

# Entornos parcialmente no euclidianos en realidad virtual\*

Jesús Mayor<sup>[0000-0002-0682-070X]</sup>, Raúl Lara-Cabrera<sup>[0000-0002-7959-1936]</sup>,  
Daniel López-Fernández<sup>[0000-0003-1265-010X]</sup>, and Fernando  
Ortega<sup>[0000-0003-4765-1479]</sup>

Dpto. Sistemas Informáticos, ETSI Sistemas Informáticos, Universidad Politécnica de  
Madrid, Madrid, Spain  
[jesus.mayor@upm.es](mailto:jesus.mayor@upm.es)

**Abstract** Currently, virtual reality environments are limited by work space. Therefore, it is necessary to find solutions for virtual experiences to take advantage of the available workspace. This paper proposes a method to take advantage of the workspace through the generation of geometrically overlapped spaces by using portals that are imperceptible to the user. Thanks to these portals it is possible to create a momentary break in the conventional Euclidean geometry, allowing to show different scenarios within a single physical space. Although this kind of effect has been seen in conventional games, its application in virtual environments has several technical implications. These implications are detailed and defined in this article. Likewise, the perceptual implications that this effect could have on users are discussed, opening the possibility of new studies associated with this visual effect.

**Resumen** Actualmente los entornos de Realidad Virtual están limitados al espacio de trabajo del que disponen los usuarios, siendo necesario buscar nuevas formas de aprovechar al máximo este espacio disponible en los diseños de experiencias virtuales. En el presente artículo se plantea un método de generación de espacios geoméricamente superpuestos mediante el uso de unos portales imperceptibles para el usuario. Gracias a estos portales es posible crear una ruptura momentánea en la geometría euclidiana convencional, logrando así la generación de infinitos mundos virtuales dentro de un único espacio de trabajo físico. Pese a que esta clase de efectos se ha podido observar en videojuegos tradicionales, su aplicación en entornos virtuales tiene varias implicaciones técnicas, las cuales son detalladas y definidas en el presente artículo. Así mismo, en este artículo se discuten las implicaciones perceptuales que este efecto visual podría tener en los usuarios, abriendo la posibilidad a nuevos estudios asociados a este efecto de computación gráfica.

**Keywords:** Realidad Virtual · Gráficos por ordenador · Interacción hombre-máquina.

---

\* Universidad Politécnica de Madrid

## 1. Introducción

Actualmente, la tecnología de la Realidad Virtual (RV) es accesible para la gran mayoría de consumidores, siendo de vital importancia conseguir una correcta efectividad de los entornos virtuales mostrados. Un factor común en la mayoría de experiencias virtuales es la facultad de desplazar al usuario a través del entorno virtual. Para lograr este desplazamiento, existen los llamados métodos de locomoción, los cuales definen una serie de pautas a seguir para lograr el desplazamiento del usuario de la manera más realista posible.

Sin embargo, este realismo generalmente se ve limitado por el hardware utilizado o las condiciones del entorno físico donde se encuentra el usuario. Un ejemplo de estas limitaciones es el método *Room-Scale*, que parece mostrarse como el más adecuado para la experiencia de usuario [13]. Este método se basa en la denominada locomoción natural [10], la cual se encarga de hacer una correspondencia exacta entre el movimiento físico del usuario y el movimiento virtual. Sin embargo, la principal desventaja de este método es que se ve limitado al espacio físico del que disponga el usuario que, en muchos casos, se reduce a unos pocos metros cuadrados.

Con el fin de suplir esta carencia del método *Room-Scale* y su locomoción natural, se hace imprescindible la búsqueda de nuevas soluciones que permitan aprovechar el espacio de trabajo de una manera más adecuada. Tanto es así que existen soluciones que tratan de aprovechar mejor el espacio de trabajo a partir de la aplicación de modificaciones sutiles al movimiento virtual mostrado respecto al movimiento físico realizado por el usuario [11].

En el presente artículo, se propone una nueva y peculiar manera de dar solución al aprovechamiento del espacio de trabajo. Esta solución se basa en la creación de entornos virtuales que, parcialmente, no siguen una representación de la geometría euclídea convencional [2].

La geometría euclídea es aquella que sigue los postulados definidos por Euclides [8]:

1. Se podrá dibujar un segmento de recta entre dos puntos cualesquiera.
2. Un segmento de recta se puede extender indefinidamente en una línea recta.
3. Se puede trazar una circunferencia dados un centro y una distancia desde ese centro.
4. Todos los ángulos rectos son iguales entre sí.
5. Si una recta corta a otras dos formando dos ángulos internos agudos por un mismo lado, esas dos rectas prolongadas indefinidamente se cortarán del lado en el que están dichos ángulos.

Por el contrario, definir una geometría que siga unos postulados diferentes a los anteriores, implica que la geometría es no-euclidiana. En el presente artículo se plantea la posibilidad de vulnerar parcial o momentáneamente estos principios geométricos, pudiendo representar espacios virtuales más amplios superponiendo la geometría dentro de un mismo espacio de trabajo disponible.

Para lograr este efecto visual en el entorno virtual, se ha propuesto e implementado la utilización de portales imperceptibles para el usuario que permiten

vulnerar la geometría euclídea momentáneamente. En las siguientes secciones, se muestran posibles soluciones a este problema, así como las problemáticas que las soluciones comunes suelen producir en RV. Finalmente se muestra una solución matemática que logra este efecto visual de la manera más realista posible y se concluye discutiendo los resultados del efecto visual logrado.

## 2. Estado del arte

Generalmente, la geometría no euclidiana es referida a geometrías que sustituyen postulados enteros de la geometría euclidiana, dando lugar a otros tipos de geometrías (como la elíptica o la hiperbólica [2]). De esta manera, se pueden encontrar autores que han focalizado sus estudios en reproducir este tipo de geometrías a través de la tecnología de la RV [7].

Consecuentemente, a través de modelos matemáticos se consiguen desarrollar entornos virtuales que escapan de la percepción espacial convencional. Sin embargo, debido a estos cálculos especiales, las imágenes mostradas deben ser programadas de manera independiente a los motores gráficos convencionales, siendo difícil su uso en aplicaciones dirigidas a los consumidores del sector del entretenimiento virtual.

Como se ha comentado anteriormente, se puede conseguir reutilizar el espacio de trabajo si se vulnera momentáneamente la geometría euclidiana a través del uso de portales. Esta solución fue planteada por Erhardt [5] de manera teórica en el año 2013, donde se indicaba la idoneidad del uso de portales que conectasen diferentes partes del entorno virtual rompiendo con la geometría euclidiana en ciertos puntos. En su artículo, Erhardt hace referencia al videojuego *Portal*<sup>1</sup> de la empresa *Valve*, el cual plantea esta posibilidad como un recurso o mecánica activa del jugador para poder desplazarse por un entorno sin RV e ir resolviendo diferentes rompecabezas. Así mismo, Erhardt planteó varias incógnitas de interés científico en relación a cómo un usuario percibiría el espacio si este tipo de efectos llegase a suceder en entornos con tecnologías inmersivas.

Por otro lado, se pueden encontrar algunos estudios que tratan de resolver diversas incógnitas sobre la percepción del usuario sin llegar a utilizar la tecnología de la RV. Un ejemplo de esto es el estudio realizado por Ericson y Warren [6], donde propusieron la utilización de laberintos para evaluar cómo la utilización de los llamados agujeros de gusano afectaban a los usuarios. Ellos concluyeron que los usuarios utilizarían atajos a través de sus agujeros de gusano, produciéndoles una distorsión en el aprendizaje espacial del laberinto. De manera similar, Warren et al. [15] realizaron estudios empleando laberintos sin utilizar la tecnología de la RV, revelando un detallado conocimiento espacial erróneo, así como que los usuarios no se dieron cuenta en ningún momento de su error perceptual.

Actualmente existe la posibilidad de realizar estos experimentos a través de la tecnología de la RV, pudiéndose estudiar factores como la presencia, la percepción espacial o la generación de una topología cognitiva. Sin embargo, realizar

<sup>1</sup> <https://store.steampowered.com/app/400/Portal/>

este efecto en tecnologías inmersivas conlleva una serie de dificultades técnicas y conceptuales que deben ser resueltas respecto a las soluciones presentadas sin este tipo de tecnologías.

### 3. Generación de portales en realidad virtual

La idea principal que trasciende al efecto de los portales utilizada en entornos tridimensionales convencionales es la de capturar imágenes auxiliares previas al *renderizado* principal. Estas imágenes auxiliares son capturadas tomando como referencia el portal de destino, obteniendo las imágenes como si el *renderizado* principal se estuviera realizando desde allí. En la Figura 1 se muestra cómo el resultado de las imágenes auxiliares debe ser posteriormente recortado y superpuesto al *renderizado* principal del entorno virtual.

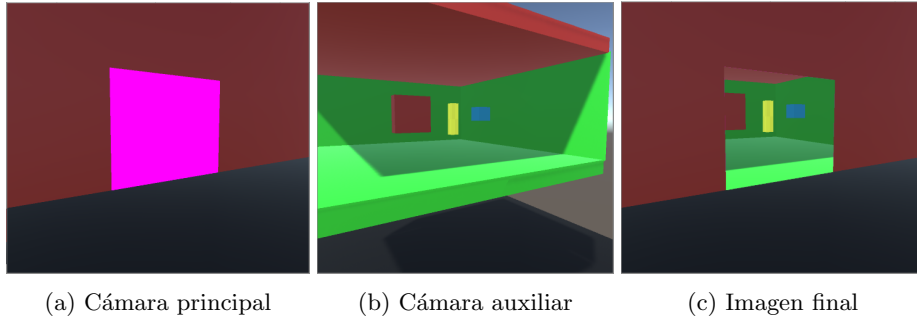


Figura 1: Proceso generalmente seguido para la generación del efecto de un portal en un entorno virtual tradicional (sin utilizar RV).

Mientras que la idea del efecto del portal podría resultar sencilla, los cálculos asociados a este efecto pueden resultar más complicados. Por un lado, una cámara auxiliar debe posicionarse y orientarse en el lugar adecuado respecto al portal de salida. Por otro lado, la imagen generada por la cámara auxiliar (ver Figura 1b) debe ser ajustada al objeto pintado como rosa en la Figura 1a. Para ello, se le debe indicar a la unidad de procesamiento gráfico del ordenador que aplique la imagen generada por la cámara auxiliar utilizando las coordenadas en pantalla (dando como resultado la Figura 1c). Esto se logra a través de los llamados *shaders*, que se encargan de dar las instrucciones de pintado de cada objeto proyectado por la cámara en la pantalla de nuestro ordenador [9].

Sin embargo, pese a que la idea principal de la generación de estos portales es la indicada anteriormente, existen varias diferencias asociadas a la hora de aplicarla en RV. A continuación, se muestran los puntos que deben ser tenidos en cuenta en el cálculo de estos nuevos portales.

### 3.1. Grados de libertad

Se entiende como grados de libertad (DOF) a la disposición que se le da al usuario para desplazarse en un número determinado de dimensiones [1]. Este desplazamiento puede ser posicional, proporcionando 3DOF en los ejes lateral ( $X$ ), superior ( $Y$ ) y frontal ( $Z$ ), o rotacional, proporcionando 3DOF las rotaciones asociadas a cada uno de los tres ejes anteriores. De esta manera, si un usuario puede posicionarse y rotar en todas direcciones, este dispondría de 6DOF.

Sin embargo, es común en un gran número de videojuegos que la cámara del usuario no pueda utilizar la rotación sobre el eje frontal ( $Z$ ), proporcionándole únicamente 2DOF rotacionales y manteniendo el eje superior inmovil ( $Y$ ). De esta manera, el cálculo del efecto de los portales puede verse notablemente simplificado.

- Si el portal de entrada y salida tienen una disposición vertical, ya que siguen la misma orientación que la cámara principal en su eje superior ( $Y$ ), la rotación de la cámara auxiliar se traduce en una rotación en un ángulo determinado, el cual se realiza sobre este eje (ver Figura 2a).
- Si únicamente el portal de entrada fuera vertical (siguiendo la misma orientación que la cámara principal), se podría seguir el mismo proceso que el anterior, confiando en que la inclinación resultante en la cámara auxiliar será la misma que la del portal de salida en su eje superior (ver Figura 2b).

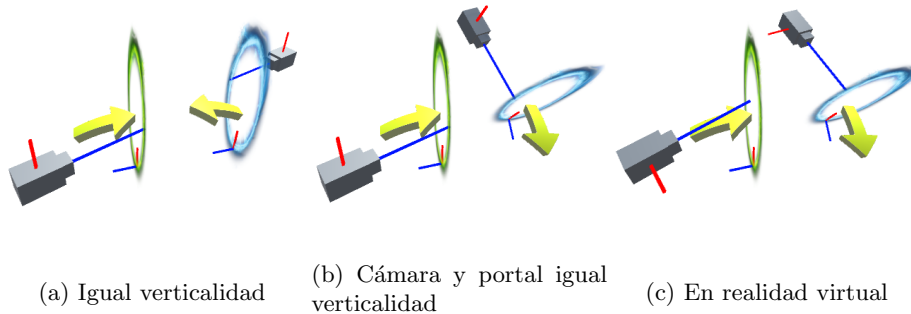


Figura 2: Diferentes soluciones dependiendo de los grados de libertad del usuario y los portales.

Sin embargo, en RV se plantea el escenario más complejo de todos, en el cual el usuario puede inclinar la cabeza de cualquier manera en 3DOF y la cámara auxiliar utilizada para generar el efecto debe corresponder esa rotación independientemente de la disposición del portal de entrada y respecto a cualquier

disposición del portal de salida. En la Figura 2c se puede apreciar esta disposición de los elementos intervinientes en el caso de la RV.

De esta manera, para lograr un correcto efecto visual de los portales en RV es necesario aplicar una serie de transformaciones tridimensionales. Para ello, es necesario conocer cómo funcionan las cámaras encargadas de proyectar el espacio tridimensional en la pantalla de nuestro computador.

Cada elemento representado en el espacio tridimensional tiene asociado una matriz de transformación que lo ubica dentro de él [14]. Esta matriz de transformación de orden 4 contiene los componentes que definen este elemento dentro del espacio de manera combinada: la posición, la rotación y la escala. De esta manera, atendiendo a cada uno de estos componentes se puede generar la matriz de transformación a partir de la combinación de cada componente expresado en forma matricial. Esta combinación es realizada a través de multiplicaciones sucesivas de cada característica de forma independiente. En el presente artículo se tratarán estas tres componentes de la matriz de transformación de manera independiente y, en su forma más básica, de la siguiente manera:

- Matriz de transformación de la **cámara principal**:  $C_T$ . Entendiendo la matriz de transformación de esta cámara en el espacio, se definirá  $C_P \in \mathbb{R}^3$  como su posición en el espacio tridimensional,  $C_R$  como su rotación expresada en forma matricial de orden 3 y  $C_S \in \mathbb{R}^3$  como su escala.
- Matriz de transformación de la **cámara auxiliar**:  $A_T$ . Se definirá para hacer referencia a los componentes de su matriz de transformación en el espacio  $A_P$ ,  $A_R$  y  $A_S$ .
- Matriz de transformación del **portal de entrada**:  $I_T$ . No se hará referencia a sus componentes independientes.
- Matriz de transformación del **portal de salida**:  $O_T$ . No se hará referencia a sus componentes independientes.

De esta manera, debido a que la matriz de transformación de un elemento es aquella que lleva a ese elemento a su posición real en el mundo (entendiendo que cada elemento inicialmente partiría del origen), una multiplicación de un punto arbitrario será transformado de igual modo. Consecuentemente, la inversa de la matriz de transformación llevará un punto cualquiera del espacio a su posición relativa a cómo estaría respecto a dicho objeto si este estuviera en el origen del mundo.

Atendiendo a esto, una expresión como  $I_T^{-1}C_P$  indicaría la posición de ( $C_P$ ) respecto a la posición, rotación y escala del portal de entrada ( $I_T$ ). Expresado de otra manera, esto indicaría la posición de  $C_P$  en coordenadas locales respecto de  $I_T$ . Así mismo, la expresión  $I_T(I_T^{-1}C_P)$  devolvería a  $C_P$  a sus coordenadas respecto al mundo o globales.

**Posición de la cámara auxiliar** Como se ha indicado anteriormente, los grados de libertad que tiene el usuario en RV pueden dificultar la realización del efecto de los portales. Atendiendo únicamente a la posición del dispositivo y su

cámara principal asociada ( $C_P$ ) se puede lograr un correcto posicionamiento de la cámara auxiliar ( $A_P$ ) en cualquier disposición de los portales ( $I_T$  y  $O_T$ ).

Atendiendo a la ecuación de reflexión de un vector expresada como  $\vec{r}(\vec{v}, \hat{n}) = \vec{v} - 2(\vec{v} \cdot \hat{n})\hat{n}$ , la cual transforma el vector  $\vec{v} \in \mathbb{R}^3$  en el vector reflejado  $\vec{r} \in \mathbb{R}^3$  respecto al plano definido por su normal unitaria  $\hat{n} \in \mathbb{R}^3$ , la ecuación de posicionamiento de la cámara auxiliar se define de la siguiente forma.

$$A_P = O_T(-\vec{r}((I_T^{-1}C_P), \hat{u}_p)) \quad (1)$$

Entendiendo  $\hat{u}_p$  como el vector director unitario completamente vertical ( $\langle 0, 1, 0 \rangle$  si el sistema de referencia utiliza el eje  $Y$  como el vertical), la Figura 3a representa el proceso que la posición de la cámara principal debe realizar hasta alcanzar la posición de la cámara auxiliar deseada en cualquier en el espacio tridimensional.

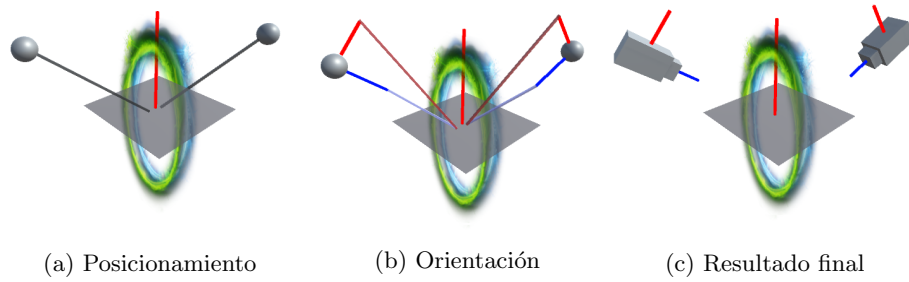


Figura 3: Proceso para calcular una correcta disposición de la cámara auxiliar en los portales.

Lo interesante del método aplicado es que es capaz de respetar una diferencia de escalas entre ambos portales ( $I_T$  y  $O_T$ ). Por ello, es posible generar portales que disminuyan la escala del usuario al pasar por ellos, ya que la perspectiva generada por la cámara auxiliar preserva estas diferencias escalares.

**Rotación de la cámara auxiliar** Una solución para rotar la cámara independientemente de las disposiciones de los portales ( $I_T$  y  $O_T$ ) es análoga a la dada para el posicionamiento de la cámara auxiliar. Es posible expresar una rotación a través de la utilización de una matriz de cambio de base. Este tipo de operaciones referente a la cámara suele ser denominado como matriz *LookAt*. Esta matriz aprovecha que se parte de una base canónica para aplicar un cambio de base a la cámara, consiguiendo así su respectiva rotación. La nueva base será ortonormal siguiendo un vector al que la cámara debe apuntar ( $\vec{f} \in \mathbb{R}^3$ ) y un vector superior que define la orientación  $\vec{u} \in \mathbb{R}^3$ .

Para asegurar la ortonormalidad de la nueva base, se puede seguir el siguiente proceso para calcular la matriz  $LookAt(\vec{f}, \vec{u})$ :

1. Se normaliza el vector  $\vec{f}$  obteniendo el vector frontal resultante  $\vec{f}' = \frac{\vec{f}}{\|\vec{f}\|}$ .
2. Se calcula el eje que falta de la base ( $\vec{l} \in \mathbb{R}^3$ ) calculando el producto vectorial de estos dos ejes  $\vec{l} = \vec{f}' \times \vec{u}$ . Posteriormente se normaliza obteniendo  $\vec{l}$ .
3. Se vuelve a calcular un nuevo vector superior a partir del producto vectorial  $\vec{u}' = \vec{f}' \times \vec{l}$ .

Como se puede observar este proceso atiende a que los vectores  $\vec{f}$  y  $\vec{u}$  dados podrían no ser inicialmente ortonormales, dando una prioridad a  $\vec{f}$  respecto de  $\vec{u}$ . Adicionalmente, la función  $LookAt(\vec{f}, \vec{u})$  forma una matriz con  $\vec{l}$ ,  $\vec{u}'$  y  $\vec{f}'$  que es invertida, ya que se parte de una base canónica y se utilizará para obtener puntos rotados por esta nueva base.

De esta manera, gracias a esta nueva matriz de rotación, es posible obtener de manera análoga al cálculo de la posición una rotación independiente de la disposición de los portales ( $I_T$  y  $O_T$ ). Esto se consigue obteniendo las transformaciones relativas de los puntos frontales ( $C_P + C_T(\hat{front})$ ), entendiendo  $\hat{front}$  como el vector frontal unitario  $\langle 0, 0, 1 \rangle$  y superiores ( $C_P + C_T(\hat{up})$ ) de la cámara principal del siguiente modo.

$$\vec{f} = O_T(-\vec{r}((I_T^{-1}C_P + C_T(\hat{front})), \hat{up})) \quad (2)$$

$$\vec{u} = O_T(-\vec{r}((I_T^{-1}C_P + C_T(\hat{up})), \hat{up})) \quad (3)$$

$$A_R = LookAt(\vec{f} - A_P, \vec{u} - A_P) \quad (4)$$

En la Figura 3b y 3c se pueden observar estas operaciones, donde primero se obtienen las orientaciones de cada uno de los vectores directores de la cámara auxiliar para su posterior posicionamiento.

**Plano cercano de corte de la proyección** Otro factor interviniente en el cálculo de la imagen generada por ordenador a partir de una cámara es la matriz de proyección [12]. Dicha matriz es de orden 4 y se encarga de generar una imagen bidimensional que, generalmente, es proyectada en la pantalla de la computadora. En el caso del efecto de los portales, es interesante modificar esta matriz de proyección de la cámara auxiliar para que genere la imagen a partir del plano en el que se encuentra el portal. De esta manera, es posible evitar el *renderizado* de los obstáculos que estuvieran posicionados en la parte posterior al portal de salida por parte de las cámaras auxiliares (ver Figura 4).

Según indicó Lengyel [12], se puede conseguir este efecto aplicando algunas modificaciones a la matriz de proyección. Consecuentemente, se hará referencia a la matriz de proyección de la cámara auxiliar encargada de la generación de la imagen en perspectiva desde el portal de salida como  $M$ . Siendo  $\vec{n} \in \mathbb{R}^3$  el vector normal del plano en coordenadas locales a la cámara auxiliar y  $\vec{q} \in \mathbb{R}^3$  un punto perteneciente a ese plano en coordenadas locales a la cámara auxiliar, se puede



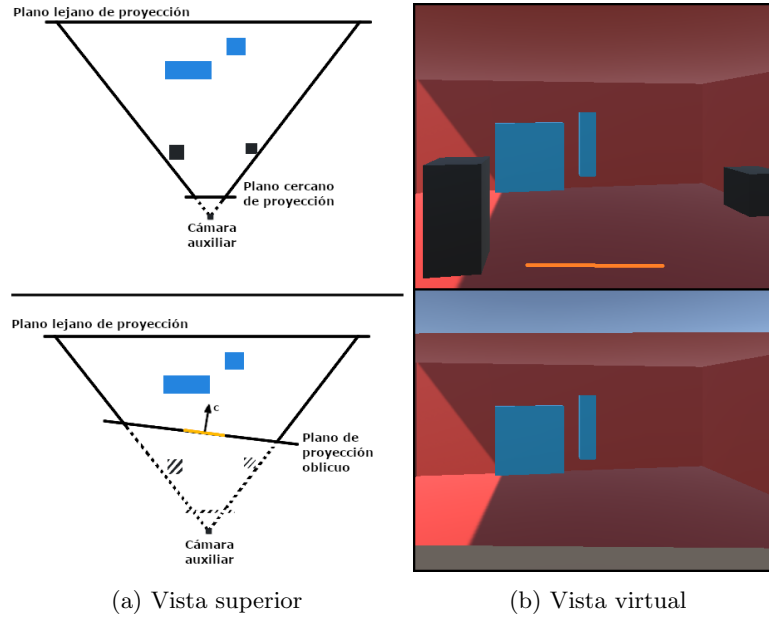


Figura 4: Repercusión de la matriz de proyección oblicua en el mundo virtual.

representar el plano en un vector tridimensional de forma  $c = \langle \vec{n}_x, \vec{n}_y, \vec{n}_z, -\vec{n} \cdot \vec{q} \rangle$ . También se puede definir el plano resultante proyectante de  $c$  aplicando  $ct = (M^{-1})^T c$ . A continuación, se muestra el método definido por Lengyel [12] que convierte el plano cercano de la proyección, donde comúnmente se proyecta la imagen de las cámaras, en el plano  $c$  definido en nuestro caso por la orientación del portal de salida  $O_T$ .

$$q = M^{-1} \begin{bmatrix} \text{sgn}(ct_x) \\ \text{sgn}(ct_y) \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$Mt = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \frac{2M_4 \cdot q}{c \cdot q} c - M_4 \\ M_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Se debe aclarar que los sub-índices indicados en la Ecuación 6 representan las respectivas filas de la matriz original  $M$  en forma vectorial. Tras aplicar esta modificación sobre la matriz de proyección de la cámara auxiliar se logra el efecto indicado en la Figura 4, logrando el consecuente comportamiento deseado en ambos portales.

### 3.2. Estereoscopia y distancia interpupilar

Cabe destacar que en RV, asociado al libre desplazamiento del usuario por el entorno, se dispone de dos representaciones en perspectiva del entorno virtual mostrado. A través de estas dos perspectivas, se le muestra al usuario el mundo virtual representado de una manera independiente para cada ojo. El efecto producido por estas dos imágenes es denominado estereoscopia y supone repetir dos veces el proceso de *renderizado*.

Como consecuencia de la estereoscopia, es necesario tomar dos imágenes diferentes a partir de la cámara auxiliar que hagan que la visión a través del portal se muestre con la perspectiva adecuada para cada ojo. Es decir, al igual que el *renderizado* principal debe realizarse dos veces, cada portal que se muestre en pantalla debe calcularse el mismo número de veces de manera independiente.

Cada imagen generada para producir esta estereoscopia tiene una separación que se debe corresponder con la separación de nuestros ojos, también llamada distancia interpupilar. Esta distancia interpupilar tiene una separación de media de 6,3 cm [4], aunque es común que los dispositivos de RV permitan su ajuste dependiendo del usuario que las utilice. En consecuencia, la representación gráfica calculada debe atender a esta configuración.

Cabe destacar que, en cierto punto, el usuario debe ser teletransportado al otro lado del portal cuando su cabeza se introduzca en él. Sin embargo, a causa de esta estereoscopia, podría darse el caso de que solo uno de los dos ojos hubiera atravesado dicho portal. Esto tiene varias implicaciones técnicas en el desarrollo de este efecto para realidad virtual:

- Se debe tener un control activo del posicionamiento de las cámaras principales, interviniendo la relación automática entre el movimiento del dispositivo virtual y su posicionamiento en escena. Esto se debe a que cada ojo puede estar desplazado espacialmente cuando el usuario se encuentra en el punto intermedio en el que cada ojo está en un lado diferente del portal.
- Debido al plano cercano de proyección de las cámaras que se ha mencionado anteriormente, es necesario teletransportar los ojos un poco antes de llegar dicho portal, ya que la imagen es generada con una pequeña distancia al punto donde está (la distancia del plano cercano de proyección). Consecuentemente, al teletransportar cada ojo se ocasiona un ligero incremento en la distancia interpupilar. Por ello, se aconseja reducir la distancia del plano cercano de la proyección de la cámara principal lo máximo posible y definir este margen en ambos lados del portal ( $I_T$  y  $O_T$ ) como este margen de teletransporte.

Mediante la sencilla solución de estas dificultades encontradas, es posible lograr que el efecto sea bastante perfecto e imperceptible para el usuario, pudiéndose formar de esta manera entornos parcialmente no euclidianos.

### 3.3. Una percepción correcta para el usuario

Pese a que el efecto generado es correcto, es necesario tener en cuenta algunas consideraciones para una correcta percepción del usuario. Como se ha comentado

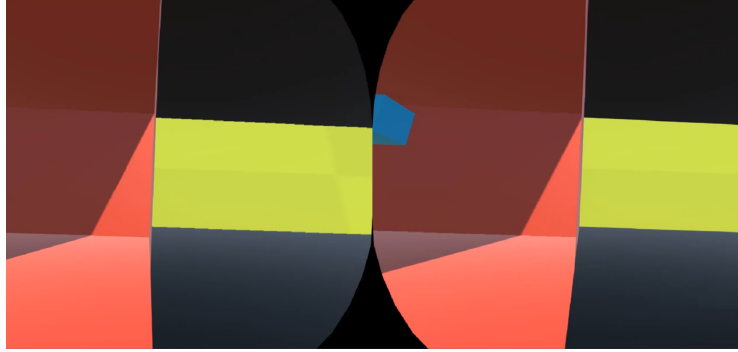


Figura 5: Imagen donde se ve un ojo a cada lado del portal, logrando una estereoscopia perfecta.

antes, los métodos de locomoción requieren de ciertas pautas para lograr una mejor experiencia de usuario.

Consecuentemente, al atravesar el portal con una orientación diferente, es necesario que el usuario sienta que tiene el suelo a sus pies y que la fuerza de la gravedad que percibe del entorno virtual se corresponda con la percibida por su sistema vestibular [3], evitando así el *cybersickness*. De esta manera, es de vital importancia que, al atravesar por completo el usuario el portal (con sus dos ojos), su gravedad cambie acorde a la posición del portal de salida. Esto puede conseguirse fácilmente si se controlan de manera activa las físicas del jugador, igualando la fuerza de la gravedad  $g \in \mathbb{R}^3$  al vector inferior de salida del portal de la siguiente forma:

$$g = O_T(-\hat{u}p) \quad (7)$$

Pese a que la intuición nos lleve a pensar que el cambio de la gravedad puede afectar a la no detección de dichos portales, sucede justo al contrario. Gracias a este cambio en la dirección de la gravedad se consigue que el usuario perciba que sigue caminando sobre el mismo suelo, aunque virtualmente no sea de este modo.

#### 4. Resultados

La solución presentada para lograr el efecto de los portales ha sido desarrollada en Unity 2019-3.0f5 y probada con el dispositivo de RV Oculus Rift S. Las indicaciones presentadas consiguen alcanzar un realismo exacto en la generación de portales en entornos virtuales. En la Figura 5 se puede observar como se alcanza una correcta estereoscopia teniendo un ojo a cada lado del portal.

Para la futura evaluación con usuarios del efecto visual mostrado, se han elaborado cuatro entornos experimentales diferentes, los cuales presentan de manera preliminar una correcta validación del efecto deseado. Los planteamientos de estos entornos, son los siguientes:

- Unión básica de dos habitaciones mediante un portal.
- Caminar por el techo de la misma habitación tras pasar un portal.
- Unión de más de cuatro habitaciones con forma de L.
- Escaleras, que al entrar en ellas, nunca puedes volver a la sala inicial.

Tras el análisis de estos entornos, se puede observar que las transiciones de los portales son suaves e imperceptibles, sobre todo cuando el usuario se desplaza de manera frontal hacia ellos, ya que traspasa los portales con ambos ojos de manera simultánea. La aplicación del cambio de gravedad logra una correcta orientación del usuario, haciéndole percibir que la gravedad va siempre en sentido inferior y evitando los posibles mareos que otras orientaciones pudieran producir.

## 5. Discusión y conclusiones

El presente artículo ha presentado una solución algorítmica a la generación de portales no perceptibles para el usuario en entornos de RV. Esta solución ha sido elaborada de manera matemática, haciendo uso de los conceptos existentes de la computación gráfica y, en concreto, de la geometría proyectiva. Así mismo, la solución planteada ha sido desarrollada y probada con dispositivos de RV para comprobar su correcto funcionamiento.

Gracias a la definición formal y algorítmica de los portales, se puede conseguir el efecto deseado, el cual puede servir para aprovechar de manera más eficiente el espacio de trabajo físico del que dispone el usuario. Queda en manos de los diseñadores de experiencias virtuales el organizar sus escenas de tal forma que se pueda aplicar este efecto al doblar una esquina o entrar por una puerta del entorno virtual, aprovechando así este espacio y mostrando mundos mucho más amplios dentro de las limitaciones físicas de espacio en el que se encuentre el usuario.

Así mismo, la generación de estos mundos virtuales que rompen momentáneamente la lógica espacial o la geometría euclidiana abren varias líneas de investigación, ya que se desconoce que efectos puede tener en la mente del usuario percibir espacios físicamente imposibles. De esta manera, se propone como línea futura el análisis en factores como la presencia, analizando si estos portales pondrían romperla o si, por el contrario, muestran una manera válida y suficientemente realista de aprovechar el espacio de trabajo. Por otro lado, se podrían analizar las implicaciones que este tipo de espacios tendrían sobre la orientación del usuario, pudiendo afectar a su memoria espacial.

En caso de obtener resultados positivos en este tipo de futuras investigaciones, se podría validar este efecto para ser utilizado de forma habitual en videojuegos de RV.

## Agradecimientos

Se agradece a David Calderón su inestimable colaboración en el desarrollo del software asociado al presente artículo.

## Referencias

1. Chow, Y.W.: Low-cost multiple degrees-of-freedom optical tracking for 3d interaction in head-mounted display virtual reality. *International Journal of Recent Trends in Engineering* **1**(1), 52 (2009)
2. Coxeter, H.S.M.: *Non-euclidean geometry*. Cambridge University Press (1998)
3. Davis, S., Nesbitt, K., Nalivaiko, E.: A systematic review of cybersickness. In: *Proceedings of the 2014 Conference on Interactive Entertainment*. p. 1–9. IE2014, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA (2014)
4. Dodgson, N.A.: Variation and extrema of human interpupillary distance. In: Bolas, M.T., Woods, A.J., Merritt, J.O., Benton, S.A. (eds.) *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI*. vol. 5291, pp. 36 – 46. International Society for Optics and Photonics, SPIE (2004)
5. Erhardt, J.: Reality and structure of virtual space: Some lessons from portal. In: *Paper Presented* (2013)
6. Ericson, JD and Warren, WH.: the influence of cast shadows on learning a non-Euclidean virtual hedge maze environment. <https://f1000research.com/posters/1090336> (2012)
7. Hart, V., Hawksley, A., Matsumoto, E.A., Segerman, H.: Non-euclidean virtual reality i: explorations of  $h^3$ . In: *Bridges 2017 Conference Proceedings* (2017)
8. Heath, T.L., et al.: *The thirteen books of Euclid's Elements*. Courier Corporation (1956)
9. Jimenez, J., Sundstedt, V., Gutierrez, D.: Screen-space perceptual rendering of human skin. *ACM Trans. Appl. Percept.* **6**(4) (Oct 2009)
10. Langbehn, E., Lubos, P., Steinicke, F.: Evaluation of locomotion techniques for room-scale vr: Joystick, teleportation, and redirected walking. In: *Proceedings of the Virtual Reality International Conference-Laval Virtual*. pp. 1–9 (2018)
11. Langbehn, E., Steinicke, F.: *Redirected Walking in Virtual Reality*, pp. 1 – 11. Springer Encyclopedia of Computer Graphics and Games (2018)
12. Lengyel, E.: Oblique view frustum depth projection and clipping. *Journal of Game Development* **1**(2), 5–16 (2005)
13. Mayor, J., Raya, L., Sanchez, A.: A comparative study of virtual reality methods of interaction and locomotion based on presence, cybersickness and usability. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing* pp. 1–1 (2019)
14. Strat, T.M.: Recovering the camera parameters from a transformation matrix. In: Fischler, M.A., Firschein, O. (eds.) *Readings in Computer Vision*, pp. 93 – 100. Morgan Kaufmann, San Francisco (CA) (1987)
15. Warren, W.H., Rothman, D.B., Schnapp, B.H., Ericson, J.D.: Wormholes in virtual space: From cognitive maps to cognitive graphs. *Cognition* **166**, 152 – 163 (2017)