor usado para el ID está dado por la ecuación (2-4).

$$ID = \log_2 \left(\frac{D}{W} + 1 \right) \quad (2-4)$$

donde las unidades de ID son bits. Esta ecuación elimina el problema del cálculo para tareas donde el ancho del objetivo W es muy grande. En estos casos con la ecuación (2-2), el término dentro del logaritmo tiende a cero y el valor del ID tiende a una indeterminación. Al agregar la constante 1 a la ecuación, se elimina la indeterminación y es más consistente con la ecuación de Shannon que determina la capacidad de un canal de comunicaciones con ruido [13].

Aunque hay investigaciones importantes en el uso de dispositivos que no siguen el estándar ni usan la Ley de Fitts como modelo de movimiento ([22], [4]) la gran mayoría lo reporta como una valiosa herramienta para una comparación cuantitativa entre dispositivos de distinta naturaleza. Este es el caso de Natapov *et al* [15] donde se realiza la comparación de dos dispositivos pensados para videojuegos como el *Wii mote*, el control clásico de Nintendo y un ratón estándar como dispositivo de control del experimento, obteniendo buenos resultados para el *Wii mote* pero por debajo del ratón. En este experimento se cuenta con la ayuda de 15 participantes, todos diestros, seis hombres y nueve mujeres.

Algunos de los trabajos basados en la Ley de Fitts se realizan con dispositivos que cuentan con características físicas adicionales como en Kwonso [3] donde se demuestra que la Ley de Fitts es aplicable a dispositivos con visión tridimensional y con retroalimentación física. También Teather *et al* [19] estudian dispositivos con retroalimentación en ambientes virtuales. Koritnik *et al* [12] hacen una comparación de dispositivos de retroalimentación física usando las extremidades inferiores con once participantes; los resultados muestran facilidad de seguimiento cuando se usan estímulos de retroalimentación física.

Xuan *et al* [23] muestran que los dispositivos que capturan el movimiento de los ojos como un apuntador, presentan un rendimiento considerablemente bueno, comparable con el de un ratón estándar. En este experimento se usó el estándar ISO 9241-9, con la participación de diez y seis sujetos voluntarios.

Otros estudios usan la ley de Fitts para comparar o evaluar dispositivos de naturalezas diferentes, como Dang *et al* [4] que usan tablets y comandos de voz. Hatzfeld *et al* [9] estudian el efecto de la retroalimentación física en el uso de dispositivos. En Park *et al* [16] estudian el efecto de funciones de atracción sobre partes específicas de una interfaz gráfica como mejora de la interacción, contando con la participación de diez y ocho participantes.

3. Evaluación con tareas de apuntar

En el capítulo anterior se hizo una revisión de los métodos de evaluación de dispositivos que se usan en la actualidad, en este capítulo se presenta el experimento realizado con tareas de apuntar o de hacer *clíc*, un ejemplo de este tipo de tareas se presenta en la Figura **3-1**. Este experimento pretende evaluar los dispositivos en una tarea muy simple que sea parte de la interacción cotidiana con los computadores. Las tareas de apuntar consisten en ir de un lugar inicial a uno final en el menor tiempo posible, en este caso requiere una acción (*click*) para empezar y otra para terminar, con el fin de eliminar algunos intervalos de tiempo que no deben ser tenidos en cuenta para el análisis según la metodología usada.

3.1. Descripción del Experimento

El experimento se realizó con 22 personas de diversos niveles de educación, diferentes exposiciones a la tecnología, diferentes oficios y edades oscilando entre 13 y 64 años.

Cada persona debía realizar 4 bloques de 9 intentos por cada uno de los 4 dispositivos, es decir, cada persona ejecutó 144 intentos, 3168 intentos en total (ver figura **3-2**). Cada bloque estaba compuesto por nueve intentos, estos intentos presentaban a los participantes una combinación de D y W de forma aleatoria, de manera que el participante no podría saber de antemano en qué lugar aparecerían los objetos, la distancia ni el ancho del objetivo. La combinación de D y W se muestra en la tabla **3-1** produciendo 9 índices de dificultad ID .

Para los $y = 22$ sujetos y $x = 9$ condiciones, se tienen $n = y * x = 198$ pares de datos de MT y de ID_e , es decir, $(ID_{e_{ij}}, MT_{ij})$ donde $1 \leq i \leq y$ y $1 \leq j \leq x$.

3.1.1. Hardware

El área experimental se diseñó con un escritorio común, con acceso cómodo a los dispositivos. Para la visualización se usó un televisor Samsung con tecnología LED de 32" conectado por



Figura 3-1.: Experimento en un espacio bidimensional para una tarea de apuntar.



Figura 3-2.: Participante ejecutando el experimento con el Falcon de Novint

W (pixeles)	D (pixeles)	ID (bits)
30	200	2.9386
30	400	3.8413
30	600	4.39232
50	200	2.32193
50	400	3.16992
50	600	3.70044
80	200	1.80735
80	400	2.58496
80	600	3.08746

Tabla 3-1.: Índices de dificultad usados en el experimento



Figura 3-3.: Ratón óptico Genius Traveler 100

HDMI a una CPU con 4GB de memoria RAM y un procesador AMD Phenom 2 de 3.2 Ghz.

Ratón

Un ratón óptico estándar marca *Genius* modelo Traveler 100 (Figura 3-3¹). Para este dispositivo se han reportado en promedio medidas de TP de 3,7 a 4,9 bits por segundo ([18]). El ratón cuenta con dos grados de libertad DOF (Degree of Freedom), pues está limitado por un espacio bidimensional.

Wiimote

Control remoto de la consola de videojuegos Wii (Figura 3-4²). Cuenta con acelerómetros y sensores infrarrojos para detectar su posición, en este trabajo se usa la detección de la posición del dispositivo usando solo los detectores infrarrojos. En la literatura se reporta un TP de 2,59 bits por segundo ([15]). La conexión al sistema se hizo con la librería *open source* Wiican³. El Wiimote tiene cinco grados de libertad, tres de traslación y dos de rotación.

¹Imagen: <http://diyotech.com.ar/>

²Imagen: <http://www.btframework.com/>

³Wiican v.0.3.3: <https://launchpad.net/wiican>



Figura 3-4.: Wiimote, control remoto de la consola Wii



Figura 3-5.: Sensor Kinect, diseñado para la consola Xbox 360

Kinect

El Kinect de Microsoft es un dispositivo de detección de movimiento que usa una cámara RGB y una infrarroja (Figura 3-5⁴). La última calcula la posición del cuerpo en tres dimensiones midiendo una malla de puntos infrarrojos que el mismo dispositivo emite. Para este experimento se usa la detección de una de las manos como apuntador y el gesto 'presionar' (hacer un movimiento rápido y corto hacia el sensor) como evento para seleccionar un objeto. No se encontraron medidas de *Throughput* para este dispositivo. Para la conexión al sistema se usó el conjunto de librerías de OpenNI⁵ para GNU/Linux junto al controlador para el sensor⁶, ambos software libre. El Kinect cuenta con al menos seis grados de libertad, tres de traslación y tres de rotación.

Falcon

Es un dispositivo que permite el movimiento en tres dimensiones y puede proveer retroalimentación física creado por la empresa Novint (Figura 3-6⁷). Su actuador es una esfera

⁴Imagen: <http://i.msdn.microsoft.com/>

⁵OpenNI: <https://github.com/OpenNI/OpenNI>

⁶Sensor: <https://github.com/avin2/SensorKinect>

⁷Imagen: <http://www.slipperybrick.com/>



Figura 3-6.: Falcon de Novint

sostenida por tres soportes físicos que restringen sus movimientos, en este caso no se usó su capacidad de retroalimentación física ya que el interés estaba principalmente en su capacidad de movimiento en 3D. No se encontraron reportes de TP para el Falcon. Para la conexión se usó la librería *libnifalcon* escrita por Kile Machulis⁸ como alternativa libre y multiplataforma a la librería original del Falcon provista por Novint. Este dispositivo tiene tres grados de libertad, solo en traslación.

3.1.2. Software

Todo el experimento se realizó en un sistema operativo GNU/Linux, en la distribución Mint 12 de 32 bits. Se creó un software en C++ para que los participantes ejecutaran la tarea usando como librería gráfica QGLViewer⁹ y herramientas de interfaz de QT (ver Anexo A).

El software toma un listado de ID 's y genera un conjunto de $n * m$ *intentos* donde n es la cantidad de bloques y m la cantidad de intentos por bloque. Los puntos inicial y final de cada intento están calculados de forma aleatoria pero alrededor del centro de la pantalla. Primero se muestra el punto inicial de color verde, cuando el participante hace click, éste desaparece y aparece el punto objetivo o final de color rojo, al hacer click, este desaparece y aparece el punto inicial del siguiente *intento*. El programa almacena en archivos de texto plano el identificador del participante, el número de bloque y de intento, el punto inicial y final, el ancho W , la distancia D , el tiempo que toma el movimiento MT y los puntos inicial y final reales donde el participante hizo click.

⁸Nifalcon: <http://qdot.github.com/libnifalcon/>

⁹QGLViewer: <http://www.libqglviewer.com/>

3.2. Análisis Cuantitativo

Soukoreff y MacKenzie [18] proponen una metodología para el desarrollo de experimentos basados en la Ley de Fitts, con el fin de unificar las diferentes corrientes de interpretación de la teoría planteada por Fitts que habían surgido hasta el momento. En dicho trabajo se definieron un conjunto de recomendaciones para obtener resultados comparables en la comunidad de investigadores del HCI. A continuación se describen los pasos aplicados al experimento con los dispositivos no convencionales.

Para el diseño del experimento se usó la formulación de Shannon del Índice de Dificultad que es una variación del índice de dificultad de la Ley de Fitts propuesto por MacKenzie, donde el ID está dado por la ecuación (2-4).

Los índices de dificultad ID se presentaron en rangos amplios a los participantes, por lo que D y W se eligieron para maximizar la variación de ID s. En la tabla 3-1 se presenta la lista de índices de dificultad usados.

La variable dependiente medida en el experimento fue el tiempo de movimiento MT , es decir, el tiempo que le toma al sujeto hacer click en el punto inicial y luego en el punto final. De la medida de esta variable se eliminaron los valores de tiempo que no corresponden realmente al movimiento de una tarea de apuntar, estos son:

- *Tiempo en el punto inicial* (tomar el dispositivo), para evitar la medida de este tiempo se empieza a contabilizar el tiempo luego de hacer click en el punto inicial, lo que garantiza que el sujeto ya ha tomado el dispositivo.
- *Tiempo de permanencia*, tiempo que se utiliza cuando la tarea no consiste en dar click ni en el punto inicial ni en el objetivo, sino que las acciones se miden cuando el sujeto permanece un tiempo determinado en uno de los puntos, en este caso, para todos los dispositivos se requirió que se hiciera click sobre los puntos por lo que este intervalo de tiempo no es un factor a considerar.
- *Tiempo de reacción*, Es el tiempo que toma al sujeto identificar el estímulo, en este caso, son círculos en la pantalla que aparecen cuando inicia cada intento. Haciendo que la medida del tiempo se tome cuando se hace click en el primer círculo garantiza que no se está tomando en cuenta el *tiempo de reacción*

Durante el experimento se tomaron medidas en los puntos finales del movimiento, es decir, sobre los puntos donde se hizo click y la distancia real, esto con el fin de determinar la tasa de error en cada intento. Generalmente los *valores atípicos* indican que un sujeto no cumple la condición de hacer el movimiento lo *más rápido posible*, necesaria para que se cumpla la

Ley de Fitts, por tanto, se deben tomar como *valores atípicos* aquellos que cumplan que el tiempo MT sea mayor a tres desviaciones estándar.

El análisis de los resultados obtenidos se realizó de acuerdo al *Índice Efectivo de Dificultad* ID_e y no al ID en (2-4), debido a dos razones expuestas por Soukoreff y MacKenzie:

- Los puntos finales de los movimientos no se alinean perfectamente con el ancho de los objetivos, por lo tanto, las tasas de error no son consistentes entre diferentes valores de ID .
- Para Índices de Dificultad ID fáciles, los sujetos tienden a no moverse suficientemente rápido o hacen click en el lugar más cercano de objetivos grandes.

El ID_e se obtuvo calculando la medida *ajuste por precisión* para cada sujeto y para cada condición de forma independiente, para hallar la variabilidad intrasujeto ([14]). En este caso, debido a que se midió la tasa de error de los *puntos finales*, la desviación estándar σ se usó para calcular el *ancho de objetivo efectivo* (ver [18]) con la ecuación (3-1).

$$W_e = 4,133\sigma \quad (3-1)$$

y la *distancia efectiva* se calculó con la ecuación (3-2)

$$D_e = \bar{D} \quad (3-2)$$

donde \bar{D} está dada por la distancia media desde la posición de inicio hasta los puntos finales donde el sujeto hizo click. A partir de W_e y D_e se obtuvo el *Índice Efectivo de Dificultad* (3-3).

$$ID_e = \log_2 \left(\frac{D_e}{W_e} + 1 \right) \quad (3-3)$$

Este *ajuste por precisión* significa una mejora en el análisis ya que representa los movimientos que los sujetos completaron realmente, y no solamente los que se esperaba que se realizaran.

Se usó la regresión lineal de mínimos cuadrados para encontrar el intercepto a y la pendiente b , que son los parámetros de la ecuación de Fitts (2-1).

Debido a que el propósito del análisis es la comparación de varias condiciones experimentales, el *Throughput* TP es calculado primero para cada sujeto (como la media del TP alcanzado por el sujeto en todas las x condiciones de movimiento), de ahí se deduce el *Throughput* total para cada dispositivo dado en la ecuación (3-4).

$$TP = \frac{1}{y} \sum_{i=1}^y \left(\frac{1}{x} \sum_{j=1}^x \frac{IDe_{ij}}{MT_{ij}} \right) \quad (3-4)$$

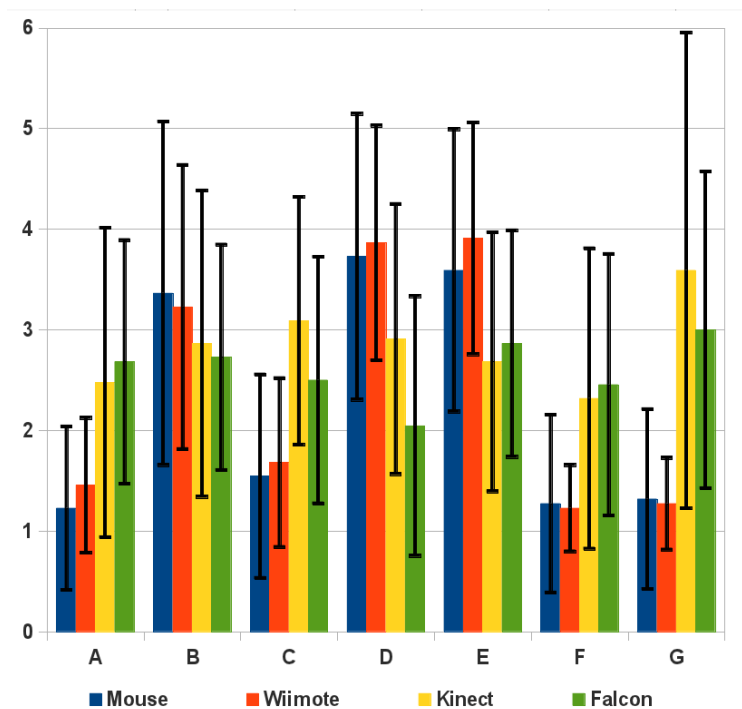


Figura 3-7.: Respuestas al cuestionario luego de ejecutar los experimentos.

donde y es el número de sujetos y x representa el número de condiciones de movimiento, las unidades de TP son bits por segundo (bps).

Calculado de esta forma, el TP es una medida que abarca tanto la velocidad como la precisión en la ejecución del movimiento. La velocidad y la precisión son promediadas sobre los rangos de los valores de ID_e usados en el estudio, y como tal, esta aproximación combina el efecto de los parámetros intercepto y la pendiente del modelo de regresión en una medida dependiente que puede ser comparada entre dispositivos.

3.3. Análisis Cualitativo

Al finalizar el experimento, cada participante llenó una encuesta donde respondió algunas de las preguntas del estándar que describen la experiencia con cada dispositivo. En la Figura 3-7 se muestran los resultados a los siguientes criterios:

- A. Fuerza requerida en el actuador
- B. Suavidad durante la operación

- C. Esfuerzo mental requerido
- D. Exactitud apuntando
- E. Velocidad de operación
- F. Fatiga en los dedos
- G. Fatiga en la muñeca

Sobre cada uno de los ítems se formuló una pregunta con posibles respuestas de 1 a 5, donde 1 significaba poco y 5 mucho. De los resultados se puede concluir que en promedio los participantes consideraron que el ratón requirió menos esfuerzo y generó menos fatiga física. El Wiimote requirió relativamente poco esfuerzo para su uso, se destaca en la exactitud para apuntar y en la velocidad de respuesta generando menos fatiga que el ratón. El Kinect demandó un esfuerzo adicional al ratón y generó fatiga en las manos y dedos. Por último el Falcon requirió un esfuerzo físico y mental mayor que los demás dispositivos y fue menos preciso para apuntar. Estos resultados presentan altas variaciones debido a la subjetividad de los participantes, pues al tener diferentes niveles de conocimiento de la tecnología (y de los dispositivos en sí), las respuestas dependen únicamente de la experiencia derivada del experimento.

3.4. Resultados

Los resultados muestran (Figura 3-8) que el ratón tiene un TP de 3,50 bps que es comparable con estudios anteriores lo que verifica la validez del modelo experimental. El Wiimote obtuvo un desempeño aceptable con 2,44 bps que también verifica resultados como los obtenidos por [15]. Por otro lado el TP obtenido para el Kinect es bajo en comparación, TP 1,08 bps. El Falcon obtuvo el valor más bajo, con 0,89 bps, este resultado puede ser explicable por que este dispositivo presentaba algunos milisegundos de retardo (*latencia*), lo que implica que el rendimiento (TP) se pudo ver afectado considerablemente como lo demuestran [20], donde un valor pequeño de latencia (25 ms) puede afectar el TP alrededor del 15%. En la evaluación cualitativa los participantes calificaron de forma general los dispositivos de 1 a 5 donde 5 indica mayor preferencia del dispositivo durante los experimentos. La Figura 3-9 muestra que los participantes manifestaron preferencia por los dispositivos de mayor TP .

El ratón y el Wiimote presentaron cuantitativamente rendimientos que permiten compararlos con estudios anteriores. El Wiimote plantea una alternativa interesante para el uso del ratón en tareas de apuntar en el PC y los participantes resaltaron su facilidad de uso.

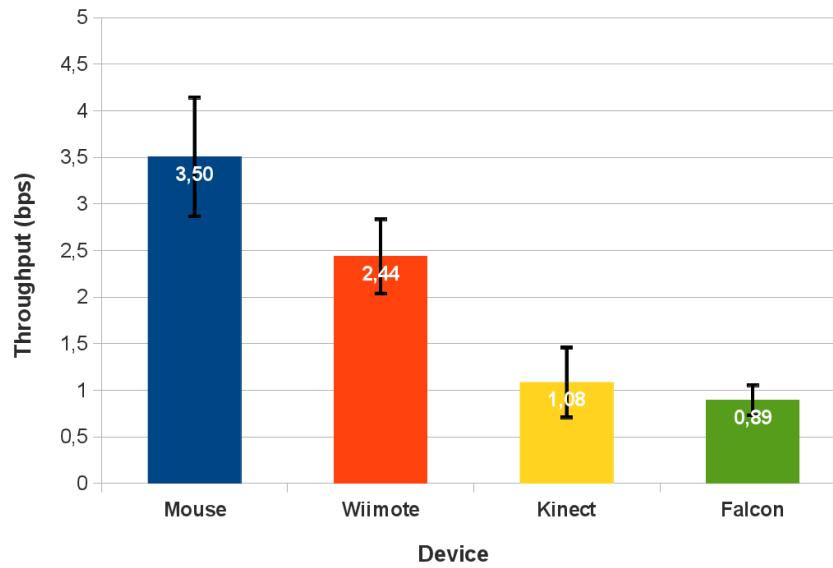


Figura 3-8.: Throughput total por dispositivo calculado con ID_e , índice de dificultad ajustado.

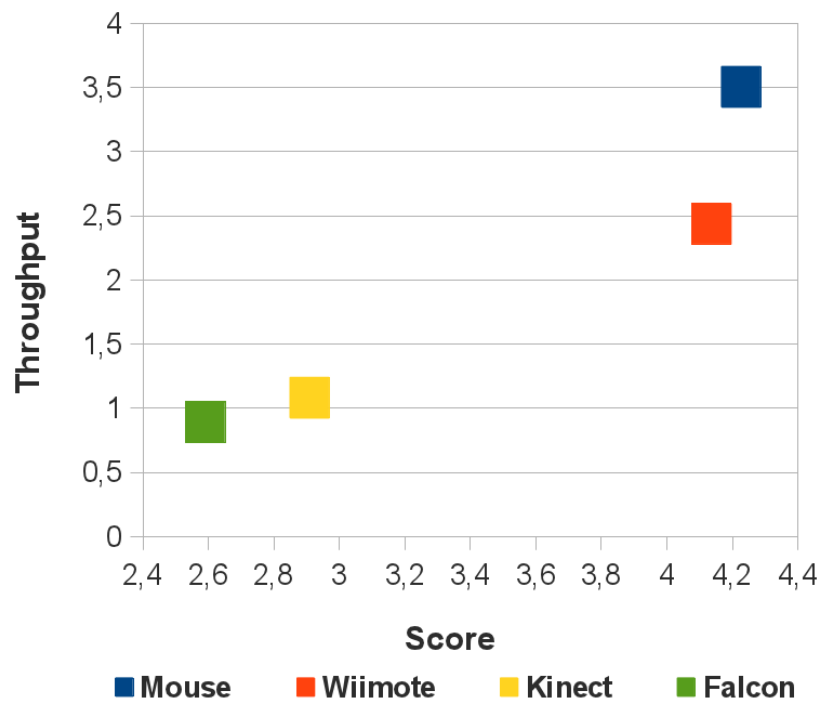


Figura 3-9.: Comparación entre el Throughput y la preferencia de los participantes.

Las dos nuevas medidas reportadas son bajas para este tipo de tareas, ya que se esperaría que debido a que los movimientos en el Kinect y el Falcon son más naturales respecto a tareas en el mundo físico, tuvieran un mayor desempeño también en la interacción con los computadores. Aunque el Kinect no obtuvo un rendimiento comparable al ratón, los participantes mostraron mucho agrado al usarlo, incluso a pesar de generar cansancio en las muñecas. El Falcon no parece facilitar este tipo de tareas debido a la latencia, que afecta gravemente el rendimiento, además la mayoría de los participantes indicaron incomodidad y cansancio excesivo usándolo.

Debido a que las tareas de apuntar son un tipo muy particular de interacción, se plantea la evaluación de dispositivos en un ambiente más complejo, con tareas más complejas. En el siguiente capítulo se realiza ésta evaluación en un entorno tridimensional.

4. Evaluación en ambientes tridimensionales

En los resultados experimentales de la evaluación de dispositivos en tareas de apuntar, se observó una ventaja del ratón seguido por el Wiimote y con rendimiento inferior el Kinect y el Falcon. Sin embargo, al ser el ratón un dispositivo que mapea la posición de una superficie bidimensional, podría no ser un dispositivo adecuado para tareas ejecutadas en tres dimensiones, donde dispositivos diseñados con mayores grados de libertad llegan a tener relación uno a uno con el espacio simulado.

En este capítulo se muestra el resultado de aplicar la evaluación a cuatro dispositivos usando una tarea simple en tres dimensiones (Figura 4-1), para lo cual se desarrolló un software especializado que es capaz de medir las variables requeridas. En este experimento se descartó el Falcon Novint, pues en el primer experimento se observó una dificultad considerable por parte de los participantes contra solo tres grados de libertad, en cambio se usó un dispositivo que sigue los mismos principios pero con una interfaz de entrada más completa, el *Space Navigator* que cuenta con seis grados de libertad.

Con el objetivo de comparar los dispositivos seleccionados de la forma más adecuada posible, se definió como metáfora de visualización en tres dimensiones la *Primera Persona* debido a que da una sensación de mayor realismo, pues es la representación de lo que vería una persona si estuviera en la escena.

4.1. Análisis demográfico

El experimento se realizó con la participación de 14 personas de diferentes niveles de escolaridad, en su mayoría habían participado en el primer experimento, de modo que aunque no conocían las particularidades del experimento en tres dimensiones, sabían que el experimento requeriría una gran cantidad de repeticiones de una tarea determinada con diferentes dispositivos.

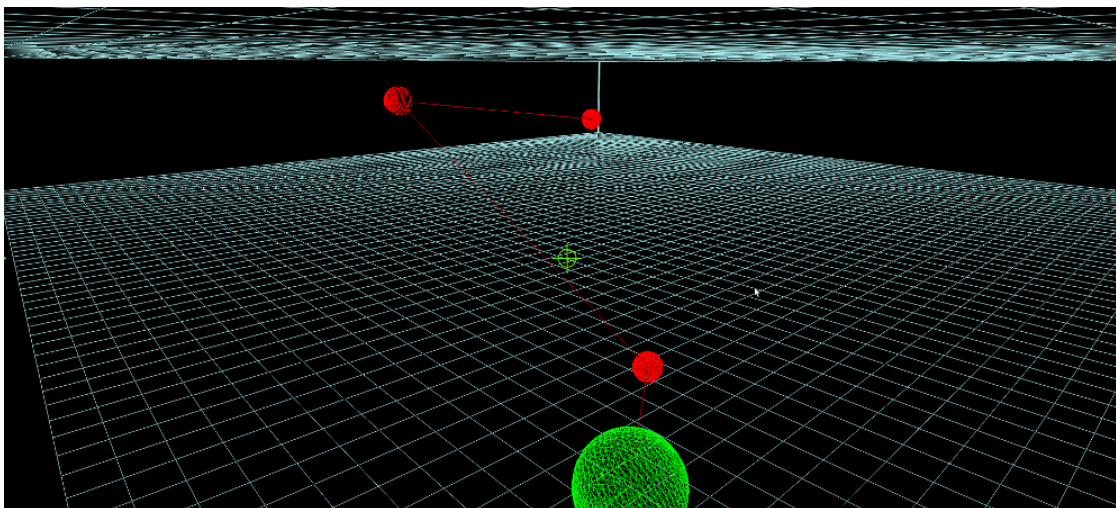


Figura 4-1.: Experimento en un espacio tridimensional

Rango de edad	Cantidad de participantes
12 a 20	1
21 a 29	3
30 a 38	5
39 a 47	1
48 a 57	4

Tabla 4-1.: Distribución de edades en el experimento 3D

La edad de los participantes va desde los 12 a los 57 años distribuidos en cinco grupos (ver tabla 4-1). El nivel académico es variado como se aprecia en la Figura 4-2.

4.2. Descripción del Experimento

Cada *intento* estaba compuesto por tres *intervalos* unidos entre sí con una línea visible. Al iniciar el *intento*, la cámara en primera persona (Figura 4-3¹), iniciaba en la posición (10, 10, 150), al frente de la esfera verde, marcado en el esquema de la Figura 4-4 a la altura del marcador del eje z.

El participante debía usar el dispositivo de turno para ir hacia la esfera verde en donde iniciaba el conteo del tiempo del *intervalo 1*, el cual está definido desde el centro de la esfera

¹Ícono de la cámara libre para uso no-comercial: <http://mmwww.iconshock.com>

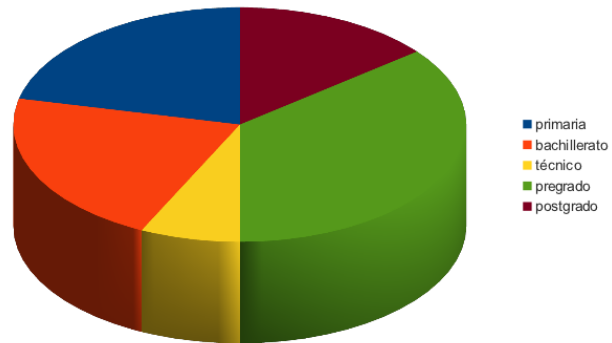


Figura 4-2.: Nivel académico de los participantes

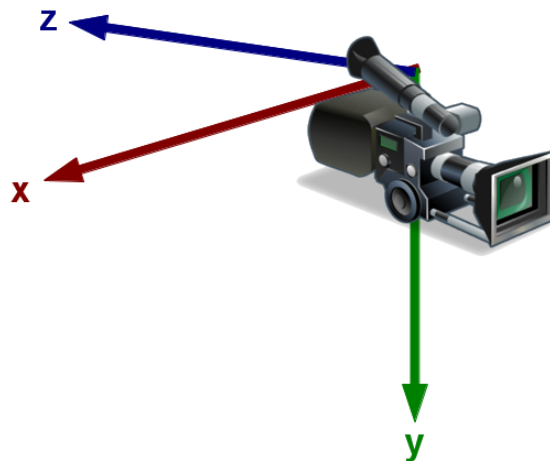


Figura 4-3.: Modelo de cámara, sistema coordinado para la visualización en primera persona

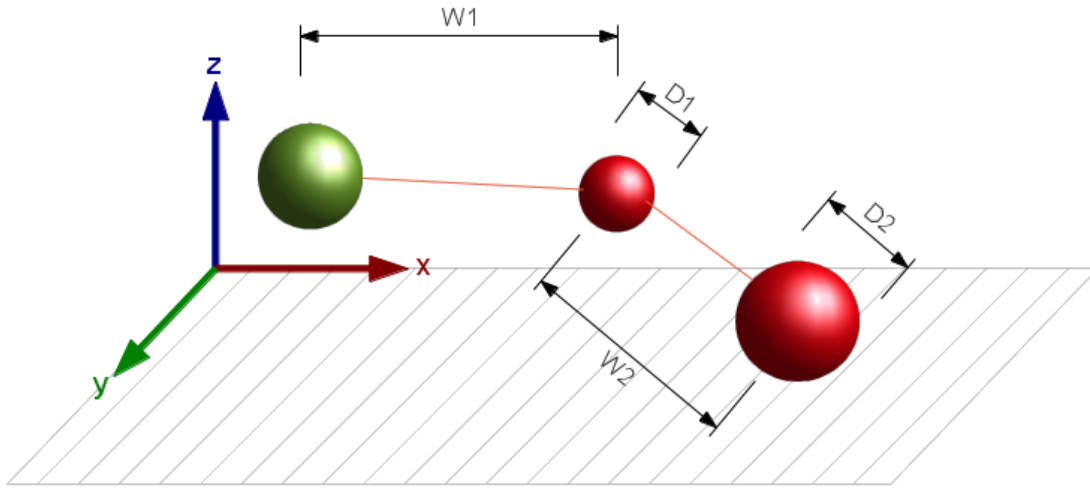


Figura 4-4.: Esquema de un *intento* en el experimento en 3D

verde hasta el centro de la primera esfera roja. Cada *intervalo* en el *intento* tiene un índice de dificultad ID definido por la distancia entre la esfera anterior y la actual y el diámetro de la esfera actual. En el caso del primer *intervalo* de la figura, W_1 y D_1 conforman el ID_1 . De esta forma, para cada *intervalo* se obtiene un MT o tiempo de movimiento, un ID o índice de dificultad y por consiguiente un $TP = ID/MT$ o rendimiento por *intervalo*.

Cada persona debía realizar 3 *bloques* de 9 *intentos*, donde cada *intento* estaba compuesto por 3 *intervalos*, esto por cada uno de los 4 dispositivos, es decir, cada persona ejecutó 324 *intervalos*, 4536 *intentos* en total para este experimento. En la Figura 4-5 un participante ejecuta uno de los *intentos* en tres dimensiones.

La combinación de D y W se muestra en la tabla 4-2 produciendo 9 índices de dificultad ID usados de manera aleatoria en el experimento. El rango de los ID 's va desde 1.8 hasta 6.2, siendo considerablemente amplio, lo que mejora la aplicación del experimento según [18].

Para los $y = 14$ sujetos y $x = 9$ condiciones, se tienen $n = y * x = 126$ pares de datos de MT y de ID_e , es decir, $(ID_{e_{ij}}, MT_{ij})$ donde $1 \leq i \leq y$ y $1 \leq j \leq x$.

4.2.1. Hardware

El área experimental se diseñó con un escritorio común, con acceso cómodo a los dispositivos. Para la visualización se usó un televisor Samsung con tecnología LED de 32" conectado por HDMI a una CPU con 4GB de memoria RAM y un procesador AMD Phenom 2 de 3.2 Ghz. El mapeo de los dispositivos aplica respecto al marco de referencia de la cámara (Figura 4-3)



Figura 4-5.: Participante ejecutando el experimento en 3D con el Kinect.

W (píxeles)	D (píxeles)	ID (bits)
20	200	3.4594
20	850	5.4429
20	1500	6.2479
50	200	2.3219
50	850	4.1699
50	1500	4.9542
80	200	1.8073
80	850	3.5392
80	1500	4.3038

Tabla 4-2.: Índices de dificultad para el experimento en tres dimensiones

Acción	Mapeo
Traslación eje X	No disponible
Traslación eje Y	No disponible
Traslación eje Z	Adelante (-Z) botón izquierdo, Atrás (Z) botón derecho
Rotación eje X	Arrastrar la mira hacia arriba o hacia abajo
Rotación eje Y	Arrastrar la mira hacia la derecha o hacia la izquierda
Rotación eje Z	No disponible

Tabla 4-3.: Mapeo del ratón en el experimento 3D

y no al de la escena. Algunas de las acciones no pueden ser mapeadas debido a imposibilidades de los dispositivos por lo que fueron simuladas usando botones, de forma que fueran similares a las metáforas de navegación de dichos dispositivos en videojuegos u otras aplicaciones 3D.

Ratón

Un ratón láser estándar marca *Genius* modelo NetScroll 200 Laser Debido a que el ratón es un dispositivo que se desplaza sobre una superficie, está restringido para ejecutar acciones en una escena tridimensional. Por sus limitaciones, se han desarrollado diferentes formas de mapear los datos de entrada. En este caso se usó como en algunos videojuegos en primera persona (Tabla 4-3).

Wiimote

Control remoto de la consola de videojuegos Wii (Figura 3-4). Cuenta con acelerómetros y sensores infrarrojos para detectar su posición, en este experimento se usa la detección de la posición del dispositivo por los acelerómetros. La conexión al sistema se hizo con la librería *open source* Wiican ².

Dado que el Wiimote carece de acelerómetros para detectar el giro en el eje y, fue necesario hacer el mapeo como se ve en la Tabla 4-4, con la configuración que resultó ser más natural en varias pruebas preliminares al experimento.

²Wiican v.0.3.3: <https://launchpad.net/wiican>

Acción	Mapeo
Traslación eje X	Acelerómetro con el giro “roll”
Traslación eje Y	No disponible
Traslación eje Z	Adelante (-Z) botón B, Atras (Z) botón A
Rotación eje X	Acelerómetro con el giro “pitch”
Rotación eje Y	No disponible
Rotación eje Z	No disponible

Tabla 4-4.: Mapeo del Wiimote en el experimento 3D

Acción	Mapeo
Traslación eje X	Movimiento de ambas manos a la derecha o a la izquierda
Traslación eje Y	Movimiento de ambas manos arriba o abajo
Traslación eje Z	Movimiento de ambas manos adelante o atrás
Rotación eje X	No disponible
Rotación eje Y	Movimiento de una mano adelante y la otra atrás
Rotación eje Z	Movimiento de una mano arriba y la otra abajo

Tabla 4-5.: Mapeo del Kinect en el experimento 3D

Kinect

El Kinect de Microsoft es un dispositivo de detección de movimiento que usa una cámara RGB y una infrarroja (Figura 3-5). La última calcula la posición del cuerpo en tres dimensiones midiendo una malla de puntos infrarrojos que el mismo dispositivo emite. En este experimento se usa la detección de ambas manos para controlar la cámara. Para la conexión al sistema se usó, como en el experimento anterior, el conjunto de librerías de OpenNI³ para GNU/Linux junto al controlador para el sensor⁴.

El mapeo de los movimientos de las manos resultó ser mucho más intuitivo para el Kinect (Tabla 4-5), siendo la rotación en el eje X la única que no se definió debido a que no se dispuso de un gesto suficientemente natural que representara esa acción.

³OpenNI: <https://github.com/OpenNI/OpenNI>

⁴Sensor: <https://github.com/avin2/SensorKinect>

Acción	Mapeo
Traslación eje X	Movimiento en el eje X del actuador
Traslación eje Y	Movimiento en el eje Y del actuador
Traslación eje Z	Movimiento en el eje Z del actuador
Rotación eje X	Giro en el eje X del actuador
Rotación eje Y	Giro en el eje Y del actuador
Rotación eje Z	Giro en el eje Z del actuador

Tabla 4-6.: Mapeo del Space Navigator en el experimento 3D



Figura 4-6.: Space Navigator de 3D connexion.

Space Navigator

El *Space Navigator* es un dispositivo de la empresa *3D connection* (Figura 4-6⁵). Cuenta con seis grados de libertad ejecutados directamente por el dispositivo, el soporte para sistemas GNU/Linux actualmente es completo y el mapeo se hace directamente desde el kernel del sistema operativo (Tabla 4-6).

4.2.2. Software

Todo el experimento se realizó en un sistema operativo GNU/Linux, en la distribución Mint 12 de 32 bits. El software fue desarrollado usando el lenguaje de programación *Processing*⁶

⁵Imagen: <http://www.3dconnexion.com/>

⁶<http://processing.org/>

que está basado en *Java*. El ambiente tridimensional fue generado usando la librería *Proscene*⁷ del grupo de investigación RemixLab de la Universidad Nacional de Colombia.

El software *devices3d*⁸ cuenta con una capa de abstracción que permite implementar clases particulares para cada dispositivo que se quiera mapear a tres dimensiones y se conecta directamente con la clase *HIDevice* de *Proscene*, así es posible alimentar el entorno virtual con valores para la traslación y la rotación en los tres ejes coordenados.

Las clases para los dispositivos usados en el presente experimento se definieron con las siguientes particularidades de acuerdo al dispositivo:

- **Ratón:** El dispositivo está completamente soportado por el sistema operativo, el mapeo en primera persona está definido en la librería *Proscene* por lo que la clase solo lo activa o lo desactiva.
- **Wiimote:** El Wiimote requirió el uso de la librería *Wiican*, esta librería ofrece la posibilidad de crear mapeos personalizados disponiendo de los sensores y los botones del dispositivo, sin embargo, existe una limitación respecto a que el direccionamiento de los datos de entrada se hace sobre el ratón, impidiendo la utilización de todas las posibilidades el control. En este experimento se aprovechó el uso de los acelerómetros como el método más intuitivo de uso.
- **Kinect:** La captura de la información sensada está realizada por la librería *OpenNI* que recibe los datos del mapa de profundidad generado por la malla infrarroja y captada por la cámara integrada en el dispositivo. Luego los datos son analizado por el *middleware NITE* que con el cuerpo de las personas, detectado por *OpenNI* halla la posición de las manos y retorna para cada una un vector tridimensional que es usado para controlar la escena 3D.

Al registrar ambas manos, *devices3d* calcula un vector en la mitad de las dos y lo toma como punto central de referencia desde donde son medidas las posiciones relativas de las manos.

- **Space Navigator:** Al estar soportado por el *kernel* del sistema operativo, no se requirió una configuración previa, sin embargo, para obtener los datos emitidos por el actuador en *Processing*, se usó la librería *Procontrol*⁹ que lee los datos detectados en el puerto.

devices3d cuenta con otro componente que genera los experimentos a partir de una tabla

⁷<http://code.google.com/p/proscene/>

⁸<https://github.com/maparrar/devices3d>

⁹<http://creativecomputing.cc/p5libs/procontrol/>

de índices de dificultad ID y de posiciones en el espacio, esta información la lee de archivos planos y presenta cada *intento* con sus respectivos *intervalos* a los participantes de forma aleatoria.

Para cada *intento*, el participante debe pasar por la esfera inicial (de color verde) y luego por el resto de esferas de *intervalo* (de color rojo) lo más rápido posible y tratando de alejarse lo menos posible de la línea de guía que une las esferas. Al terminar cada *intento* se empieza automáticamente el siguiente hasta que se completen los *intentos* del *bloque*. Cuando estos finalizan, el experimento termina y se debe continuar con el siguiente dispositivo.

El software captura los siguientes datos por cada *intervalo* realizado por cada participante:

- block: número del *bloque* que se está ejecutando
- trial: número del *intento*
- interval: número del *intervalo*
- ini(x,y,z): posición del centro de la esfera del *intervalo* anterior
- end(x,y,z): posición del centro de la esfera del *intervalo* actual
- insideInterval(x,y,z): Punto donde la cámara entra a la esfera del *intervalo* actual respecto a las coordenadas del *intervalo* actual
- insideWorld(x,y,z): Punto donde la cámara entra a la esfera del *intervalo* actual respecto a las coordenadas del mundo
- D: Distancia entre los centros de las esferas de los *intervalos* anterior y actual
- W: Diámetro de la esfera del *intervalo* actual
- ID: Índice de dificultad para el *intervalo*
- startTime: Tiempo contado desde que se pasa por el centro de la esfera del *intervalo* anterior.
- insideTime: Tiempo contado desde que se inicia la ejecución de la aplicación hasta que se pasa por la esfera del *intervalo* actual.

A partir de *insideTime* y *startTime* se obtiene el tiempo que se tarda en realizar cada intervalo, este tiempo es denominado Tiempo de Movimiento MT por sus siglas en inglés.

4.3. Análisis Cuantitativo

Para el análisis cuantitativo se usó un procedimiento similar al usado en el experimento en tareas de apuntar, basado en el estándar ISO 9241-9 y las recomendaciones de Soukoreff y MacKenzie [18].

Se usó la variación del ID de MacKenzie basado en la fórmula de Shannon, ecuación (2-4). De esta forma, la ley de Fitts queda expresada en la ecuación (4-1)

$$MT = a + b * \log_2 \left(\frac{D}{W} + 1 \right) \quad (4-1)$$

Como se vio en la Tabla 4-2, los índices de dificultad están definidos en un rango suficientemente grande (1.8 hasta 6.2 bps) de acuerdo a la metodología, lo que permite mostrarle a los participantes una gama amplia de posibilidades en cada *intento*.

Para este experimento la variable dependiente es el tiempo de movimiento MT desde que inicia un intervalo, hasta que este termina. Los errores para cada intervalo están dados por dos variables, error de distancia e_D y error de diámetro e_W que son dependientes entre sí y se pueden calcular a partir del punto por donde la cámara entra a la esfera que corresponda en cada *intervalo*. En la Figura 4-7 P representa el punto por donde entró la cámara, el eje Z positivo está apuntando hacia donde está la esfera del *intervalo* anterior, de esta forma se simplifican los cálculos, pues a mayor desviación del punto $(0, 0, z)$, para cualquier valor de z , indica un mayor error en e_W mientras que la desviación respecto a $z = 0$ indica un error respecto a e_D .

Debido a que es necesario tener un punto de referencia en la esfera que representa el fin de cada *intervalo*, en los casos en los que no se obtiene el punto porque un participante no pasa por la esfera, se consideran con error infinito y no son tenidos en cuenta para el análisis de error. Sin embargo, más adelante se presenta el *índice de fallos* para cada dispositivo, que relaciona la cantidad de veces que no se termina un *intervalo* respecto a la cantidad de *intervalos* presentados a cada participante.

De acuerdo a la metodología usada [18], es necesario eliminar ciertos tiempos del análisis a fin de evitar el *ruido* en la medida de MT , a continuación se presenta la forma como se evitó incluir dichos tiempos:

- *Tiempo en el punto inicial* Implica que al participante le toma un tiempo determinado tomar el dispositivo para iniciar el experimento, en este caso, los participantes podían descansar luego de completar cada *intento* y antes de pasar por la esfera verde. El tiempo se empezaba a tomar justo cuando se pasaba por la esfera inicial, lo que garantizaba que el participante ya había tomado el dispositivo.

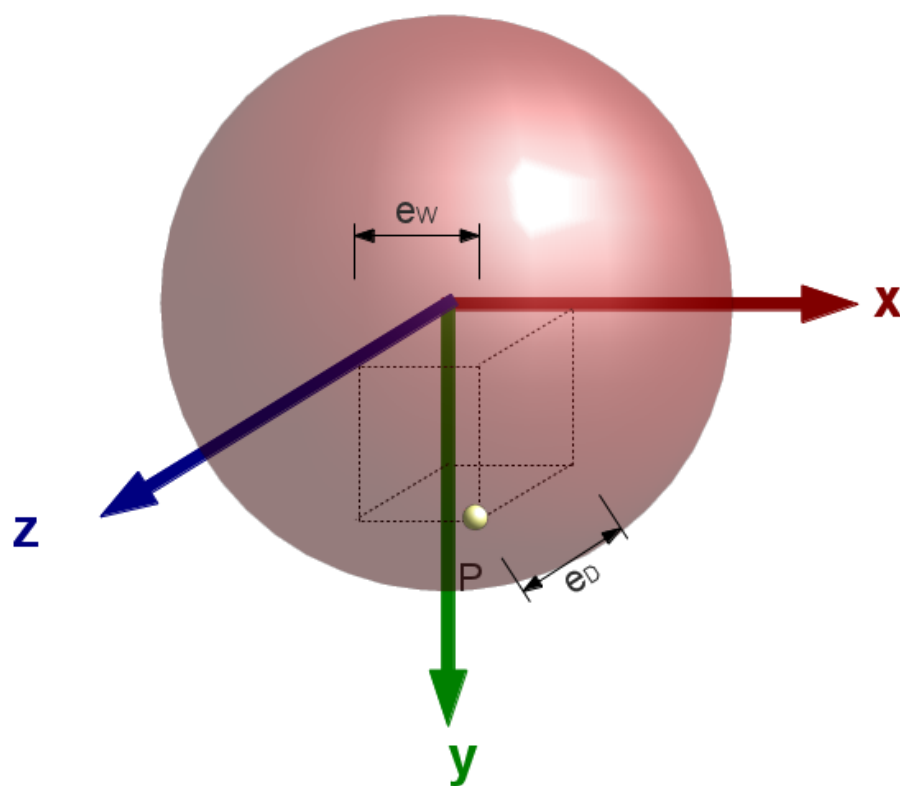


Figura 4-7.: Esquema para el cálculo de error en los intervalos

- *Tiempo de permanencia*, es el tiempo que toma estar en una de las esferas, sin embargo en este caso, como en la definición básica de la Ley de Fitts, una de las condiciones era avanzar lo más rápido posible, esto implicaba que el tiempo de permanencia era cero, pues mientras terminaba un *intervalo*, el tiempo del siguiente empezaba a correr.
- *Tiempo de reacción*, Cuando se inicia cada *intento*, se presentan todos los *intervalos* de dicho *intento* de modo que el participante los vea desde el punto de partida, lo que reduce el tiempo de reacción a cero.

La eliminación de los valores atípicos se hizo con el criterio de tres desviaciones estándar de la media, es decir, los valores que estaban por debajo de la media, menos tres desviaciones estándar o por encima de la media más tres desviaciones estándar, fueron considerados atípicos y eliminados del análisis. Los valores atípicos en el tiempo fueron eliminados por dispositivo y por índice de dificultad.

En las Figuras 4-8, 4-9, 4-10, 4-11, se muestran los datos después de eliminar los valores atípicos y de calcular la variabilidad inter-persona, es decir W_e y D_e , como se describió en el capítulo anterior. En las figuras se representa el tiempo de movimiento MT como una función del índice de dificultad ID , siendo una relación creciente. También se muestra la línea de regresión por mínimos cuadrados (línea roja).

El error fue calculado usando los puntos de entrada de la cámara a las esferas finales en cada *intervalo*. En la ecuación 4-2 se muestra el cálculo de error de distancia e_D , siendo mayor cuando se aleja del eje z.

$$e_D = \frac{W}{2} - |P_z| \quad (4-2)$$

donde W es el diámetro de la esfera y P_z es el valor de la componente z del punto P por donde ingresó la cámara a la esfera. El error en el ancho e_W se calculó con la ecuación 4-3, que toma como error, la distancia del origen de coordenadas de la esfera a las componentes x y y del punto P por donde ingresó la cámara.

$$e_W = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \quad (4-3)$$

donde P_x y P_y son las componentes x y y respectivamente del punto P . Las medidas de error fueron usadas para recalcular los valores de *ancho efectivo* W_e y *distancia efectiva* D_e para cada participante y ya están incluidas en el análisis de las figuras 4-8, 4-9, 4-10 y 4-11.

Los resultados, aunque no se ajustan completamente al modelo planteado en el estándar, debido principalmente a que se trata de un experimento tridimensional, proporcionan la información suficiente para comparar los dispositivos en la tarea específica de 3D.

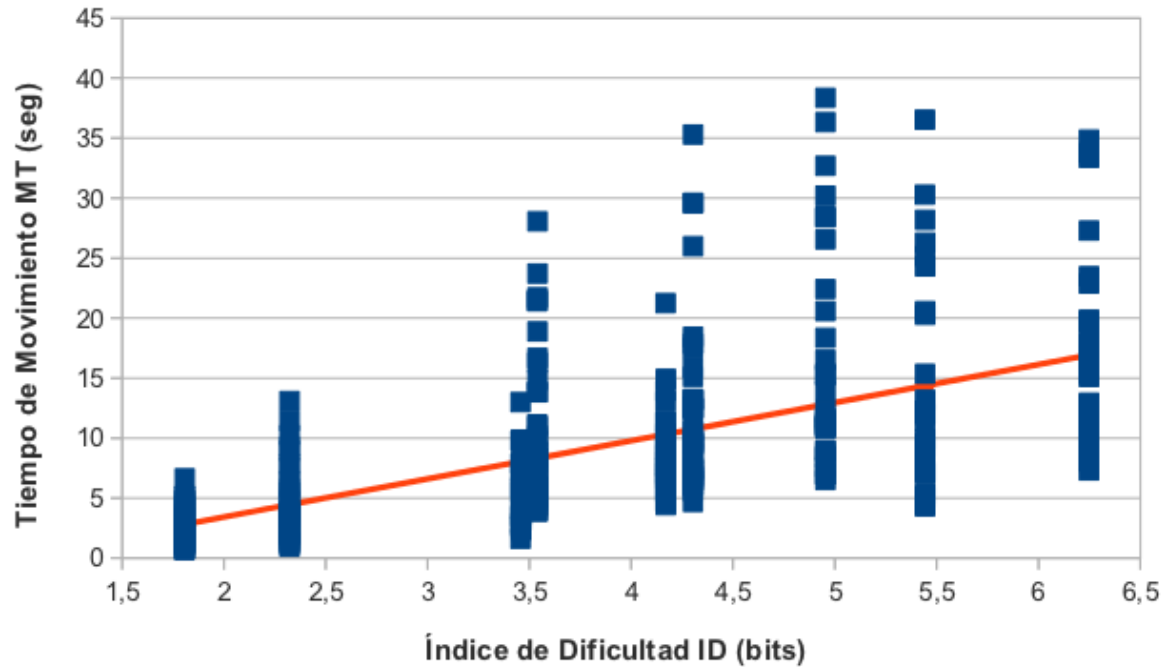


Figura 4-8.: Gráfica de ID vs. MT para el Kinect. Pendiente: 3.18, intercepto: -2.93

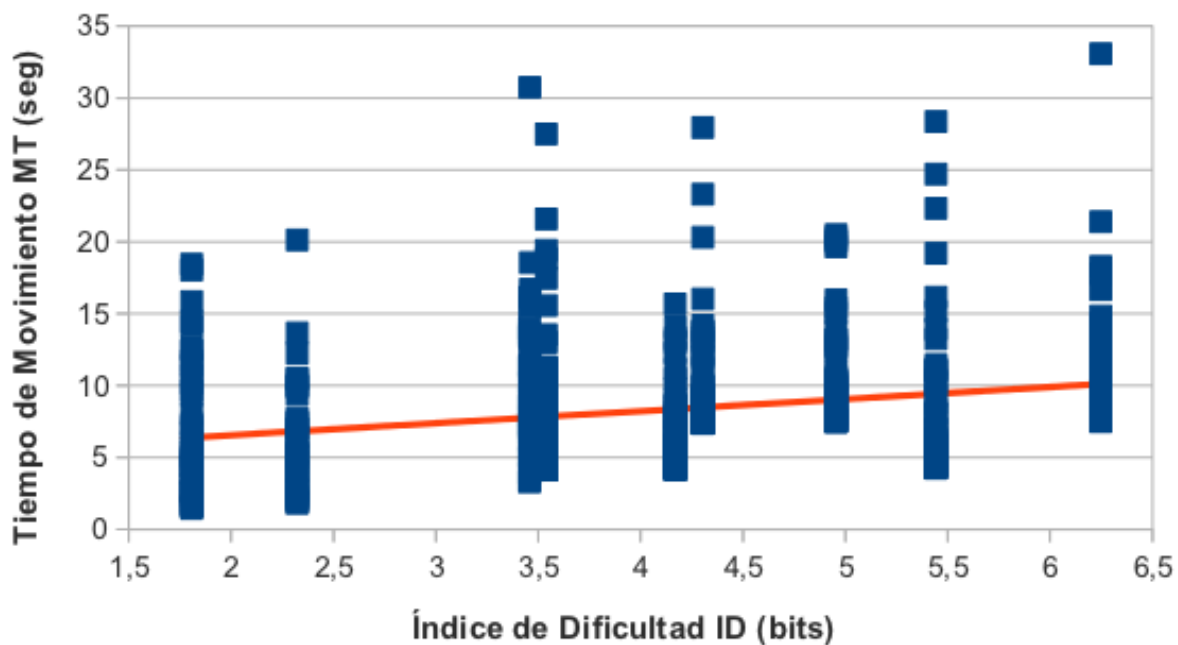


Figura 4-9.: Gráfica de ID vs. MT para el ratón. Pendiente: 0.83, intercepto: 4.88

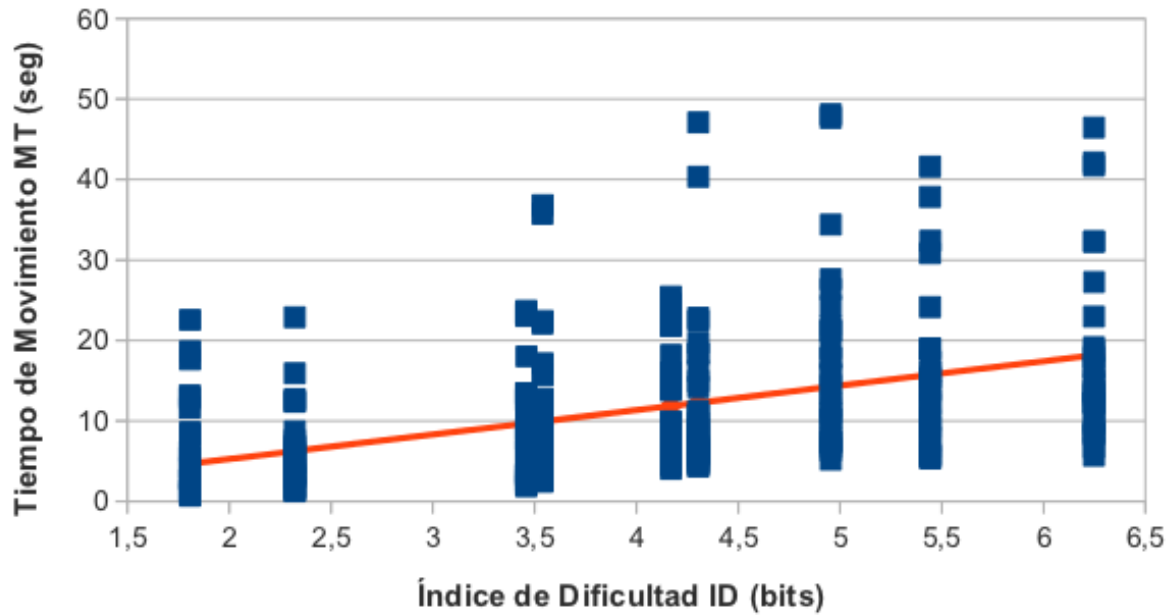


Figura 4-10.: Gráfica de ID vs. MT para el Space Navigator. Pendiente: 3.03, intercepto: -0.80

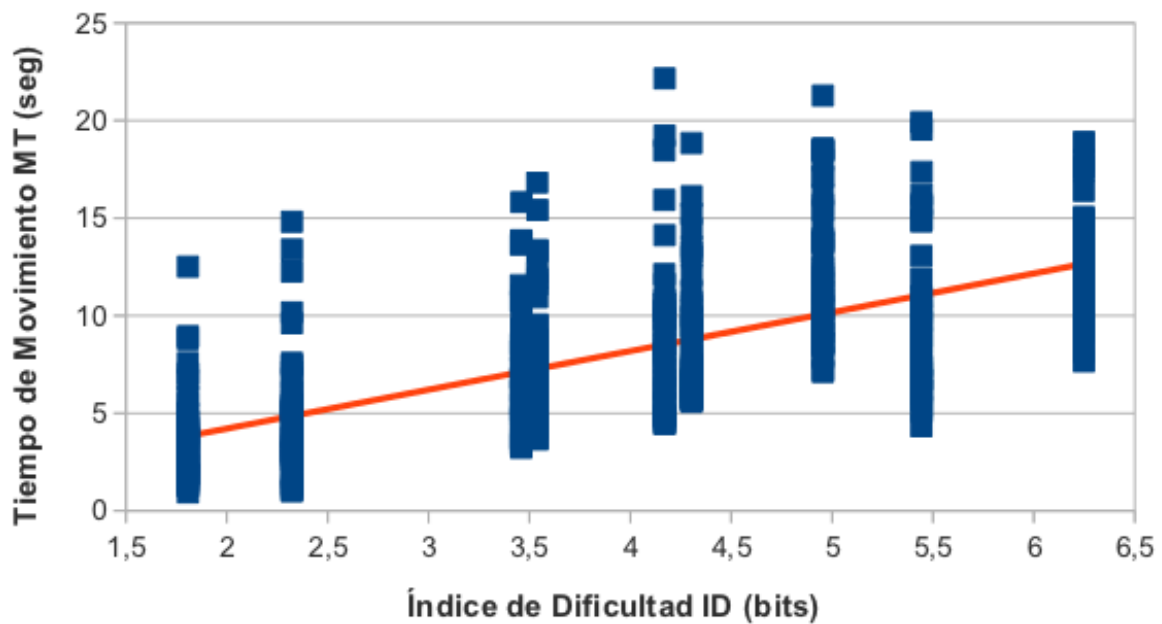


Figura 4-11.: Gráfica de ID vs. MT para el Wiimote. Pendiente: 1.98, intercepto: 0.24

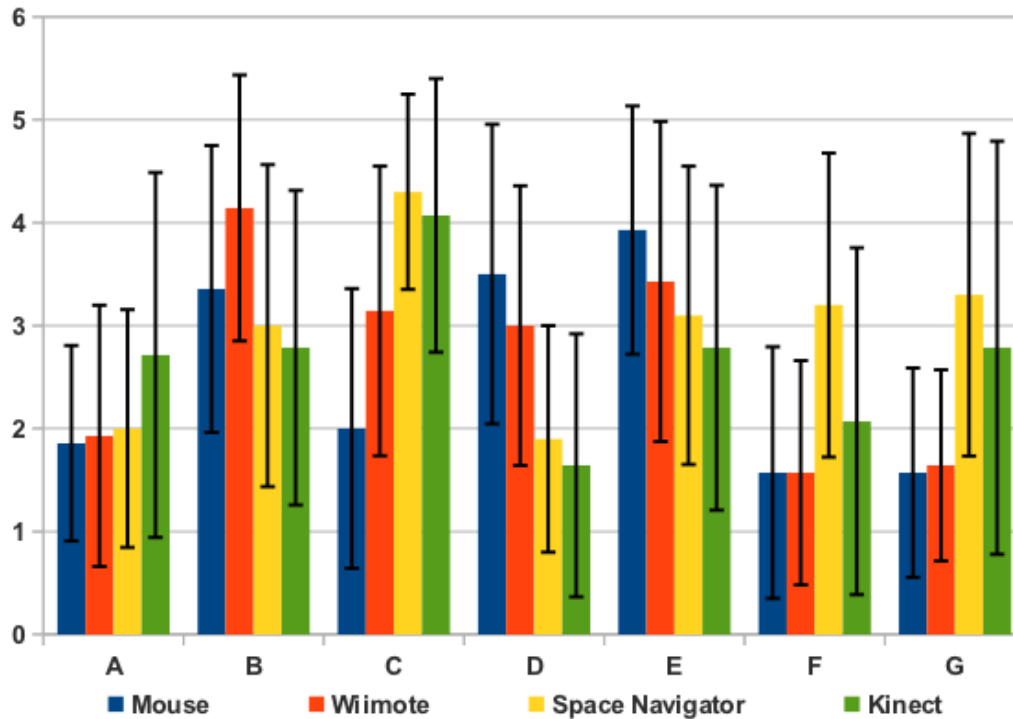


Figura 4-12.: Respuestas al cuestionario luego de ejecutar los experimentos en 3D

4.4. Análisis Cualitativo

Al finalizar el experimento, cada participante llenó una encuesta donde respondió algunas de las preguntas del estándar que describen la experiencia con cada dispositivo. En la Figura 4-12 se muestran los resultados a los siguientes criterios:

- A. Fuerza requerida en el actuador
- B. Suavidad durante la operación
- C. Esfuerzo mental requerido
- D. Exactitud apuntando
- E. Velocidad de operación
- F. Fatiga en los dedos
- G. Fatiga en la muñeca

Preferencia	Dispositivo
1	Wiimote
2	Kinect
3	Ratón
4	Space Navigator

Tabla 4-7.: Preferencia de uso de dispositivos, siendo 1 el que los participantes prefieren usar para tareas 3D

Sobre cada uno de los ítems se formuló una pregunta con posibles respuestas de 1 a 5, donde 1 significaba poco y 5 mucho. En los resultados se puede observar que los dispositivos que más esfuerzo requirieron en su ejecución fueron el Space Navigator y el Kinect, sin embargo el esfuerzo mental fue mucho mayor en el Space Navigator, según los participantes porque no era muy intuitivo entender que al mover o girar el actuador, se movería hacia ese mismo lugar en la escena.

Los dispositivos que más generaron fatiga fueron de nuevo el Space Navigator y el Kinect, el primero por la dificultad que representa tener la mano alrededor del actuador durante tiempos muy largos, el Kinect por su parte requiere un esfuerzo al tener que mantener las manos a la altura de los hombros ya que no es una posición natural para el cuerpo.

Como el de mayor exactitud y velocidad de respuesta está el ratón, a pesar de no obtener los mejores resultados en la evaluación cuantitativa. Esta percepción puede ser apoyada por el hecho de que el ratón es un dispositivo de uso cotidiano, mientras que los otros implicaban un cambio en la manera de interactuar con el computador.

El Wiimote fue en promedio el más suave en la operación, sin embargo, en la exactitud y la velocidad de respuesta está por debajo del ratón.

Para finalizar el análisis cualitativo, los participantes indicaron la preferencia de uso que se muestra en la Tabla 4-7.

4.5. Resultados

Aunque no se encontraron valores de TP para este tipo de tareas y para estos dispositivos en la literatura, se puede ver que esta medida de rendimiento es mucho más baja para tareas en tres dimensiones, puesto que en cada mínima interacción, confluyen más variables. En la Figura 4-13 se muestra el TP o rendimiento para cada dispositivo en este experimento.

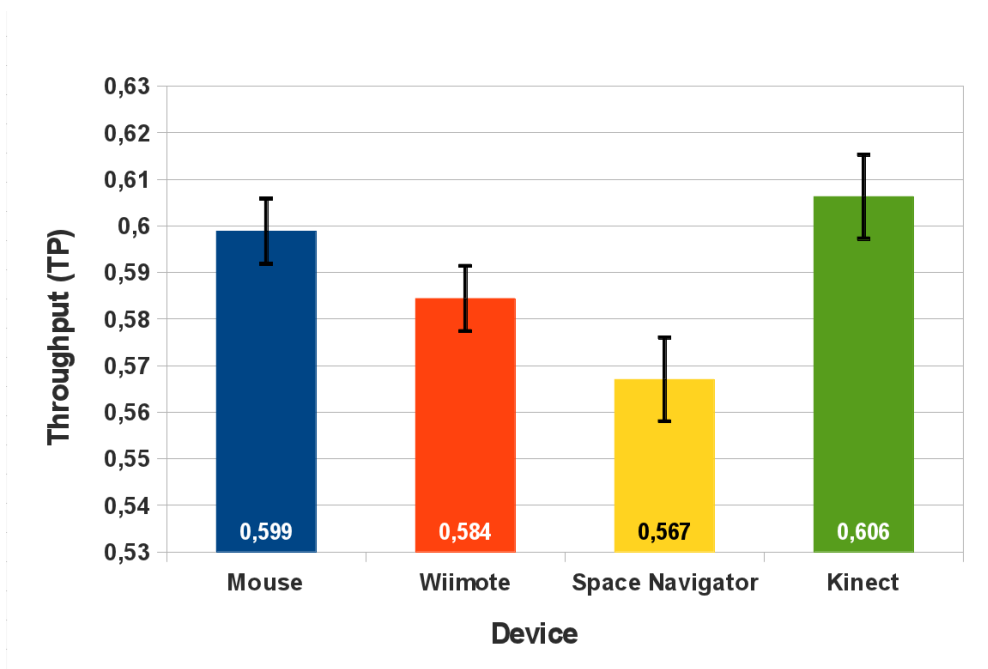


Figura 4-13.: Throughput total por dispositivo calculado con ID_e , índice de dificultad ajustado para el experimento 3D

El Kinect es el que se registró con un mayor TP de 0,606 bps, la razón puede ser que es un dispositivo que hace un mapeo de movimientos intuitivos en el mundo físico tridimensional y los lleva al experimento simulando las tres dimensiones. Luego está el ratón con un TP de 0,599 bps, aunque es un dispositivo que está limitado a dos dimensiones, ha estado presente en el desarrollo de la interacción con los computadores y los seres humanos ya nos hemos acostumbrado a estos dispositivos.

El Wiimote registró un TP de 0,584 bps, que es considerablemente bajo en relación a los otros dispositivos y al hecho de ser uno de los de mayor preferencia por los participantes.

Por último, el *Space Navigator* obtuvo un TP de 0,567 bps, que coincide con el último orden de preferencia dentro de los dispositivos.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

Se realizó la comparación de diferentes tipos de dispositivos, cada uno perteneciente a una clase particular de interacción, primero en una escena bidimensional donde se evaluaron “tareas de apuntar”, luego en un entorno tridimensional, donde se compararon con una tarea de seguir una ruta.

También se desarrollaron dos sistemas de evaluación basados en estándares, que permiten a cualquier persona obtener medidas de rendimiento para dispositivos en un ambiente bidimensional, para tareas simples, o en un ambiente tridimensional, para tareas complejas.

El primer experimento arrojó resultados que validaron su desarrollo, por un lado, y por el otro dos nuevas medidas que no se encontraron reportadas en la literatura, estas son, la del Kinect y la del Falcon de Novint. Estos resultados fueron favorables para el ratón, ya que para este tipo de tareas fue pensado en sus orígenes. Otros dispositivos como el Wiimote, parecen ser una buena alternativa para las tareas evaluadas.

En el experimento en tres dimensiones se mostró que dispositivos con mayores grados de libertad que el ratón, como el Kinect o el Wiimote, pueden ser una alternativa viable para tareas que requieran navegación. También se mostró que no necesariamente a mayor cantidad de grados de libertad, los resultados son superiores, pues el Space Navigator, el dispositivo evaluado con mayor cantidad de grados de libertad en ambos experimentos, no ofreció un rendimiento equivalente a ningún otro dispositivo.

Se realizó la comparación del uso de dispositivos, pero no solo el estudio de los aparatos en sí, sino también una acercamiento a cómo las personas perciben, muestran y manifiestan el uso de estos aparatos. Esta visión es importante ya que el acceso a las tecnologías puede facilitarse de acuerdo al conocimiento y la caracterización de los dispositivos más adecuados para tareas específicas.

5.2. Recomendaciones

Durante el desarrollo de los experimentos se identificaron varios aspectos que pueden ser perspectivas interesantes para nuevas exploraciones. Es el caso de la metáfora de visualización, en el experimento tridimensional se usó la metáfora de *primera persona*, sin embargo, genera preguntas interesantes cómo cambiaría los resultados usar una metáfora como *tercera persona*, usada comúnmente en los videojuegos.

También se invita al estudio detallado del mapeo de los dispositivos, ya que en el intercambio de información entre el mundo físico y el virtual existen numerosas alternativas para relacionar una acción de un mundo al otro. Tal es el caso del Wiimote donde puede enriquecerse la interacción mapeando las acciones de formas diferentes, por ejemplo combinaciones entre los acelerómetros, los infrarrojos, el *Nunchuk* y demás. El caso del Kinect es aún más rico en posibilidades, pues es posible detectar varias partes del cuerpo en diferentes gestos, creando una innumerable cantidad de combinaciones más o menos intuitivas, pero seguramente algunas de ellas serán ideales para algunas tareas específicas en áreas determinadas.

Por último, considerar que los computadores ya son parte integral de la vida de la gran mayoría de nosotros y la interacción que hay con estas máquinas no debe carecer de importancia, ya que puede ayudarnos a acceder al recurso más valioso de nuestra era, la información, o puede frustrarnos en el intento.

A. Anexo: Otros resultados

Durante la realización del presente trabajo de tesis se produjeron algunos resultados adicionales a este documento:

A.1. tester-device

Enlace: <https://github.com/maparrar/tester-device>

Software bajo licencia GNU versión 3.0 para la evaluación de dispositivos en tareas de apuntar. Desarrollado en C++, permite la evaluación de dispositivos como Kinect, Wiimote, Falcon Novint y un ratón estándar. Crea un escenario donde se desarrollan tareas que permiten medir el rendimiento usando la Ley de Fitts con índices de dificultad predefinidos. Se usó como librería gráfica QGLViewer (<http://www.libqglviewer.com/>) y herramientas de interfaz de QT.

A.2. devices3d

Enlace: <https://github.com/maparrar/devices3d>

Software bajo licencia GNU versión 3.0 para la evaluación de dispositivos en tres dimensiones. Desarrollado en Processing, permite la evaluación de dispositivos como Kinect, Wiimote, SpaceNavigator y un ratón estándar. Genera un ambiente tridimensional controlado donde se pueden definir caminos en el espacio con diferentes niveles de dificultad. Mide las variables necesarias para hallar el rendimiento de cada dispositivo evaluado. Se usaron librerías de software libre como Proscene (<http://code.google.com/p/proscene/>), Procontroll (<http://creativecomputing.cc/p5libs/procontroll/>) entre otras.

A.3. Conferencias

Comparison of unconventional input devices with pointing task in virtual environments: Artículo sobre la evaluación de dispositivos en tareas de apuntar (primer experimento) enviado a la conferencia HCI2012 a desarrollarse en septiembre de 2012 en Birmingham, UK.

Comparison of unconventional input devices for camera management in first person: Artículo sobre evaluación de dispositivos en una ambiente tridimensional para el manejo de la cámara en primera persona (segundo experimento) enviado a la conferencia NordiCHI 2012, octubre de 2012 en Conpenhague, Dinamarca.

Bibliografía

- [1] BAILLY, G. ; MÜLLER, J. ; ROHS, M. ; WIGDOR, D. ; KRATZ, S.: ShoeSense: A New Perspective on Hand Gestures and Wearable Applications. En: *Bilateral DFG-Symposium on Interaction with Smart Artifacts 2012* (2012)
- [2] BELFIORE, Phillip J. ; LIM, Levan ; BROWDER, Diane M.: Increasing the efficiency of instruction for a person with severe disabilities: The applicability of Fitts' law in predicting response time. En: *Journal of Behavioral Education* 3 (1993), September, Nr. 3, p. 247–258. – ISSN 1053–0819
- [3] CHUN, Kwonsoo ; VERPLANK, B. ; BARBAGLI, F. ; SALISBURY, K.: Evaluating haptics and 3D stereo displays using Fitts' law. En: *Haptic, Audio and Visual Environments and Their Applications, 2004. HAVE 2004. Proceedings. The 3rd IEEE International Workshop on*, 2004, p. 53–58
- [4] DANG, Nguyen T. ; TAVANTI, Monica ; RANKIN, Ivan ; COOPER, Matthew: A comparison of different input devices for a 3D environment. En: *International Journal of Industrial Ergonomics* 39 (2009), May, Nr. 3, p. 554–563. – ISSN 0169–8141
- [5] DONKER, Afke ; REITSMA, Pieter: Drag-and-drop errors in young children's use of the mouse. En: *Interacting with Computers* 19 (2007), March, Nr. 2, p. 257–266. – ISSN 0953–5438
- [6] DONKER, Afke ; REITSMA, Pieter: Young children's ability to use a computer mouse. En: *Computers & Education* 48 (2007), May, Nr. 4, p. 602–617. – ISSN 0360–1315
- [7] DREWES, Heiko: Only one Fitts' law formula please! En: *Proceedings of the 28th of the international conference extended abstracts on Human factors in computing systems - CHI EA '10*. Atlanta, Georgia, USA, 2010, p. 2813
- [8] FITTS, P M.: The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. En: *Journal of Experimental Psychology* 47 (1954), June, Nr. 6, p. 381–391. – PMID: 13174710. – ISSN 0022–1015

-
- [9] HATZFELD, Christian ; KERN, Thorsten A. ; WERTHSCHÜTZKY, Roland: Design and evaluation of a measuring system for human force perception parameters. En: *Sensors and Actuators A: Physical* 162 (2010), August, Nr. 2, p. 202–209. – ISSN 0924–4247
- [10] JAX, Steven A. ; ROSENBAUM, David A. ; VAUGHAN, Jonathan: Extending Fitts' Law to manual obstacle avoidance. En: *Experimental Brain Research* 180 (2007), June, Nr. 4, p. 775–779. – ISSN 0014–4819
- [11] KONTOGEORGAKOPOULOS, A. ; KOUROUPETROGLOU, G.: Simple Cases of Low Cost Force-Feedback Interaction with Haptic Digital Audio Effects. En: *9th International Gesture Workshop* (2011)
- [12] KORITNIK, T. ; KOENIG, A. ; BAJD, T. ; RIENER, R. ; MUNIH, M.: Comparison of visual and haptic feedback during training of lower extremities. En: *Gait & Posture* 32 (2010), October, Nr. 4, p. 540–546. – ISSN 0966–6362
- [13] MACKENZIE, I S.: A note on the information-theoretic basis of Fitts' law. En: *Journal of Motor Behavior* 21 (1989), September, Nr. 3, p. 323–330. – PMID: 15136269. – ISSN 0022–2895
- [14] MACKENZIE, I. S.: Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction. En: *Hum.-Comput. Interact.* 7 (1992), March, Nr. 1, p. 91–139. – ISSN 0737–0024
- [15] NATAPOV, Daniel ; CASTELLUCCI, Steven ; MACKENZIE, Scott: ISO 9241-9 evaluation of video game controllers. En: *GI '09: Proceedings of Graphics Interface 2009*. Kelowna, British Columbia, Canada : Canadian Information Processing Society, 2009. – ISBN 978–1–56881–470–4, p. 223–230
- [16] PARK, Jungchul ; HAN, Sung H. ; YANG, Huichul: Evaluation of cursor capturing functions in a target positioning task. En: *International Journal of Industrial Ergonomics* 36 (2006), August, Nr. 8, p. 721–730. – ISSN 0169–8141
- [17] PHILLIPS, C. A. ; REPPERGER, D. W.: Why engineers should know and use Fitts' law. En: *Proceedings of the 19th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 1997* Vol. 4, IEEE, November 1997. – ISBN 0–7803–4262–3, p. 1686–1689 vol.4
- [18] SOUKOREFF, R. W. ; MACKENZIE, I. S.: Towards a standard for pointing device evaluation, perspectives on 27 years of Fitts' law research in HCI. En: *International Journal of Human-Computer Studies* 61 (2004), December, Nr. 6, p. 751–789. – ISSN 1071–5819

-
- [19] TEATHER, R.J. ; NATAPOV, D. ; JENKIN, M.: Evaluating haptic feedback in virtual environments using ISO 9241-9. En: *Virtual Reality Conference (VR), 2010 IEEE*, 2010. – ISBN 1087-8270, p. 307-308
- [20] TEATHER, R.J. ; PAVLOVYCH, A. ; STUERZLINGER, W.: Effects of Latency and Spatial Jitter on 2D and 3D Pointing. En: *Virtual Reality Conference, 2009. VR 2009. IEEE*, 2009. – ISBN 1087-8270, p. 229-230
- [21] VAUGHAN, Jonathan ; BARANY, Deborah A. ; SALI, Anthony W. ; JAX, Steven A. ; ROSENBAUM, David A.: Extending Fitts' Law to three-dimensional obstacle-avoidance movements: support for the posture-based motion planning model. En: *Experimental Brain Research* (2010), October. – ISSN 0014-4819
- [22] WOLLACOTT, Andrew M. ; MERZ JR., Kenneth M.: Haptic applications for molecular structure manipulation. En: *Journal of Molecular Graphics and Modelling* 25 (2007), March, Nr. 6, p. 801-805. – ISSN 1093-3263
- [23] ZHANG, Xuan ; MACKENZIE, I. S. *Evaluating Eye Tracking with ISO 9241- Part 9*. February 2008