

Desde la simulación de la acústica de salas por ordenador a la realidad virtual interactiva*

*Prof. Jens Blauert
Institute of Communication Acoustics
Ruhr University Bochum
D44780 Bochum*

PACS 43.55.Ka

1. Introducción

La simulación por ordenador de la acústica de salas (Simulación de Salas binaural) así como la representación auditiva en realidad virtual (RV) está relacionada con una tecnología en la cual la señal de entrada al sistema auditivo de los oyentes es generada por ordenadores. Como esta entrada generada por ordenador puede conformarse para ser fisiológicamente adecuada, p. ej., como la entrada sensorial del mundo real, si no muy “natural” por lo menos “creíble”, se pueden crear percepciones auditivas para aquellos oyentes expuestos a ella. A continuación ofrecemos un breve repaso de los fundamentos de esta tecnología. Para una información más detallada, ha de remitirse p. ej. a Begault 1994, Blauert & Lehnert 1995, Blauert & Strauss 1995, Blauert 1996, 1996a, Gilkey & Anderson, 1997.

Dicho de forma simplificada, el sistema auditivo puede considerarse como un ordenador biológico complejo con dos puertos de entrada principales. Sus señales de entrada son señales sonoras que llegan al tímpano derecho e izquierdo. En su camino hacia los tímpanos, estas señales pasan por los oídos externos donde son difractadas y en parte apantalladas por el cráneo. Entonces entran en el sistema pabellón-canal auditivo, donde luego son modificadas por las resonancias. De esta forma, se superponen alteraciones espectrales sobre las señales sonoras entrantes en su camino hacia los tímpanos que son específicas con respecto a las direcciones y distancias de las fuentes sonoras con respecto a las cabezas de los oyentes. Matemáticamente, estas “distorsiones lineales”, que han resultado ser de gran relevancia para la formación de las posiciones y extensiones de las percepciones auditivas, pueden describirse en función de las llamadas “funciones de transferencia relacionadas con la cabeza, HRTF (Head-Related Transfer Functions)” (Moeller et al. 1995, Hartung 1995, Hartung & Raab 1996).

Una hipótesis de trabajo común en el campo de la simulación auditiva es la de que la reproducción auténtica de una escena auditiva puede lograrse exponiendo a los oyentes a exactamente las mismas señales sonoras en los dos oídos que las que hubiesen tenido en la posición original. Este acercamiento “físico” a la reproducción auténtica es ciertamente cuestionable en campos más generales ya que, entre otros, la emoción, la cognición y la información modal cruzada no están contempladas; pero, sin embargo, lleva hacia un largo camino.

Las señales que se presentan a los oyentes para fines de simulación pueden ser recogidas en los canales del oído de un oyente real o en los dos micrófonos de una réplica acústicamente equivalente de una cabeza (llamada cabeza artificial). Además, en sistemas más avanzados, las señales son proporcionadas por algoritmos de procesamiento de señales que, entre otras cosas, aplican las HRTF adecuadas a cada uno de los componentes sonoros que alcanzan a los oyentes desde distintas direcciones y distancias. El uso de señales procesadas por ordenador tiene una importante ventaja que pasamos a explicar a continuación.

Los oyentes, al estar envueltos en un escenario auditivo natural o simulado, tienden a girar sus cabezas. Esto lleva a alteraciones específicas de las señales en sus tímpanos. Se ha demostrado en más de una ocasión que estas alteraciones específicas son utilizadas por el sistema auditivo para disipar ambigüedades perceptuales. Por consiguiente, los sistemas de simulación modernos detectan las posiciones de la cabeza de los oyentes y alteran en consecuencia las señales que llegan a los oídos de los oyentes. Estas alteraciones sólo pueden aplicarse cuando las señales que llegan al oído son procesadas por un ordenador.

En entornos auditivos más complejos, como espacios cerrados con superficies reflectantes, los oídos de los oyentes

(*) Conferencia pronunciada por el Prof. J. Blauert en el Paraninfo de la Universidad de Oviedo, durante la sesión de clausura de las XXVIII Jornadas Nacionales de Acústica –TECNIACUSTICA 97– y Encuentro Ibérico de Acústica.

son alcanzados por sonidos reflejados además de por los sonidos directos. Para cada una de las diferentes reflexiones se deberá aplicar el HRTF más adecuado. Huelga decir que dichos sistemas necesitan una potencia de cálculo considerable, sobre todo cuando los sistemas están diseñados para reaccionar a los movimientos de cabeza en tiempo real. Esto último, sin embargo, es necesario para incitar a la implicación perceptual y la inmersión de los oyentes.

2. La Simulación de Salas Binaural

La Simulación de Salas Binaural es el término utilizado para designar la simulación auditiva de espacios arquitectónicos, como auditorios o salas de conciertos.

Siguiendo el razonamiento anterior, es necesario presentar a ambos tímpanos señales idénticas o por lo menos muy similares a las señales que se presentarían en el espacio real correspondiente. Obviamente, la manera más fácil es usar auriculares como fuente, porque las señales binaurales que deberán presentarse a los tímpanos pueden darse directamente en los terminales del transductor del auricular después de haber sido ecualizadas adecuadamente para tener en cuenta la función de transferencia de los auriculares. Y así no pueden producirse interferencias perturbadoras entre los dos canales de audio.

Para implementar una Simulación de Salas Binaural se deberán realizar las siguientes tareas:

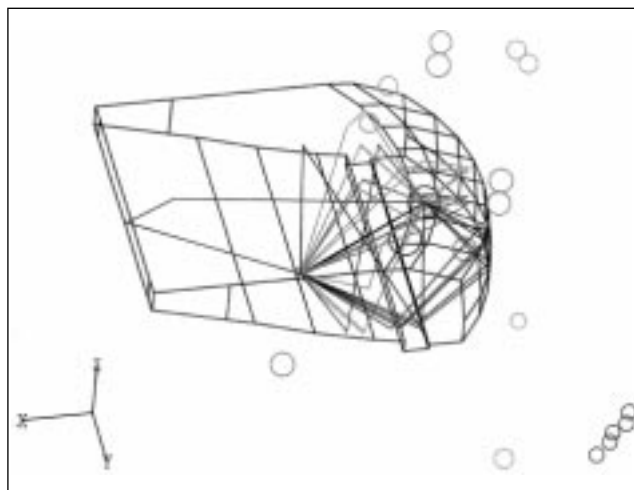


Figura 2.- Modelización de una sala desde el punto de vista acústico, en la posición del oyente.

- Modelar la sala
- El espacio simulado deberá modelarse desde el punto de vista acústico en la posición del oyente. Esto se denomina detección auditiva o modelado del campo sonoro. El resultado de este proceso de modelado es un mapa espacial de las denominadas fuentes sonoras especulares.
- Basadas en los resultados de este proceso de modelado, las señales en el tímpano resultantes deberán ser calculadas y presentadas. Esto se denomina auralización.

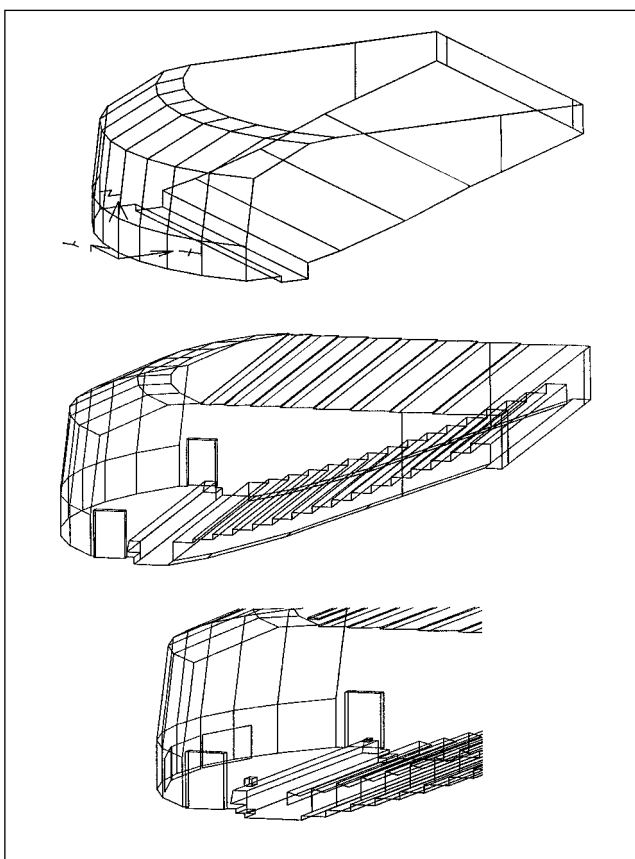


Figura 1.- Modelización de una sala de conciertos.

Para estar seguros, la Simulación de Salas Binaural deberá tener en cuenta el impacto del entorno circundante en la percepción auditiva del oyente. De hecho, los oyentes pueden obtener solamente de las percepciones auditivas, una impresión de varias propiedades del entorno circundante. Por ejemplo, el interior de una iglesia suena completamente diferente si lo comparamos con una pequeña sala de estar. La ausencia total de reflexiones, por ejemplo, en una cámara anecoica, puede incluso producir una sensación desagradable para aquellas personas que no estén acostumbradas a la ausencia del entorno perceptible auditivamente hablando. Además, se cree que los caminos reflejados son pistas importantes para la correcta percepción de la distancia.

El impacto de los entornos reflectantes en el ruido percibido puede modelarse con la ayuda de algoritmos apropiados de modelado del campo sonoro (Lehnert 1992, Lehnert & Richter 1995). Estos algoritmos utilizan la acústica geométrica: Siempre y cuando la longitud de onda del sonido sea pequeña, comparada con las dimensiones geométricas lineales de las superficies en la sala, y grande, comparada con las asperezas y las curvaturas de estas superficies, las ondas sonoras se propagarán casi en líneas rectas. Por lo tanto, se pueden considerar como rayos sonoros que se reflejan en superficies según la ley de la reflexión óptica. Aunque la hipótesis anteriormente citada no sea cierta para las longitudes de onda de todos los sonidos perceptibles, se ha demostrado (Pompetzki, 1993) que se pueden obtener resultados razonables haciendo

uso de la acústica geométrica. Por supuesto, los efectos ondulatorios como la difracción y las reflexiones difusas no pueden modelarse exactamente valiéndose simplemente de la acústica geométrica. Para ello, se requeriría resolver numéricamente la ecuación de la onda acústica para la presión sonora con respecto a las condiciones de contorno complejas dadas por las superficies reflectantes. Ya que se necesitaría un gran esfuerzo computacional, sobre todo para frecuencias elevadas, actualmente este método no es conveniente para aplicaciones en tiempo real.

Basado en la simplificación “geométrica” anterior, se han desarrollado dos algoritmos principales para la simulación binaural de salas. De acuerdo con el llamado modelo “imagen-especular” (Allen & Berkley, 1979), se deberán reflejar las fuentes sonoras primarias en todas las superficies geométricas del entorno para obtener fuentes sonoras secundarias virtuales. El algoritmo puede aplicarse recursivamente a estas fuentes secundarias para obtener resultados para órdenes superiores. Sin embargo, no todas las fuentes sonoras secundarias halladas con este procedimiento son acústicamente relevantes, porque generalmente las superficies no se extienden infinitamente. Por consiguiente, la gran mayoría de las reflexiones calculadas de órdenes superiores se sitúan fuera de los contornos de las paredes correspondientes, o el camino sonoro está bloqueado por otras paredes. Se necesita un gran esfuerzo en términos de potencia de cálculo para extraer las fuentes sonoras pertinentes realizando investigaciones de visibilidad.

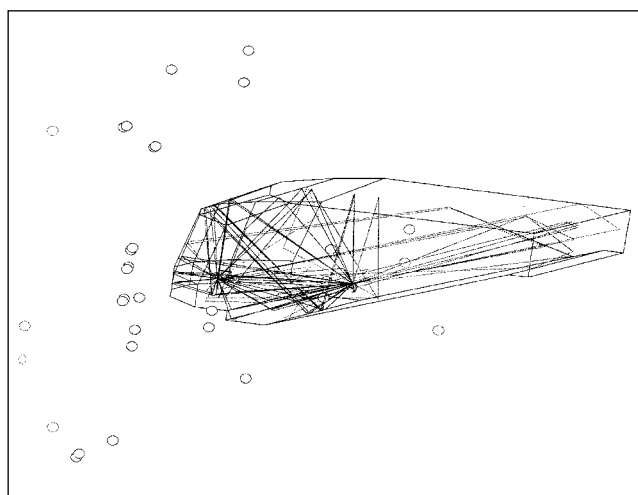


Figura 3.- Modelado con un modelo de imagen especular.

Un método alternativo para hallar fuentes sonoras secundarias es el algoritmo de “trazado de rayos”. Es comparable a los correspondientes algoritmos de detección aplicados en el campo de los gráficos por ordenador. Se emiten rayos desde cada fuente sonora en direcciones diferentes y se traza su propagación dentro de la sala. Los rayos que inciden sobre las superficies del entorno son reflejados de acuerdo con la ley de la reflexión. Las reflexiones difusas pueden ser modeladas agregando componentes aleatorios al ángulo de reflexión.

Todos los rayos que inciden contra una esfera de detección alrededor del receptor son acústicamente pertinentes para la simulación. Las posiciones de las fuentes sonoras secundarias pueden hallarse fácilmente desandando estos rayos. Sin embargo, al poner el algoritmo de trazado de rayos en práctica, deberán tenerse en cuenta las faltas o las detecciones múltiples debido al número finito de rayos y la extensión espacial de la esfera de detección alrededor del receptor. El papel de la fuente sonora y del receptor también puede invertirse. Esto requiere menos esfuerzo si existe más de una fuente sonora.

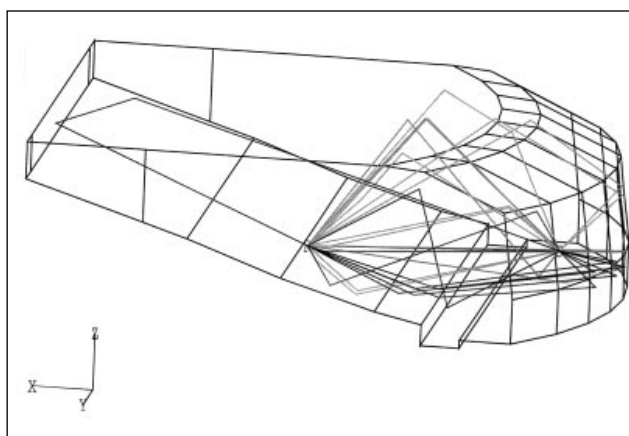


Figura 4.- Modelización con algoritmo de trazado de rayos.

Si, en teoría, el tiempo de cálculo fuese ilimitado, ambos algoritmos obtendrían la misma distribución de fuentes sonoras virtuales. El algoritmo de trazado de rayos es normalmente más eficaz para hallar reflexiones de orden superior, mientras que el modelo de imagen especular es preferible cuando solamente se requieren reflexiones de orden inferior. Se asigna una secuencia de índices a cada fuente sonora secundaria que tiene en cuenta las paredes donde el sonido ha sido reflejado en su camino hacia el oyente. Opcionalmente, se pueden almacenar ángulos de reflexión para cada reflexión para simular características de reflexión dependientes del ángulo.

Las características completas del entorno, como resultado de este proceso de modelado del campo sonoro, pueden por lo tanto representarse por un mapa espacial de fuentes sonoras especulares (Lehnert & Blauert 1989) en un espacio sin reflexiones. Cada fuente sonora puede ser auralizada con ayuda de las funciones de transferencia relacionadas con la cabeza previamente medidas (véase p. ej. Hammershoei & Sandvad 1994). Las características de directividad de la fuente y las características de reflexión de la pared pueden modelarse utilizando prefiltros. Los datos de la reflexión de la pared pueden encontrarse en la bibliografía o pueden obtenerse directamente de las mediciones realizadas en las cámaras reverberantes. El resultado de este proceso de filtrado primario es una respuesta impulsiva binaural (realmente un juego de dos, uno para cada oído) para cada fuente sonora virtual. La respuesta impulsiva binaural del recinto se obtiene sumando todas las (adecuadamente retardadas) respuestas

impulsivas binaurales de cada fuente sonora virtual. Se puede interpretar como las dos señales de presión sonora en los tímpanos que se medirían, si la fuente sonora emitiera un impulso ideal. La respuesta impulsiva de la sala describe completamente las características de transferencia del entorno entre una fuente sonora y el oyente, es decir, lleva toda la información sobre las características espaciales acústicas del espacio simulado.

Siguiendo el proceso de modelado de salas binaural, el siguiente paso computacional es la auralización. Auralizar una sola fuente sonora es comparativamente fácil. Si se indican la posición de la fuente sonora y la cabeza del sujeto, se puede calcular la distancia y la dirección de incidencia. La auralización se realiza convolucionando una señal sonora anecoica con la correspondiente respuesta impulsiva binaural del espacio simulado en tiempo real. La ganancia global se ajusta en función de la distancia entre la fuente sonora y el oyente. La absorción de sonido en el aire en largas distancias puede ser modelada por la reducción de la ganancia global adecuada o por la reducción de la ganancia en función de la frecuencia. También pueden implementarse características de directividad complejas de la fuente sonora haciendo uso de prefiltros adecuados en función de la frecuencia y dirección de emisión. Se han examinado con éxito síntesis de monopolos y síntesis armónicas esféricas con el propósito de almacenar eficazmente los datos de directividad (Giron 1993, Lehnert & Giron 1995).

3. Sistemas de Realidad Virtual Interactivos

Los sistemas de Realidad Virtual (RV) proporcionan el potencial para exponer a los seres humanos a un entorno artificial generado por ordenador y/o controlado por ordenador de una manera que se sientan y actúen como si estuviesen en un entorno natural. Muchas tareas que, de otra manera serían complicadas, pueden llevarse a cabo intuitivamente en este estado mental. Denominamos a la impresión de un sujeto de sentirse presente en un entorno natural mientras que realmente está expuesto a uno virtual, "presencia" o "inmersión". Para poder alcanzar el sentido de la presencia o inmersión, se deberá hacer llegar señales fisiológicamente correctas a los sentidos del sujeto. Los sentidos más importantes a los que hay que dirigirse en este contexto son la visión, la audición y la modalidad táctil además de la coordinación cinestética.

Los sistemas de RV comerciales de hoy en día están concebidos para poner un gran énfasis en la visión, pero todavía no tratan adecuadamente los ámbitos auditivos y táctiles aunque, para estar seguros, estos ámbitos refuerzan esencialmente la presencia o pueden incluso crearlos por sí mismos. Por consiguiente, ya en 1992, nuestro laboratorio había propuesto un proyecto ESPRIT con el nombre de SCATIS, cuyo objetivo general era el de realizar una investigación básica específica para investigar el papel de las modalidades auditivas/táctiles con respecto a la presencia, de un modo selectivo y detallado. Con este fin, se especificó un escenario experimental interactivo de estas características:

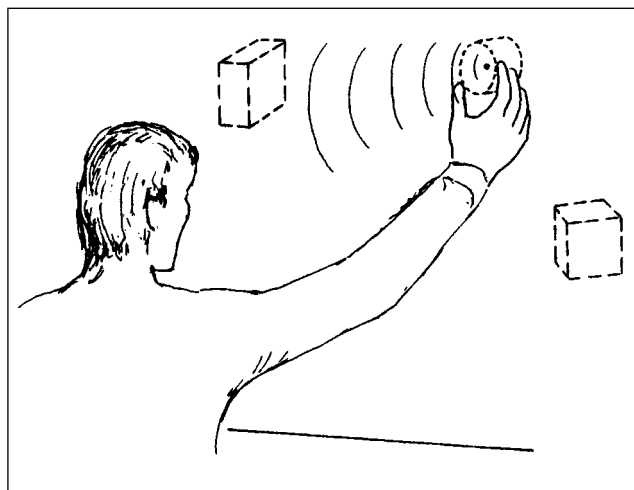


Figura 5.- Movimientos de un sujeto en un espacio virtual.

“Exponemos un sujeto a un espacio virtual con varios (invisibles) objetos auditivos/táctiles distribuidos en él. Él/ella localizará e identificará estos objetos virtuales auditivamente y podrá alcanzarlos y asirlos individualmente. En el contacto táctil, se percibirán el contorno, la textura y los atributos térmicos de los objetos virtuales. La función del sujeto es mover manualmente los objetos circundantes, es decir, recolocar su posición espacial y su orientación según un plan experimental. Se suministra realimentación auditiva.”

El proyecto se ha llevado a cabo con éxito junto con dos socios industriales (Head Acoustics, Scienza Machinale) y dos universidades más (Aalborg, Pisa). El escenario se consideró representativo de una variedad de problemas de ingeniería en aplicaciones multimedia y/o de RV, como por ejemplo: el control, la dirección, la vigilancia, el acceso u otras tareas de evaluación- sin mencionar el entrenamiento, la educación y el entretenimiento.

La visión no se tocó explícitamente, sino que la mayoría de las veces se omitió en este proyecto por las dos razones siguientes: por razones de dominación sensorial del sujeto, las señales visuales pueden provocar la distracción y efectos de enmascaramiento. Esto afectaría el análisis selectivo de las modalidades auditivas/táctiles. Además, existen muchas posibilidades de aplicación en la tecnología de la información para sistemas directos de realidad virtual auditivos/táctiles, p. ej., en situaciones donde los ojos están ocupados o donde la visión está impedida, dañada o no disponible en absoluto. Esto se aplica sobre todo a las llamadas “realidades aumentadas” donde, p. ej., pueden presentarse auditivamente señales de advertencia o parámetros de control en un avión para aliviar el canal sensorial visual del piloto. No obstante, se proporciona una realimentación visual simple para fines de supervisión y verificación del software y, debido a la estructura modular del sistema, se podrían conectar fácilmente visores binoculares.

La arquitectura del sistema SCATIS VE (denominado laboratorio SCAT) fue diseñada de una manera jerárquica y modular para proporcionar la mayor flexibilidad posible con respecto al hardware a usar y ampliar el sistema en el futuro.

La estructura modular aparece representada en la Figura 6. Todos los componentes importantes del laboratorio SCAT fueron ejecutados como procesos UNIX separados que pueden distribuirse deliberadamente entre una red de puestos de trabajo. La comunicación entre estos procesos es proporcionada por el Controlador Central vía un número cuidadosamente diseñado de mensajes (sucesos). Con este fin se llevó a cabo una arquitectura servidor/cliente, siendo el Controlador Central el único cliente y siendo todos los otros módulos procesos del servidor. Esta arquitectura permite al Controlador Central controlar las secuencias temporales y la sincronización de los procesos conectados. Esto es vital para una emisión congruente de todas las modalidades dirigidas. El comportamiento servidor/cliente es forzado explícitamente por el protocolo del software. La posición y la orientación de la cabeza y de la mano son frecuentemente medidas por el hardware que detecta la posición, basado en campos electromagnéticos modulados, mientras que la configuración de los dedos de la mano es detectada por un guante sensorizado equipado con sensores cinestéticos que miden los movimientos de las articulaciones de todos los dedos en la mano derecha. Las medidas de la posición, la orientación y los datos del ángulo adquiridos por estos dos dispositivos pasan a los Detectores de movimiento de la Cabeza y Mano un proceso que computa la posición real y la orientación de cada articulación individual del dedo, transforma todos este datos en el sistema de coordenadas global y envía los datos para un acceso inmediato al Controlador Central.

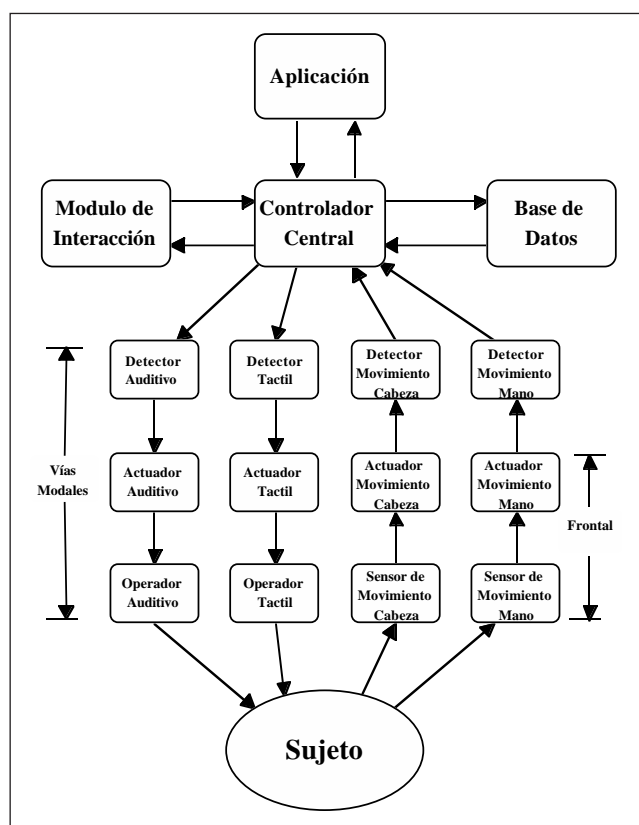


Figura 6.- La arquitectura del generador de realidad virtual del laboratorio SCAT.

El Controlador Central forma la unión entre los Detectores de Movimiento de Cabeza y Mano eferentes, el Módulo de Interacción y los detectores aferentes de las vías modales (Téngase en cuenta que “aferente” denota un flujo de información desde el Controlador Central al Sujeto y “eferente” viceversa). Admite sucesos de movimiento del detector eferente y del Módulo de Interacción, los evalúa según las reglas implementadas por la Aplicación y reacciona enviando impulsos apropiados resultantes de la evaluación a los detectores aferentes. Estas reglas constituyen la dinámica del protocolo de una aplicación del entorno virtual. Por ejemplo, en una aplicación multimodal, el Controlador Central podría aconsejar al Detector Auditivo apagar el sonido de un objeto sonoro después de que haya sido captado en el mundo virtual.

El propósito del Módulo de Interacción es modelar la interacción entre la mano y un objeto virtual. Esta tarea incluye detectar el asimiento y la suelta de un objeto y definir cómo un objeto asido se mueve cuando lo hace la mano. La tarea de los detectores aferentes es la de detectar el mundo virtual para el sentido humano a que se dedica en concreto. En el laboratorio SCAT son modalidades auditivas y táctiles. Las funciones de detección se distribuyen entre varios módulos que pueden describirse brevemente como sigue: El Detector Táctil detecta intersecciones entre la mano y otros objetos virtuales activos, calcula los valores de la excitación adecuada para los operadores táctiles, y transmite estos valores al Actuador Táctil.

El Actuador Táctil une el Detector Táctil con los operadores táctiles, es decir, transforma los datos recibidos en órdenes de hardware e implementa el protocolo de comunicación según el cual estas órdenes se transmiten a los operadores táctiles vía un interfaz serie. El operador táctil consiste en una tarjeta de ruta y 3 unidades actuadoras táctiles termales. Cada unidad incorpora 16 contactos movidos electromagnéticamente para la realimentación táctil y una célula Peltier para actuar la realimentación termal. El calor de la muñeca es extraído por un sistema de refrigeración de aire comprimido.

El Detector auditivo lleva a cabo el modelado del campo sonoro calculando la distribución de las fuentes sonoras secundarias. Esto depende de las posiciones actuales y de las orientaciones de la cabeza y de las fuentes sonoras dentro del entorno virtual. Determina el tiempo de retardo, las direcciones de emisión e incidencia y la función de transferencia relacionada con la cabeza (HRTF) para cada fuente sonora directa y, además, los filtros de la reflexión de la pared para cada reflexión temprana. Este dato se transmite frecuentemente al Actuador Auditivo.

La tarea del Actuador Auditivo consiste en auralizar las diferentes fuentes sonoras y reflexiones retardando las señales de entrada de audio y convolucionándolas con las respuestas impulsivas adecuadas relacionadas con la pared y la cabeza. Finalmente, las señales filtradas se suman y se ecualizan para las funciones de transferencia de los auriculares utilizados. De aquí se obtiene la señal de salida binaural. Para más detalles, remitirse a la sección 3.2. del hardware.

El Detector Visual (que no aparece en la Figura 6), en su estado actual, está pensado meramente para proporcionar una idea del escenario virtual y para verificar el comportamiento congruente de los detectores asignados a las diferentes modalidades.

Durante la fase de iniciación, cada detector prepara una base de datos interna analizando un archivo que contiene una descripción completa de todos los objetos que constituyen el mundo virtual. Esta base de datos puede personalizarse en función de las necesidades del detector en particular. El Detector Auditivo, por ejemplo, está muy interesado en las posiciones espaciales de la cabeza y de los objetos reflectantes que emiten ruido, en tanto que la configuración de la mano es de menor interés. Es más, cada detector aferente guarda bases de datos locales adicionales que contienen información que no interfiere con los demás ámbitos del detector. La base de datos común sólo se refiere a estas bases de datos locales por identificaciones de sus entradas, para mantener el consumo de memoria global a un nivel razonable. El Detector Táctil, p. ej., mantiene una base de datos que contiene los atributos de los materiales de la superficie involucrados y el Detector Auditivo necesita información sobre la directividad de las fuentes sonoras y sobre las propiedades reflectantes de los materiales de la pared.

Se dedicaron dos estaciones de trabajo de UNIX (16 MFlops, 85 Mips), conectadas vía ethernet, para ejecutar todos los procesos anteriormente mencionados. Se puede llegar a la utilización óptima de las capacidades de la CPU distribuyendo de manera apropiada los procesos entre ellos. Si es necesario, se pueden incorporar estaciones de trabajo adicionales en la simulación para aumentar la actuación global del sistema VE.

Esta actuación puede evaluarse en parte haciendo uso de dos magnitudes características, a saber, la velocidad estructural (o velocidad actualizada) y el período de latencia (también denominado intervalo de tiempo). De acuerdo con la ANSI/IEEE Std 1001977, el período de latencia se define normalmente como el tiempo que transcurre entre la aplicación de un estímulo y la primera indicación de una respuesta. Responde a la sensibilidad de atributo perceptual, mientras que el atributo suavidad puede asignarse a la velocidad estructural. La velocidad estructural es el número promediado de actualizaciones discretas del dispositivo que pueden detectarse por intervalo de tiempo. Un objetivo de las actividades de investigación con el laboratorio SCAT era el de encontrar los umbrales perceptuales de estas magnitudes. Informaremos en un futuro próximo sobre los resultados de la evaluación (Sahrhage et al. 1997).

4. Auralización en tiempo real

Auralizar una realidad virtual interactiva en sincronía con las acciones del oyente y con las variaciones del entorno convolucionando las señales de audio asignadas a las fuentes sonoras con las respuestas impulsivas binaurales de salas actualmente válidas requiere una cantidad enorme de potencia de cálculo que no puede llevarse a cabo razonablemente en tiempo real sin la simplificación adecuada (Shinn Cunningham. et al. 1996).

La exacta auralización puede restringirse a reflexiones de primer y segundo orden porque las reflexiones de un orden superior apenas pueden percibirse separadamente. Estas reflexiones pueden modelarse con algoritmos de reverberación convencionales que sólo tienen en cuenta propiedades estadísticas de las últimas reflexiones. El sonido directo y las reflexiones de primer/segundo orden pueden ser auralizadas en tiempo real distribuyendo las fuentes sonoras virtuales correspondientes entre una red de varios procesadores de señales digitales (DSPs) donde cada fuente virtual es auralizada separadamente convolucionando la correspondiente señal de entrada con el respectivo conjunto de filtros y retardándolo adecuadamente.

En el ámbito de trabajo del laboratorio SCAT, la auralización en tiempo real se realizó mediante una red consistente en 40 procesadores de señal Motorola DSP56002 que proporcionan una potencia de cálculo de pico global de 800 millones de multiplicaciones por segundo. Esto es suficiente para auralizar un total de 32 fuentes sonoras primarias y reflexiones de primer hasta segundo orden en tiempo real a una velocidad de muestreo de 48kHz.

5. Conclusión

La Simulación de Salas Binaural y la Realidad Virtual Auditiva son dos aplicaciones ejemplares de la "tecnología binaural", una tecnología que ofrece un gran potencial a las tecnologías de la comunicación.

Las aplicaciones posteriores evolucionarán pronto según vaya disminuyendo el coste computacional debido al futuro desarrollo de la microelectrónica.

Referencias

Allen, J. B. & Berkley D. A. (1979). *Image method for efficiently simulating smallroom acoustics*. J. acoust. Soc. Amer. 65(4), 943950.

Begault, D. R. (1994). *3D sound for virtual reality and multimedia*. AP Professional, Cambridge MA.

Blauert, J. (1996a). *An introduction to binaural technology*. In: *Binaural and spatial hearing in real and virtual Environments*. J. H. Gilkey & T. B. Anderson (eds.). Lawrence Erlbaum Ass.,

Blauert, J. (1996). *Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization, 2nd, revised edition*. MIT Press, Cambridge MA.

Blauert, J. & Lehnert, H. (1995). *The auditory representation in virtual reality*. Proc. int. conf. acoust., ICA'95 (vol. III), Trondheim, 207210.

Blauert, J. & Strauss, H. (1995). *Binaural technology and virtual reality*, Proc. 2nd. Int. Conf. Acoust. Music. íes., CIAiM'95, Ferrara, 310.

- Gilkey, R. & Anderson, T., eds. (1997). *Binaural and spatial hearing in real and virtual environments*. Lawrence Erlbaum, Hillsdale NJ.
- Giron, F. (1993). *Die Monopolsynthese als parametrisches Modell der Richtcharakteristik [The monopole synthesis as a parametric model for directivity characteristics]*. Fortsch. Akustik, DAGA'93 (Part A). Deutsch. Ges. Akust., Oldenburg, 283286.
- Hammershoei, D. & Sandvad, J. (1994). *Binaural Auralization: Simulating free field conditions by headphones*. 96th AES Convention, Amsterdam, preprint #3863.
- Hartung, K. (1995). *Messung, Verifikation und Analyse von Aussenohruebertragungsfunktionen. [Measurement, verification and analysis of HRTFs]*. Fortsch. Akustik, DAGA'95. Deutsch. Ges. Akust., Oldenburg, 755758.
- Hartung, K. & Raab, A. (1996). *Efficient modelling of headrelated transfer functions*. ACUSTICA/acta acustica 1, 88.
- Lehnert, H. & Blauert, J. (1989). *A concept for binaural room simulation*. IEEE worksh. applic. signal processing to audio and acoustics, New Paltz NY.
- Lehnert, H. (1992). *Binaurale Raumsimulation: Ein Computermodell zur Erzeugung virtueller auditiver Umgebungen [Binaural room simulation: A computer model for generating virtual auditory environments]*. C. Shaker, Aachen.
- Lehnert, H. & Giron F. (1995). *Vocal communication in virtual environments*. Virtual Reality World '95, Mecklermedia, London, 273279.
- Lehnert, H. & Richter, M. (1995). *Auditory virtual environments: simplified treatment of reflections*. Proc. 15th int. Congr. acoust., ICA'95, Trondheim, 265268.
- Moeller, H., Hammershoei, D. & Jensen, C. B. (1995). *Headrelated transfer functions of human subjects*. J. Audio Eng. Soc., 43(5), 300321.
- Pompetzki, W. & Blauert, J. (1994). *A Study on the perceptual authenticity of binaural room simulation*. WallaceClementSabine Centennial Symp. Acoust. Soc. Am., Cambridge MA, 8184
- Sahrhage, J., Blauert, J. & Lehnert, H. (1996), *Implementation of an auditory/tactile virtual environment*, Proc. 2nd FIVE Int. Conf. on advances, applications & impact of immersive virtual environments, 1826, PERCRO, Pisa, (revised version to be submitted to PRESENCE)
- ShinnCunningham, B. G., Lehnert, H., Kramer, G., Wenzel, E. M. & Durlach, N.I. (1996). *Auditory displays*. In: *Binaural and spatial hearing in real and virtual environments*, R. H. Gilkey & T. B. Anderson (eds.). Lawrence Erlbaum Ass. 611664.