

SIMULACIÓN EN TIEMPO REAL DE LAS REFLEXIONES TEMPRANAS MEDIANTE EL MÉTODO DE LAS IMÁGENES

Fabián Arrebola, Daniel González-Toledo, Paula García-Jiménez, Luis Molina-Tanco, María Cuevas-Rodríguez, Arcadio Reyes-Lecuona
Universidad de Málaga, Málaga, España

Palabras Clave: Simulación de recintos, Renderización de audio 3D, Método de las Imágenes, Aproximación híbrida

ABSTRACT

We present an open-source tool to simulate early reflections in a room with the Image Source Method. Reflection order and maximum distance for the image sources are user configurable, as well as the geometry and the absorption profiles of the walls. Our work extends the 3D-Tune-In Toolkit with propagation delay simulation and the implementation of the Image Source Method. Our reverb simulation can be completed with other renderers using a hybrid approach.

RESUMEN

Se presenta una herramienta de código abierto para simular las reflexiones tempranas de una sala mediante el método de las imágenes. Para ello, el orden de reflexión y la distancia máxima de las fuentes espejo son controlables por el usuario. Asimismo, son configurables la geometría y los perfiles de absorción de las paredes. Se trata de una extensión del 3D Tune-In Toolkit, en la que se ha añadido la simulación del retardo de propagación y la implementación del método de las imágenes. Esta simulación de reverberación se puede completar con otros renderizadores mediante una aproximación híbrida.

1. INTRODUCCIÓN

La simulación acústica de recintos es un campo de investigación abierto que cada día está adquiriendo más relevancia dentro de la Acústica Inmersiva en particular y de los Sistemas de Realidad Virtual (RV) y de Realidad Aumentada (RA) en general. Asimismo, es evidente que con el paso de los años el rango de aplicaciones de RV y RA se está extendiendo y desarrollando de manera muy relevante. En ese sentido, la Acústica Virtual o Inmersiva y el sonido 3D están captando cada vez una mayor atención e interés en la comunidad científica pues el papel que desempeñan es esencial en dichas aplicaciones.

En esta comunicación se presenta una herramienta que permite renderizar las reflexiones tempranas de una sala mediante el método de las imágenes (ISM). Tanto la geometría de la sala como los perfiles de absorción de las paredes son configurables. Además, la herramienta permite limitar el número de reflexiones y la distancia máxima recorrida por el sonido reflejado, lo que le permitirá en un futuro ser integrada con otros renderizadores de la cola difusa en una aproximación híbrida.

La herramienta, de código abierto, ha sido desarrollada en C++ como una extensión del 3D Tune-In Toolkit [1], en la que se ha añadido la simulación del retardo de propagación y la implementación del método de las imágenes mediante fuentes virtuales, todo ello de forma dinámica y en tiempo real para fuentes y oyentes móviles.

Asimismo, se ha desarrollado una aplicación visual con un interfaz gráfico que representa el escenario renderizado, permitiendo configurar la simulación y visualizar el papel que juegan las fuentes virtuales. Esto lo hace adecuado como herramienta docente para demostrar el funcionamiento y complejidad del método. Por último, la herramienta permite renunciar al tiempo real para generar una respuesta al impulso sintética que incluya reflexiones de orden alto.

En la sección 2 se presenta una revisión bibliográfica relacionada con el ISM y los métodos híbridos para la simulación acústica de salas. En la sección 3 se describe la implementación de la herramienta desarrollada. En la sección 4 se realiza la evaluación del sistema, tanto desde un enfoque objetivo como como desde un punto de vista subjetivo. En la sección 5 se lleva a cabo la descripción de la aplicación desarrollada desde la perspectiva del Interfaz de Usuario. Finalmente, en la sección 6 se incluyen las conclusiones.

2. ESTADO DEL ARTE

Hoy en día, las herramientas de simulación acústica de salas de última generación utilizan algoritmos híbridos o mixtos [2]. Normalmente, estos procedimientos híbridos [3]–[9] suelen combinar el ISM [3]–[5], [9], de cara a establecer las reflexiones tempranas de la sala, o fase determinista de la respuesta al impulso del espacio a simular, con otros métodos que aportan la cola reverberante, bien sea mediante Redes FDN (Feedback Delay Networks) o aplicando la convolución con la RIR medida de la sala.

ISM es un método basado en la Acústica Geométrica que asume que las ondas de presión sonora son sustituidas por el concepto de rayos acústicos, que describen la trayectoria de la energía del sonido que viaja en línea recta. Igualmente, el método también supone que las paredes o superficies del recinto a simular son planas. Por tanto, los efectos como la difracción, interferencia y refracción de las ondas de sonido son despreciados. Estas aproximaciones hacen que el método tenga limitaciones en las bajas frecuencias. Asimismo, el número de imágenes virtuales aumenta exponencialmente al crecer el orden de reflexión, con lo que el coste computacional puede ser excesivo para su ejecución en tiempo real.

Una de las primeras implementaciones del ISM para realizar la simulación acústica de una habitación es descrita en [10]. Los autores calculan, mediante simulación por computador, la RIR entre dos puntos de una sala de características preestablecidas y, al realizar la convolución de la RIR con cualquier señal de entrada, logran emular la reverberación asociada a dicha configuración de la sala.

Una extensión del ISM a un poliedro con un número arbitrario de superficies es presentada en [11]. En este trabajo, Borish describe un algoritmo recursivo para calcular las posiciones de las imágenes o fuentes virtuales asociadas a una sala con una geometría arbitraria. Para ello, aplica el principio básico de que una ruta cualquiera que involucra reflexiones puede representarse mediante una línea recta que conecta al oyente con la fuente virtual correspondiente. Además, introduce los criterios que debe cumplir cada fuente virtual para que ésta sea considerada como una fuente visible y, por tanto, una fuente a procesar.

Mechel, en [12], presenta un extenso tutorial del ISM, describiendo los fundamentos analíticos del método que permiten reducir de manera drástica el número de fuentes espejo a ser tenidas en cuenta. Para ello, establece los criterios y las condiciones para interrumpir la cadena de generación de tales fuentes espejo. Además, introduce el concepto de “fuentes de esquina”, que representan el campo de sonido en áreas cercanas a las aristas que forman cada pareja de paredes, y cuya aplicación conlleva una mayor reducción del total de fuentes que deben ser procesadas. Finalmente, cabe destacar que resuelve el problema asociado los recintos con esquinas convexas aplicando el principio de superposición[13].

Desde el punto de vista de la visualización gráfica de la propagación de la onda directa de sonido y sus primeras reflexiones, en [14] se usa el ISM como método de modelado para la simulación acústica de entornos virtuales en tres dimensiones, permitiendo analizar visualmente las trayectorias asociadas a las reflexiones de cada fuente imagen. No obstante, en este trabajo la geometría de la sala ha de ser rectangular y el máximo orden de reflexión para la visualización es 2.

El ISM se puede calificar como un método simple. Sin embargo, como ya se ha apuntado anteriormente, su exigencia computacional crece de manera exponencial cuando el orden de reflexión es elevado y cuando la geometría de la sala se complica añadiendo paredes o superficies de reflexión. A este respecto, una alternativa para abordar el procesamiento en tiempo real de la simulación sería el acudir a arquitecturas de procesamiento paralelo. En este sentido, conviene tener en cuenta que el ISM es inherentemente difícil de paralelizar de forma eficiente debido a la dependencia de los datos contenidos en el árbol o estructura jerárquica asociada a las fuentes virtuales a procesar. No obstante, Gkanos et al. [15] desarrollan y evalúan dos implementaciones basadas en la paralelización del método; una estrategia consiste en realizar la paralelización empleando una CPU multicore, la otra alternativa se basa en el uso de una GPU, arquitectura masivamente paralela y que, por tanto, exige añadir computaciones extra de cara a eliminar la dependencia de los datos antes de que éstos puedan ser procesados.

Las limitaciones para las bajas frecuencias del ISM son abordadas en [2], donde Aretz et al. realizan un estudio para salas rectangulares basado en comparar la Función de Transferencia de la Habitación (RTF), obtenida aplicando el ISM con la RTF obtenida con el Método de Elementos Finitos (FEM), que es considerada como referencia. Asimismo, en el ISM introducen factores de reflexión complejos que dependen del ángulo de incidencia del rayo asociado a cada fuente virtual y de la frecuencia. Con esta modificación logran que el error esté comprendido entre ± 1 dB para frecuencias alrededor y por encima de la frecuencia de Schroeder.

Retomando las técnicas híbridas, Meesawat and Hammershøi [5] exponen una serie de criterios o parámetros para determinar en qué momento debería producirse la transición entre las reflexiones tempranas y la cola reverberante. Entre tales criterios están el orden de reflexión, el camino libre medio -o distancia promedio que recorre el sonido antes de reflejarse-, el volumen de la sala y la densidad de las reflexiones. En un trabajo posterior [9], realizan una evaluación subjetiva mediante pruebas de escucha, para una sala determinada, en la que comparan la auralización que se obtiene usando: a) el BRIR medido, b) el BRIR modelado con el software CATT-Acoustic y c) el BRIR simulado, fruto de la combinación de los dos anteriores, usando diferentes puntos de concatenación.

En [4], [6], [7] los autores proponen métodos en los que las reflexiones tardías son implementadas mediante redes de retardo. En [4] se combina ISM con FDN y se incluye un predictor paramétrico que asegura la transición suave entre las reflexiones tempranas y la cola reverberante. Las propuestas descritas en [6], [7] comparten el hecho de que las reflexiones tempranas son obtenidas a través del cálculo de la operación de convolución con la RIR de la sala.

Una revisión exhaustiva de las alternativas para implementar el proceso de reverberación es realizada por Välimäki et al. en [16], [17], ambos trabajos desgranar la mayoría de los algoritmos de procesamiento digital de señal existentes para emular dicho proceso.

3. IMPLEMENTACIÓN

La implementación de esta herramienta está basada en la librería 3D Tune-In Toolkit [1], que espacializa fuentes individuales convolucionándolas con la HRTF del oyente y simulando el

retardo de propagación. Es necesario destacar que esta librería soporta situaciones dinámicas en las que la distancia entre fuente y oyente puede variar, ya sea porque se mueva la fuente, el oyente, o ambos. Estos movimientos implican un retardo variable que se basa en la simulación del efecto Doppler, considerando de forma diferente los movimientos de oyente y fuente.

Usando estas funcionalidades, la implementación del método de las imágenes requiere crear una fuente virtual por cada imagen potencialmente visible. Para ello, se ha implementado sobre la misma librería una serie de clases que permiten gestionar las fuentes virtuales imagen, las cuales están asociadas a cada fuente real que se le quiere aplicar el método. A su vez, se define la geometría de la sala como una serie de paredes planas, que son polígonos convexos con un número arbitrario de esquinas, y que forman un poliedro convexo con un número arbitrario de caras.

Cada fuente real es asociada a un árbol recursivo de fuentes imagen que se reflejan en las paredes de la sala y en las imágenes de estas paredes. Para una determinada fuente, en una sala se crea dicho árbol recursivo hasta que se alcanza un determinado orden de reflexión o una determinada distancia entre el oyente y la fuente imagen. Además de ese criterio, el árbol recursivo se poda si la nueva imagen está más cerca que la imagen que la generó.

Una fuente imagen es visible si el rayo que la une al oyente atraviesa en orden inverso todas las paredes en las que la fuente se reflejó para generar dicha imagen. Por lo tanto, la visibilidad depende de la posición de oyente y fuente. En cada *frame* se calcula la visibilidad de cada una de las imágenes. La visibilidad es un factor que vale 1 para las fuentes visibles, 0 para las no visibles y un valor intermedio para aquellas que se encuentran cerca de la transición entre ambos estados. Este valor intermedio se determina por la proximidad del rayo que une fuente y oyente a cada una de las mencionadas paredes que generaron la imagen. Sólo se renderizan aquellas fuentes con visibilidad distinta de 0. De esta forma, las fuentes transitan entre visibles y no visibles de forma suave la señal de las fuentes renderizadas es multiplicada por el factor de visibilidad calculado. A modo de ejemplo, la Figura 1 ilustra, para una sala con geometría trapezoidal, las imágenes obtenidas estableciendo un orden de reflexión máximo de 2.

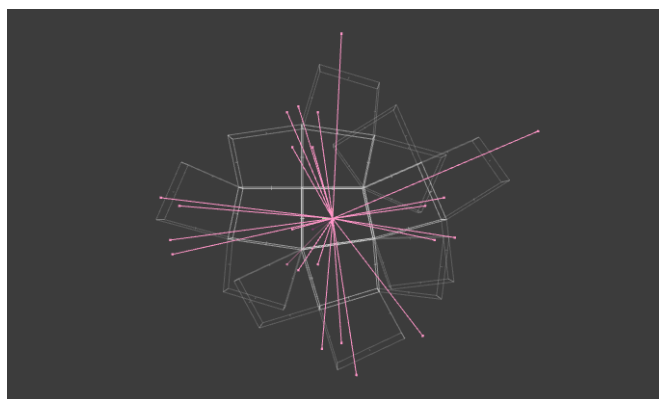


Figura 1 – Generación de imágenes de una sala trapezoidal

Por otro lado, cada pared i , se define con un perfil de absorción definido por nueve coeficientes de absorción acústica (α_i), correspondientes a nueve bandas de una octava de ancho. Se calcula entonces un factor de atenuación $A(f)$ para cada banda centrada en la frecuencia f mediante el producto de los coeficientes de reflexión de las N paredes en las que se ha reflejado cada imagen:

$$A(f) = \prod_{i=1}^N (\sqrt{1 - \alpha_i(f)}) \quad (1)$$

El perfil total, con sus nueve bandas, se aplica con un banco de nueve filtros Butterworth de segundo orden. Tras filtrar cada fuente y aplicar el factor de visibilidad, la fuente se retrasa dependiendo de la distancia al oyente, se convoluciona con la HRTF del mismo dependiendo de su orientación relativa a dicho oyente y se mezcla con todas las demás imágenes. Toda esta simulación está integrada en el 3D Tune-In Toolkit, constituyendo una actualización que se incluirá en la próxima versión de esta librería y que está disponible como código abierto en el repositorio de dicha librería¹.

4. EVALUACIÓN

4.1. Rendimiento

La evaluación del rendimiento del sistema desarrollado incluye un estudio de las prestaciones que se alcanzan en tiempo real, así como el comportamiento de éste en tiempo diferido. Las pruebas han sido realizadas en un ordenador personal dotado de un procesador Intel I5 de 12^a generación, a una frecuencia de trabajo de 2.5GHz, con 16 GB de RAM y Windows 10 Pro como sistema operativo. Por agilidad, en todos los test se ha empleado una frecuencia de muestreo de 44100 Hz. Asimismo, en estas pruebas el ISM ha sido aplicado a una sala con una geometría con forma de auditorio -compuesta de 7 paredes (véase Figura 7)- y a salas con geometría rectangular con distintas dimensiones en X (largo de la habitación) pero manteniendo constantes la anchura (Y) y la altura (Z) de la habitación. Igualmente, por comodidad, para la absorción de las paredes, se ha establecido con un perfil constante e igual a 0.3 para todas las que forma la sala a simular.

Uno de los parámetros del 3DTI Toolkit, es el tamaño del buffer de trabajo. Dicho tamaño, junto a la frecuencia de muestreo, establece el intervalo de tiempo máximo en el que la CPU debe procesar las muestras asociadas a un buffer o *frame*. Así, el porcentaje de *frame* es una indicación del grado de carga computacional del sistema global.

En la Figura 2 se ilustra, para diferentes tamaños de *frame*, cómo varía la carga de la CPU (expresada en porcentaje del *frame*) en función del Orden de Reflexión (OR) establecido para el ISM. Se puede apreciar que para ordenes menores o iguales a 3 el porcentaje de *frame* no supera el 100% independientemente del tamaño del buffer. Igualmente, para OR 4, el sistema puede operar con normalidad (porcentaje de *frame* < 100) para tamaños de buffer igual o superiores a 512 muestras; y para OR 5, el sistema global no puede trabajar en tiempo real en ningún caso.

Para analizar el comportamiento en cuanto a requerimientos de memoria, se incluye la Figura 3, que muestra cómo evoluciona la cantidad de memoria que necesita el sistema en función del OR y del tamaño del buffer. Lógicamente, la cantidad de memoria requerida es máxima para un tamaño del buffer de 8192 muestras, le sigue en exigencia el caso de buffer de 2048 muestras. Esta relación entre tamaño de buffer y memoria usada no se mantiene a medida que el número de muestras del buffer disminuye, pues se aprecia que el sistema se comporta de manera óptima cuando el tamaño del *frame* es de 512 muestras.

Para finalizar con las pruebas de rendimiento en tiempo real, en la Figura 4 se ilustra cómo varía la carga de la CPU para diferentes dimensiones de la habitación y en función de la distancia de poda –en metros– del árbol recursivo asociado a las fuentes de imágenes que se generan aplicando el ISM. En todas estas medidas se ha establecido un OR de 5 y 512 muestras como tamaño de *frame*. En dicha figura se aprecia que para salas de pequeñas dimensiones la distancia de poda no puede ser muy elevada: en el caso de sala de 3x3x3 (línea celeste), para una distancia de 6 metros el porcentaje de *frame* es del 94% y si dicha distancia se incrementa

¹ https://github.com/3DTune-In/3dti_AudioToolkit

a 7 metros el sistema no tiene tiempo de procesar las 109 fuentes visibles de las 2059 imágenes potenciales. En el extremo opuesto, en la sala de 15x3x3 (línea verde) con una distancia de poda de 13 metros el porcentaje de *frame* es del 87% y el sistema se satura para una distancia de poda de 15 metros (con estos parámetros el número de fuentes visibles es de 126 de un total de 1265 imágenes potenciales).

En cuanto a las pruebas en tiempo diferido, la herramienta desarrollada está dotada de la capacidad de generar respuestas al impulso sintéticas -para su posterior utilización- renunciando a la exigencia de ejecución en tiempo real. Esto proporciona la posibilidad de simular y analizar escenarios de geometría arbitraria usando órdenes de reflexión elevados que impedirían al sistema simularlos en tiempo real.

Para terminar con el análisis de rendimiento, la Figura 5 recoge medidas asociadas al tiempo de ejecución invertido por la herramienta en realizar la simulación de una sala con un segmento de audio de 1 segundo de duración. Las medidas se han realizado para distintas longitudes de *frame* y diferentes valores del OR. Puede apreciarse que el tiempo de ejecución requerido va creciendo exponencialmente a medida que se incrementa el OR. Asimismo, se observa que, para estas pruebas de simulación *offline*, los tamaños de *frame* 512 y 1024 ofrecen unas prestaciones mejores que los tamaños 256 y 2048.

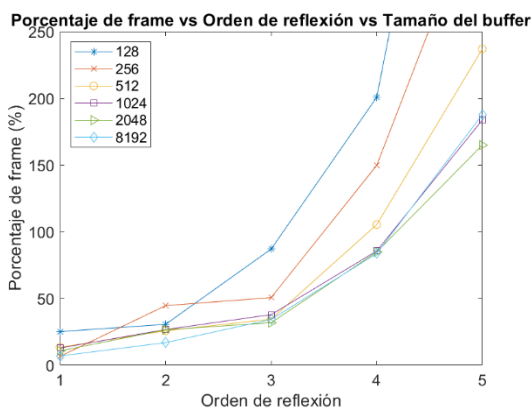


Figura 2 – Porcentaje de *frame* para diferentes órdenes de reflexión y tamaños de buffer

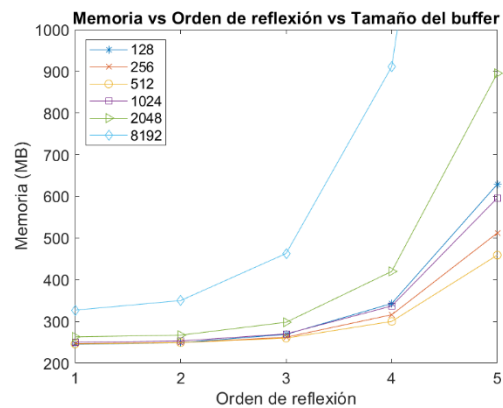


Figura 3 – Memoria usada en función del orden de reflexión y del tamaño del buffer.

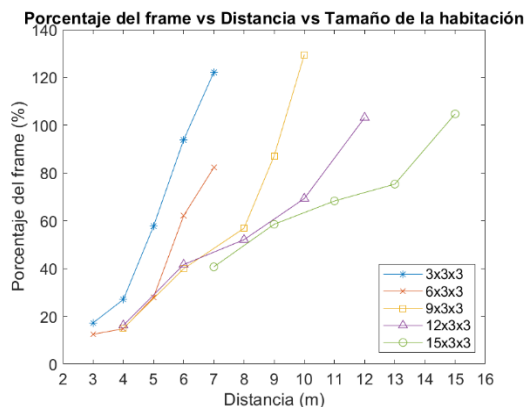


Figura 4 – Porcentaje de *frame* para diferentes dimensiones de sala y distancias de poda.

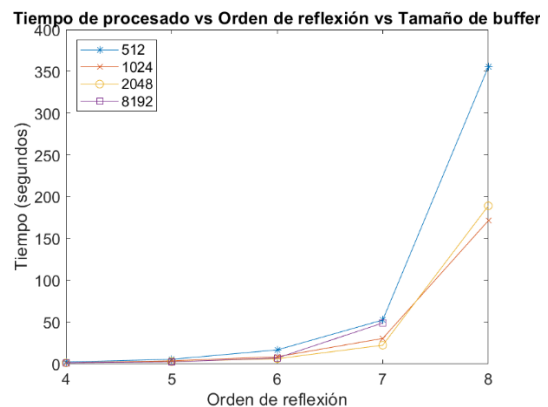


Figura 5 – Tiempo requerido para procesar un segundo de audio para diferentes ORs

4.2. Evaluación Subjetiva

Se ha llevado a cabo una evaluación subjetiva donde se ha comparado el ISM con otros métodos de simulación acústica de la sala donde se encuentra físicamente el participante. Concretamente, se ha realizado un estudio utilizando un cuestionario de MULTiple Stimuli with Hidden Reference and Anchor (MUSHRA), donde el oyente tiene que puntuar entre 0 y 100 una serie de muestras de sonido, según le parezca que son similares o no a un sonido de referencia. Entre las muestras de sonido también aparece una versión oculta de la referencia y un anchor.

En este estudio se han comparado los siguientes métodos de renderizado: convolución con el BRIR real medido en la sala (referencia), ISM de orden 2 y sala del mismo tamaño que la real, ISM de orden 2 y sala de un tamaño más grande que la real, ISM de orden 3 y sala del mismo tamaño que la real, ISM de orden 3 y sala de un tamaño más grande que la real, Scattering Delay Network (SDN) y una sala sin reverberación (anchor). El nivel de señal para cada uno de los algoritmos de reverberación ha sido ajustado para que todas se perciban a un volumen parecido.

En el estudio han participado un total de 27 personas (17 hombres y 10 mujeres) con una edad media de 23 años. El participante se coloca sentado en medio de la sala, inmerso en un mundo virtual que simula la sala real, a través de unas gafas Oculus Rift y unos auriculares Sennheiser HD 600.

El cuestionario MUSHRA se ha realizado en una única sesión para cada uno de los participantes, con un único bloque de 15 trials. Cada trial muestra un cuestionario con un estímulo en particular y los diferentes métodos de renderizado. Se han utilizado 5 tipos de estímulos: una persona hablando, una batería, un saxofón, una guitarra y ruido blanco pulsado. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 6, donde se representa la respuesta media de todos los participantes para cada método de renderizado y cada estímulo.

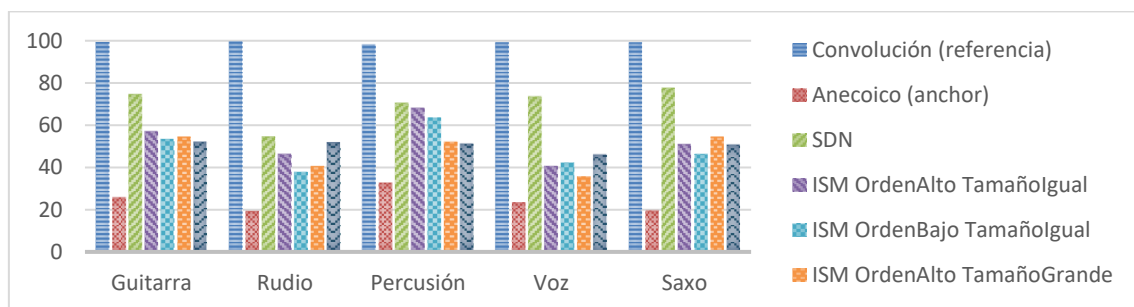


Figura 6 – Puntuación media de todos los participantes para cada estímulo y método de renderizado.

Como cabía esperar, la máxima puntuación es para el sonido de referencia mientras que la más baja es para el anchor. Un ANOVA de medidas repetidas reveló que, para todos los estímulos, el método de renderizado utilizado conduce a diferencias estadísticamente significativas, tanto si tenemos en cuenta la referencia y el anchor dentro del análisis como si no. El SDN es el método mejor puntuado de todos, independientemente del estímulo. En el análisis estadístico con una prueba T por parejas, el SDN muestra diferencias significativas con los diferentes métodos para todos los estímulos. Las diferentes configuraciones de ISM reciben diferentes puntuaciones según el estímulo. Para la guitarra, el ISM con orden alto y tamaño de sala igual es el mejor valorado, pero sin diferencias significativas con el resto. Con la percusión el mejor valorado también es el ISM con orden alto y tamaño de sala igual, con diferencias significativas con el ISM con orden alto y tamaño grande ($p = 0.034$) y ISM con orden bajo y tamaño grande ($p = 0.011$). Para el ruido y la voz, el mejor valorado es el ISM de orden bajo y tamaño de sala grande. En el caso del ruido con diferencias significativas con el ISM de orden bajo y tamaño igual ($p = 0.038$), mientras que la voz no presenta diferencias significativas entre ninguno de los métodos.

Respecto al saxo, las cuatro configuraciones del ISM han sido valoradas con una puntuación similar, sin presentar diferencias significativas entre ellas, siendo el ISM orden alto y tamaño grande el mejor valorado.

5. DESCRIPCIÓN DEL INTERFAZ DE USUARIO

Para demostrar el funcionamiento de nuestra implementación, se ha construido una aplicación que incluye el 3D Tune-In Toolkit con la ampliación descrita en esta contribución, y en la que se puede definir una sala arbitraria y simular la reverberación mediante el método de las imágenes de una fuente. La aplicación permite definir cualquier habitación con geometría arbitraria, cargada mediante un fichero XML o bien definir una sala caja de zapatos proporcionando el alto, ancho y largo. Asimismo, se pueden activar y desactivar las paredes de forma rápida. Además, se puede seleccionar el orden máximo de reflexión o la distancia máxima a la que se simularán las imágenes.

La aplicación muestra gráficamente en 3D la sala, junto con las salas imagen desdobladas y las fuentes imágenes. Además, esa representación se puede girar y el usuario puede mover tanto la fuente como el oyente mientras el audio se está renderizando, viendo el resultado en tiempo real. Por esto, pensamos que la aplicación puede ser usada en docencia para enseñar los fundamentos de la acústica geométrica. Las Figura 7-10 muestran capturas de pantalla de la aplicación.

Por último, la aplicación permite grabar en un fichero wav el resultado del renderizado, así como generar y grabar la respuesta al impulso binaural de la sala (BRIR) aplicando el método de las imágenes.

6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

En este trabajo se presenta una implementación con licencia de código abierto del método de las imágenes, dentro de la librería de renderizado de audio binaural 3D Tune-In Toolkit. Se ha presentado una evaluación del rendimiento de dicha librería, demostrando la viabilidad del renderizado de las primeras reflexiones hasta de orden 7 para una sala de seis paredes. No obstante, si queremos incluir el renderizado de la cola reverberante debemos combinar esta técnica con otra que simule la reverberación difusa, como una red de retardos realimentados (Feedback Delay Network – FDN). Para facilitar esta integración en un futuro, se ha incluido una condición de poda en la recursión que genera las imágenes que limita la inclusión de fuentes imagen en función de la distancia al oyente. De esta forma, estaríamos simulando la respuesta al impulso de la sala hasta un determinado momento, en el que podríamos transitar a otro método que permita simular la reverberación difusa de forma eficiente.

Otra posibilidad que está en nuestros planes sería codificar las fuentes imagen en un sistema Ambisónico virtual, lo que nos permitiría reducir el número de convoluciones y buffers de retardo necesarios para realizar el renderizado, pero manteniendo la espacialidad de las imágenes con una resolución que dependerá del orden Ambisónico empleado.

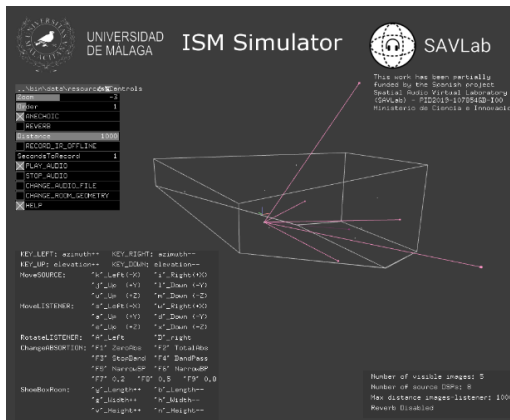


Figura 7 – Auditorio. OR, 1. Número de imágenes visibles 5 . Zoom -3.

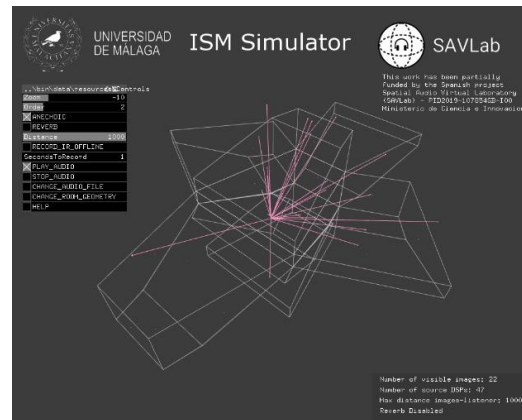


Figura 8 – Auditorio. OR 2. Número imágenes visibles 22. Zoom -10

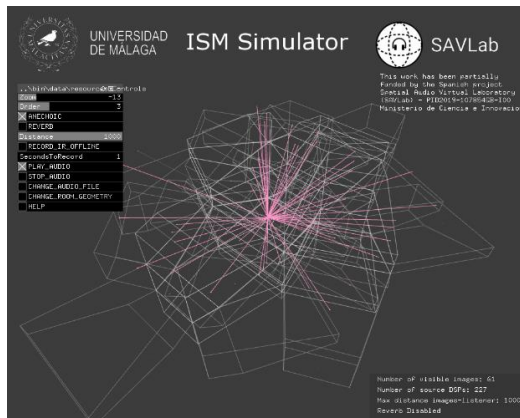


Figura 9 – Auditorio. OR 3. Número de imágenes visibles 61. Zoom -13.

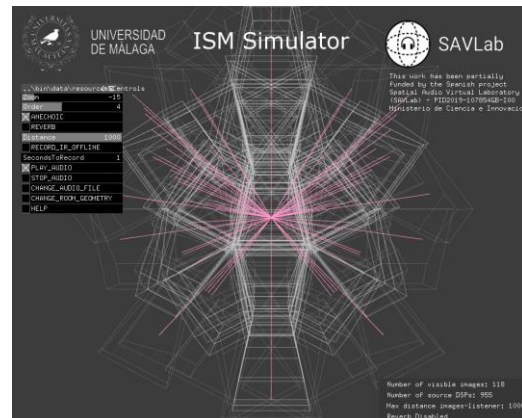


Figura 10 – Auditorio. OR 4, Número de imágenes visibles 118. Zoom -15. Vista cenital.

AGRADECIMIENTOS

Este Trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología, dentro del Plan Nacional de I+D a través del proyecto SAVLab – Laboratorio Virtual de Audio Espacial (PID2019-107854GB-I00) y por la Unión Europea, dentro del programa marco Horizon 2020 a través del proyecto SONICOM (acuerdo N° 101017743).

REFERENCIAS

- [1] M. Cuevas-Rodríguez et al., “3D Tune-In Toolkit: An open-source library for real-time binaural spatialisation,” PLoS One, vol. 14, no. 3, p. e0211899, Mar. 2019.
- [2] M. Aretz, P. Dietrich, and M. Vorländer, “Application of the mirror source method for low frequency sound prediction in rectangular rooms,” Acta Acustica united with Acustica, vol. 100, no. 2, pp. 306–319, 2014.
- [3] R. Heinz, “Binaural room simulation based on an image source model with addition of statistical methods to include the diffuse sound scattering of walls and to predict the reverberant tail,” Applied Acoustics, vol. 38, no. 2–4, pp. 145–159, Jan. 1993.

- [4] R. Xia, J. Li, A. Primavera, S. Cecchi, Y. Suzuki, and Y. Yan, “A hybrid approach for reverberation simulation,” *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol. E98A, no. 10, pp. 2101–2108, 2015.
- [5] K. Meesawat and D. Hammershøi, “An investigation on the transition from early reflections to a reverberation tail in a BRIR,” ... of the 2002 International Conference on ..., pp. 5–9, 2002.
- [6] A. Primavera, M. Gasparini, S. Cecchi, L. Romoli, and F. Piazza, “Hybrid Reverberation Algorithm : a Practical Approach Hybrid Reverberation Algorithm : a Practical Approach,” no. February 2014, 2013.
- [7] A. B. Greenblatt, J. S. Abel, and D. P. Berners, “A hybrid reverberation crossfading technique,” *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings*, pp. 429–432, 2010.
- [8] W. Wittebol and M. Hornikx, “A hybrid room acoustic approach for auralization,” pp. 1–12.
- [9] M. Markovic, S. K. Olesen, E. Madsen, P. F. Hoffmann, and D. Hammershøi, “Usage of measured reverberation tail in a binaural room impulse response synthesis,” *Acustica United with Acta Acustica*, vol. 97(Supplement 1), 2011.
- [10] J. B. Allen and D. A. Berkley, “Image method for efficiently simulating small-room acoustics,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 65, no. 4, pp. 943–950, Apr. 1979.[11] J. Borish, “Extension of the image model to arbitrary polyhedra,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 75, no. 6, pp. 1827–1836, 1984.
- [12] F. P. Mechel, “IMPROVED MIRROR SOURCE METHOD IN ROOMACOUSTICS,” *J Sound Vib*, vol. 256, no. 5, pp. 873–940, Oct. 2002.
- [13] F. P. Mechel, “Modified Mirror and Comer Sources with a Principle of Superposition”, Accessed: Jul. 14, 2022.
- [14] R. A. Rathnayake and W. K. I. L. Wanniarachchi, “Image source method based acoustic simulation for 3-D room environment,” *International Journal of Scientific and Technology Research*, vol. 8, no. 11, pp. 222–228, 2019.
- [15] K. Gkanos, F. Pind, H. H. Brandenborg Sørensen, and C. H. Jeong, “Comparison of parallel implementation strategies for the image source method for real-time virtual acoustics,” *Applied Acoustics*, vol. 178, p. 108000, 2021.
- [16] V. Välimäki, J. D. Parker, L. Savioja, J. O. Smith, and J. S. Abel, “Fifty Years of Artificial Reverberation,” *IEEE Trans Audio Speech Lang Process*, vol. 20, no. 5, pp. 1421–1448, Jul. 2012.
- [17] V. Välimäki, J. Parker, L. Savioja, J. O. Smith, and J. Abel, “More Than 50 Years of Artificial Reverberation,” *Proc. AES 60th International conference*, p. K-1, 2016.