

SISTEMAS DE MEDICIÓN DE HRTF INDIVIDUALES: REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE Y DESARROLLOS EN ARGENTINA

INDIVIDUAL HRTF MEASUREMENT SYSTEMS: A REVIEW OF THE STATE OF THE ART AND DEVELOPMENTS IN ARGENTINA

R. Martín Guido^a, Martín A. Pucheta^b, Fabián C. Tommasini^a, Ramiro O. Vergara^c y Fermín Scaliti^a

^a*Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), CONICET, Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Córdoba, Córdoba, Argentina. rguido@frc.utn.edu.ar*

^b*Centro de Investigación en Informática para la Ingeniería (CIII), Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Córdoba, Córdoba, Argentina.*

^c*Laboratorio de Acústica y Percepción Sonora (LAPSo), Escuela Universitaria de Artes, Universidad Nacional de Quilmes, Bernal, Buenos Aires, Argentina.*

Palabras clave: HRTF, Sistema de medición, Tecnología binaural, Audio 3D

Resumen. En los últimos años, una gran cantidad de aplicaciones basadas en tecnología binaural han ganado popularidad, principalmente en las áreas de realidad virtual, mixta o aumentada. Las mismas simulan la ubicación espacial de la fuente utilizando funciones de transferencia de cabeza (HRTFs). Estas HRTFs contienen todas las claves auditivas para lograr una reproducción de audio 3D, y se obtienen generalmente de cabezas artificiales estandarizadas. Se ha demostrado que el uso de HRTFs individuales –medidas al propio individuo que luego las utilizará– genera beneficios sustanciales en la localización de sonidos en el espacio sin ayuda visual. El factor limitante en el uso generalizado de HRTFs individuales es la difícil adquisición de dichos datos, a partir de complejos y costosos sistemas de medición. En el presente trabajo se realiza una revisión del estado del arte de los principales sistemas de medición de HRTFs individuales a nivel mundial, como así también de los incipientes desarrollos en Argentina.

Keywords: HRTF, Measurement system, Binaural technology, 3D audio

Abstract. In recent years, a large number of applications based on binaural technology have gained popularity, mainly in the areas of virtual, mixed or augmented reality. These applications simulate the spatial location of a sound source by means of head-related transfer functions (HRTFs). These HRTFs contain all the auditory cues to achieve a reproduction of 3D audio, and are usually obtained from standardized dummy heads. It has been shown that the use of individual HRTFs –measures to the person who will then use them– generates substantial benefits in the spatial localization of sounds without visual cues. The limiting factor in the widespread use of individual HRTFs is the difficult acquisition of such data, from complex and expensive measurement systems. In the present study, a review of the state of the art of the main measurement systems of individual HRTFs available worldwide is carried out, as well as the emerging developments in Argentina.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, una gran cantidad de aplicaciones basadas en tecnología binaural han ganado popularidad, principalmente en las áreas de realidad virtual, mixta o aumentada (Lentz et al., 2007; Brinkmann et al., 2017; Berger et al., 2018; Tommasini et al., 2019). Se denomina tecnología binaural al conjunto de técnicas de grabación, almacenado y/o reproducción de dos señales sonoras de manera que provean una impresión espacial tridimensional al ser escuchadas por un oyente (Paul, 2009). Es decir, permiten crear una imagen auditiva virtual de una fuente sonora real cuando son reproducidas mediante auriculares. Específicamente, estas aplicaciones simulan la ubicación de una fuente sonora mediante la utilización de funciones de transferencia de cabeza (head-related transfer functions, HRTFs). Las HRTFs capturan todas las claves que una persona utiliza para la localización espacial de una fuente, las cuales son creadas por la dispersión que la onda sonora produce al incidir en el cuerpo humano, especialmente en la cabeza y los pabellones auriculares.

Estas funciones juegan un rol central en los sistemas de espacialización de audio en 3D, efecto que se consigue filtrando una señal monoaural anecoica (libre de reflexiones) con un par de filtros de las HRTFs correspondientes a la ubicación real (Møller, 1992). La señal binaural reproducida contendrá toda la información necesaria para que el oyente escuche una fuente virtual que parece provenir del lugar donde se encontraba la fuente real (Kleiner et al., 1993; Middlebrooks, 1999; Wightman y Kistler, 1989).

Sin embargo, es importante notar que los indicios involucrados en la localización auditiva de la audición binaural no sólo dependen de la ubicación de la fuente sonora, sino también de las características antropométricas de cada oyente. Individuos diferentes producirán transformaciones diferentes sobre las ondas sonoras, debido a sus diferencias antropométricas. En definitiva, para que un sujeto experimente una auténtica percepción auditiva del espacio, debe escuchar sonidos filtrados con un conjunto de HRTFs propias, es decir, individuales (Morimoto y Ando, 1980). Se ha demostrado que el uso de HRTFs individuales (medidas al propio sujeto que luego las utilizará) para simular fuentes sonoras virtuales hace que estas sean indistinguibles de las fuentes reales (Hartmann y Wittenberg, 1996; Langendijk y Bronkhorst, 2000; Zotkin et al., 2006; Kulkarni y Colburn, 1998), mejorando la localización sonora en el espacio sin ayuda visual. En cambio, el uso de un conjunto de HRTFs no individuales (obtenidas de cabezas artificiales estandarizadas o de otras personas) suele producir serias distorsiones perceptuales (confusiones delante-detrás y errores en elevación) (Wenzel et al., 1993).

La adquisición rápida de un conjunto espacialmente denso de HRTFs para una persona no es una tarea sencilla. Es necesario el uso de complejos y costosos sistemas de medición. Este posiblemente sea uno de los principales factores limitantes en el uso generalizado de HRTFs individuales en las aplicaciones de tecnología binaural hoy en día.

En este trabajo se realiza una revisión del estado del arte de los principales sistemas de medición rápidos de HRTFs individuales disponibles en diferentes centros de investigación de acústica a nivel mundial. Se hace una comparativa de aquellos sistemas que han sido referenciados en los últimos años en la literatura científica internacional. Por último, se presenta un incipiente desarrollo de este tipo de tecnología de medición en Argentina.

2. SISTEMAS DE MEDICIÓN DE HRTFS INDIVIDUALES

2.1. Procedimiento de medición

El típico procedimiento de medición de HRTFs sigue la definición de campo libre dada por Blauert (1997). Básicamente, se realiza entre una fuente sonora y ambas orejas del oyente

bajo los supuestos de un sistema lineal e invariante en el tiempo, utilizando un recinto libre (o parcialmente libre) de reflexiones acústicas, conocido como cámara anecoica (o semi-anecoica).

Entre los métodos existentes, el procedimiento de medición directo es el más preciso y con mayor desarrollo. En el mismo, como receptor se utilizan micrófonos omnidireccionales miniatura colocados a la entrada del conducto auditivo abierto o bloqueado (Fig. 1); y como fuente sonora se utiliza un altavoz. Es posible usar cualquier señal típica de medición para medir la función de transferencia, como secuencias de máxima longitud (Rife y Vanderkooy, 1989), barrido senoidal lineal o exponencial (Farina, 2000; Müller y Massarani, 2001) y códigos de Golay (Foster, 1986; Tommasini et al., 2018). Luego de una medición el sujeto (o el altavoz) es reposicionado y se mide la HRTF de la nueva dirección.



Figura 1: Micrófonos colocados a la entrada del conducto auditivo abierto (izquierda) o bloqueado (derecha).
Extraído de Richter (2019).

Además, se debe realizar una medición de referencia sin el sujeto. Durante el postprocesamiento, todas las mediciones son divididas por esta referencia en el dominio de la frecuencia. De esta manera se eliminan la influencia de la respuesta del micrófono y de los altavoces, como también las reflexiones que se producen en los aparatos y en la sala (Andreopoulou et al., 2015).

Como resultado se obtiene un conjunto de HRTFs (conjunto de pares de filtros para oído izquierdo y oído derecho). Cada HRTF contiene entonces la información de la ubicación de la fuente sonora y de las características antropométricas propias del sujeto al cual se le realizó la medición.

Sin embargo, en un sistema de medición de HRTFs individuales es necesario considerar otros factores que pueden afectar la medición, como la cantidad de repeticiones en cada medición, el aislamiento acústico de la sala, el número de altavoces del sistema, la densidad del muestreo espacial del conjunto de HRTFs, y la calidad del equipamiento utilizado, entre otros. La influencia de los mismos se puede observar en la relación señal-ruido obtenida, la protección contra valores atípicos y mediciones incorrectas, la cantidad de reflexiones en el resultado de la medición, el tiempo total de medición y el costo del sistema de medición (Zotkin et al., 2006).

2.2. Hacia los sistemas de medición rápidos

Para obtener un registro denso de muestreo del espacio sonoro (esfera alrededor de la cabeza), es necesario realizar un gran número de mediciones con la fuente sonora ubicada en diferentes ángulos, tanto de azimut como de elevación.

En los primeros sistemas sólo se utilizaba un altavoz para realizar las mediciones, lo cual hacía que las sesiones sean muy prolongadas (muchas horas) (Searle et al., 1975; Mehrgardt y Mellert, 1977). Como las personas tienen dificultades para mantener inmóvil su cuerpo, y especialmente su cabeza, durante un período largo de tiempo, se generaban errores en las mediciones debido a movimientos indeseados (Masiero, 2012).

Posteriormente, se siguió utilizando un sólo altavoz para algunos sistemas más recientes (Nakado et al., 2008; Jin et al., 2014), pero se comenzó a evaluar la necesidad de reducir los tiempos de medición debido a la fatiga de los sujetos. En busca de reducir los tiempos de medición y los errores asociados, se construyeron sistemas con varios altavoces implementando diferentes estrategias (Algazi et al., 2001; Majdak et al., 2007). Las formas que siguieron para poder adquirir las HRTFs de múltiples direcciones fue a partir de una esfera de altavoces sin necesidad de reposicionamiento (Morimoto y Ando, 1980; Oberem et al., 2016), de un arco de altavoces usando la rotación del sujeto (Møller et al., 1995), o bien la rotación propia del conjunto de altavoces (Bronkhorst, 1995; Wightman y Kistler, 1989; Middlebrooks, 1999; Langendijk y Bronkhorst, 1999). Aunque algunos desarrollos luego fueron patentados (Duraishwami y Gumerov, 2010) o discontinuados (Anderson et al., 2006), y no se conocen usos científicos recientes.

Además, en los últimos años, también han cobrado importancia otros intentos para mejorar la eficiencia del método de medición con el objetivo de minimizar el tiempo de sesión para el individuo, sin comprometer la resolución espacial. Entre estas estrategias se encuentran el método de medición mediante reciprocidad (Zotkin et al., 2006), el método de barrido exponencial múltiple (multiple exponential sweep method, MESM) (Majdak et al., 2007) y el método de medición continuo (Fukudome et al., 2007; Richter, 2019).

2.3. Comparativa de sistemas actuales

A modo comparativo, se listan en la Tabla 1 los principales sistemas rápidos de medición de HRTFs más recientes que se conocen en la literatura científica. Además de la institución de origen, se detalla la cantidad de puntos que está capacitado para medir, la resolución en azimut y en elevación, la distancia a la que se encuentran los parlantes de la cabeza del sujeto, y el tiempo de medición.

Los mismos fueron seleccionados de acuerdo al siguiente criterio de: a) configuración de medición multicanal, b) existencia de posiciones de medición dentro del rango $\pm 30^\circ$ en elevación, c) resolución de azimut mínima de 10° , y d) existencia de mediciones sobre el plano horizontal (elevación = 0°).

Se puede observar que existen variaciones con respecto a la resolución y densidad espacial, variando entre 648 y 11950 puntos de medición. Además, debido a las diferentes definiciones de grilla, es conveniente notar que poseen pocos puntos en común entre ellos. En la Fig. 2 se pueden observar imágenes de las configuraciones y del diseño de cada uno.

3. DESARROLLOS EN ARGENTINA

Como se pudo observar, los centros de investigación en acústica que cuentan con sistemas de medición de HRTFs individuales se encuentran en Asia, en Europa y en Estados Unidos. Hasta donde se ha podido indagar no existen desarrollos de este tipo de tecnología de medición en Argentina, ni en Latinoamérica.

Desde hace algunos años, en el CINTRA, CONICET, UTN - FRC, Argentina, se han realizado avances hacia la construcción de un sistema de medición de HRTFs individuales. En el año 2016 se presentó un primer prototipo que contaba con un único altavoz, una baja resolución espacial y un tiempo de medición prolongado (Tommasini et al., 2016). Desde entonces, se comenzó con una reconceptualización del mismo basado en el sistema publicado por Richter et al. (2016).

El nuevo diseño, que se encuentra en las fases finales de desarrollo, contará de un arreglo móvil de hasta 32 parlantes (con cajas realizadas a medida y altavoces AuraSound NSW1-205-



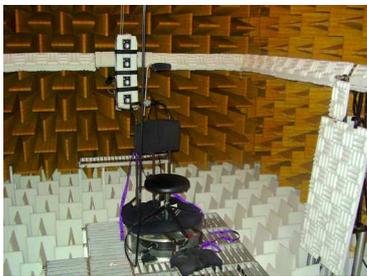
(a) Brinkmann et al. (2013)



(b) Majdak et al. (2013)



(c) Watanabe et al. (2014)



(d) Carpentier et al. (2014)



(e) Richter et al. (2016)



(f) Sridhar et al. (2017)



(g) Yu et al. (2018)

Figura 2: Imágenes de sistemas de medición de HRTFs individuales.

Referencia	Institución	Año	#	Azimut	Elevación	Distancia	Parlantes	Tiempo
Brinkmann et al. (2013)	Audio Communication Group, TU Berlin, Alemania	2013	11950	$\Delta 2^\circ$	$-64:2:90^\circ$	1.7 m	2	(sin especificar)
Majdak et al. (2013)	ARI, Austrian Academy of Sciences, Austria	2013	1550	$\Delta 2.5^\circ$	$-30:5/10:86^\circ$	1.2 m	22	20 min
Watanabe et al. (2014)	RIEC, Tohoku Universit, Japón	2014	865	$\Delta 5^\circ$	$-30:10:90^\circ$	1.5 m	35	1–1.5 h
Carpentier et al. (2014)	IRCAM, Francia	2014	1680	$\Delta 6^\circ$	$-39:3/6:86^\circ$	1.95 m	4	1.5 h
Richter et al. (2016)	ITA, RWTH Aachen University, Alemania	2016	Hasta 9216	$\Delta 2.5^\circ$ (posibilidad de rotación continua)	$-70:2.52:88.75^\circ$	1.2 m	64	3.3–7 min
Sridhar et al. (2017)	3D Audio and Applied Acoustics Laboratory, Princeton University, USA	2017	648	$\Delta 5^\circ$	-57° & $-30:15:75^\circ$	0.76 m	9	11 min
Yu et al. (2018)	Acoustic Laboratory, South China University of Technology, China	2018	Hasta 865	$\Delta 5^\circ$	$-30:10:80^\circ$	0.2–1 m	30	20–30 min

Tabla 1: Tabla comparativa de sistemas de medición rápidos de HRTFs individuales (# significa cantidad de puntos de medición).

8A de 1" de rango extendido) ubicados en un arco semicircular de 150° con un radio de 1.1 m centrado en la cabeza de un oyente, a lo largo del plano vertical. Los altavoces seleccionados son de tamaño reducido para acercarse a lo que se conoce como fuente sonora puntual, a la vez que poseen una respuesta en frecuencia relativamente plana en el rango de interés (variación ± 4 dB entre 200-20000 Hz). El oyente se ubicará sentado sobre una plataforma rotativa ([Ferreyra et al., 2019](#)) en el centro del arco, la cual girará en el plano horizontal para lograr una grilla densa de prácticamente toda la esfera alrededor de la cabeza.

Para el sistema de control de altavoces se está construyendo un amplificador de audio multi-canal con control de salidas. Debido que la señal de estímulo provendrá de la interfaz de audio profesional de 4 salidas, será necesario demultiplexar de forma controlada mediante software 4 señales de audio analógicas a 32 salidas para los parlantes. La etapa de potencia de este dispositivo utilizará un amplificador clase D por cada salida.

De esta manera, será posible realizar mediciones con una alta resolución y en un corto período de tiempo. Las posiciones de medición variarán de -180° (hemisferio izquierdo del oyente) a $+180^\circ$ (hemisferio derecho) en el plano horizontal con una resolución entre 2.5° y 5° ; y desde -60° (por debajo) a $+90^\circ$ (por arriba) en el plano vertical, con una resolución entre 2° y 9° .

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó una revisión de los principales sistemas de medición de HRTFs individuales. Se hizo una comparativa de los sistemas de medición rápidos surgidos en los últimos años, los cuales tienen en cuenta algunas estrategias para minimizar el tiempo de medición, como son el uso de una gran cantidad de altavoces, la rotación continua de la base giratoria y métodos de procesamiento de señales más avanzados, como el método de barrido exponencial múltiple. Además, se resaltó la complejidad que representa adquirir una esfera completa de mediciones para una persona en un tiempo razonable, como así también su costo potencial.

Es importante notar que todos los desarrollos son configuraciones ad-hoc y fueron adaptados

según las necesidades y posibilidades de cada centro de investigación, por lo tanto una comparación exhaustiva y directa no es posible. Por último, se presentó un primer desarrollo incipiente en Argentina y Latinoamérica para la medición de estas funciones de transferencia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a Juan Cruz Bordón por su colaboración. Este trabajo fue financiado por subsidios de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, Argentina (PICT 2016-0738); el Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Provincia de Córdoba, Argentina (GRFT 2017 Nro. 52); y la Universidad Tecnológica Nacional, Argentina (PID UTN4498).

REFERENCIAS

- Algazi V.R., Duda R.O., Thompson D.M., y Avendano C. The CIPIC HRTF database. En *Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, 2001 IEEE Workshop on the*, páginas 99–102. IEEE, New Platz, NY, USA, 2001. doi:10.1109/ASPAA.2001.969552.
- Anderson M., Begault D., Godfroy M., Miller J.D., Roginska A., y Wenzel E. Design and Verification of HeadZap, a Semi-automated HRIR Measurement System. Audio Engineering Society, 2006.
- Andreopoulou A., Begault D.R., y Katz B.F.G. Inter-Laboratory Round Robin HRTF Measurement Comparison. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 9(5):895–906, 2015. ISSN 1932-4553. doi:10.1109/JSTSP.2015.2400417.
- Berger C.C., Gonzalez-Franco M., Tajadura-Jiménez A., Florencio D., y Zhang Z. Generic HRTFs May be Good Enough in Virtual Reality. Improving Source Localization through Cross-Modal Plasticity. *Frontiers in Neuroscience*, 12, 2018. ISSN 1662-453X. doi:10.3389/fnins.2018.00021.
- Blauert J. *Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization*. MIT Press, Cambridge, MA, 1997. ISBN 9780262024136.
- Brinkmann F., Lindau A., y Weinzierl S. On the authenticity of individual dynamic binaural synthesis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 142(4):1784–1795, 2017. ISSN 0001-4966. doi:10.1121/1.5005606.
- Brinkmann F., Lindau A., Weinzierl S., Geissler G., y van de Par S. A high resolution head-related transfer function database including different orientations of head above the torso. En *Proceedings of the AIA-DAGA 2013 Conference on Acoustics*. Merano, Italy, 2013.
- Bronkhorst A.W. Localization of real and virtual sound sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 98(5):2542–2553, 1995. ISSN 0001-4966. doi:10.1121/1.413219.
- Carpentier T., Bahu H., Noisternig M., y Warusfel O. Measurement of a head-related transfer function database with high spatial resolution. En *Forum Acusticum*. Krakow, Poland, 2014.
- Duraiswami R. y Gumerov N.A. Method for measurement of head related transfer functions. 2010.
- Farina A. Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-Sine Technique. En *Audio Engineering Society Convention 108*. Audio Engineering Society, Paris, France, 2000.
- Ferreya S.P., Tommasini F.C., Cravero G.A., López J.F., Moreno A.M., Bertinatti A.J., y Vicente F. Validación de posicionamiento angular de plataforma rotativa para mediciones de respuesta impulsiva relativa a cabeza y torso. En *V Jornadas de Acústica, Audio y Sonido (JAAS 2019)*. Buenos Aires, Argentina, 2019.

- Foster S. Impulse response measurement using Golay codes. En *Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP '86.*, volumen 11, páginas 929–932. 1986. doi:10.1109/ICASSP.1986.1168980.
- Fukudome K., Suetsugu T., Ueshin T., Idegami R., y Takeya K. The fast measurement of head related impulse responses for all azimuthal directions using the continuous measurement method with a servo-swiveled chair. *Applied Acoustics*, 68(8):864–884, 2007. ISSN 0003-682X. doi:10.1016/j.apacoust.2006.09.009.
- Hartmann W.M. y Wittenberg A. On the externalization of sound images. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 99(6):3678–3688, 1996. ISSN 0001-4966. doi:10.1121/1.414965.
- Jin C.T., Guillon P., Epain N., Zolfaghari R., Schaik A.v., Tew A.I., Hetherington C., y Thorpe J. Creating the Sydney York Morphological and Acoustic Recordings of Ears Database. *IEEE Transactions on Multimedia*, 16(1):37–46, 2014. ISSN 1520-9210. doi:10.1109/TMM.2013.2282134.
- Kleiner M., Dalenbäck B.I., y Svensson U.P. Auralization-an overview. *Journal of the Audio Engineering Society*, 41(11):861–875, 1993.
- Kulkarni A. y Colburn H.S. Role of spectral detail in sound-source localization. *Nature*, 396(6713):747, 1998. ISSN 1476-4687. doi:10.1038/25526.
- Langendijk E.H.A. y Bronkhorst A.W. Fidelity of three-dimensional-sound reproduction using a virtual auditory display. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107(1):528–537, 1999. ISSN 0001-4966. doi:10.1121/1.428321.
- Langendijk E.H.A. y Bronkhorst A.W. Fidelity of three-dimensional-sound reproduction using a virtual auditory display. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107(1):528–537, 2000. ISSN 00014966. doi:10.1121/1.428321.
- Lentz T., Schröder D., Vorländer M., y Assenmacher I. Virtual reality system with integrated sound field simulation and reproduction. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2007:1–17, 2007.
- Majdak P., Balazs P., y Laback B. Multiple Exponential Sweep Method for Fast Measurement of Head-Related Transfer Functions. *Journal of the Audio Engineering Society*, 55(7/8):623–637, 2007.
- Majdak P., Masiero B., y Fels J. Sound localization in individualized and non-individualized crosstalk cancellation systems. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(4):2055–2068, 2013. ISSN 0001-4966. doi:10.1121/1.4792355.
- Masiero B. *Individualized binaural technology: measurement, equalization and perceptual evaluation*. Doctoral thesis, RWTH Aachen University, Aachen, Germany, 2012.
- Mehrgardt S. y Mellert V. Transformation characteristics of the external human ear. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 61(6):1567–1576, 1977. ISSN 0001-4966. doi:10.1121/1.381470.
- Middlebrooks J.C. Virtual localization improved by scaling nonindividualized external-ear transfer functions in frequency. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106(3):1493–1510, 1999. doi:10.1121/1.427147.
- Morimoto M. y Ando Y. On the simulation of sound localization. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 1(3):167–174, 1980. doi:10.1250/ast.1.167.
- Møller H. Fundamentals of binaural technology. *Applied Acoustics*, 36(3):171–218, 1992. ISSN 0003-682X. doi:10.1016/0003-682X(92)90046-U.
- Møller H., Sørensen M.F., Hammershøi D., y Jensen C.B. Head-Related Transfer Functions of Human Subjects. *Journal of the Audio Engineering Society*, 43(5):300–321, 1995.

- Müller S. y Massarani P. Transfer-Function Measurement with Sweeps. *Journal of the Audio Engineering Society*, 49(6):443–471, 2001.
- Nakado T., Nishino T., y Takeda K. Measurements of head-related transfer function in sagittal and frontal coordinates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(5):3652–3652, 2008. ISSN 0001-4966. doi:10.1121/1.2934948.
- Oberem J., Masiero B., y Fels J. Experiments on authenticity and plausibility of binaural reproduction via headphones employing different recording methods. *Applied Acoustics*, 114(Supplement C):71–78, 2016. ISSN 0003-682X. doi:10.1016/j.apacoust.2016.07.009.
- Paul S. Binaural Recording Technology: A Historical Review and Possible Future Developments. *Acta Acustica united with Acustica*, 95(5):767–788, 2009. doi:10.3813/AAA.918208.
- Richter J.G. *Fast Measurement of Individual Head-Related Transfer Functions*. Logos Verlag Berlin GmbH, 2019. ISBN 978-3-8325-4906-0.
- Richter J.G., Behler G., y Fels J. Evaluation of a Fast HRTF Measurement System. *Audio Engineering Society*, 2016.
- Rife D.D. y Vanderkooy J. Transfer-function measurement with maximum-length sequences. *J. Audio Eng. Soc.*, 37(6):419–444, 1989.
- Searle C.L., Braida L.D., Cuddy D.R., y Davis M.F. Binaural pinna disparity: another auditory localization cue. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 57(2):448–455, 1975. ISSN 0001-4966. doi:10.1121/1.380442.
- Sridhar R., Tylka J.G., y Choueiri E. *A Database of Head-Related Transfer Functions and Morphological Measurements*. Audio Engineering Society, 2017.
- Tommasini F.C., Guido R.M., Ramos O.A., y Cravero G.A. Medición de respuestas impulsivas de cabeza individuales utilizando secuencias binarias de Golay. *Revista Tecnología Y Ciencia*, 31:143–154, 2018.
- Tommasini F.C., Guido R.M., Ramos O.A., Cravero G.A., Ferreyra S.P., y Pérez J. Individual head-related impulse response measurement system with 3d scanning of pinnae. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 28(1):055007, 2016. doi:10.1121/2.0000519.
- Tommasini F.C., Ramos O.A., Hüg M.X., y Ferreyra S.P. A Computational Model to Implement Binaural Synthesis in a Hard Real-Time Auditory Virtual Environment. *Acoustics Australia*, 47(1):51–66, 2019. ISSN 1839-2571. doi:10.1007/s40857-019-00152-7.
- Watanabe K., Iwaya Y., Suzuki Y., Takane S., y Sato S. Dataset of head-related transfer functions measured with a circular loudspeaker array. *Acoustical Science and Technology*, 35(3):159–165, 2014. doi:10.1250/ast.35.159.
- Wenzel E.M., Arruda M., Kistler D.J., y Wightman F.L. Localization using nonindividualized head-related transfer functions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 94(1):111–123, 1993. doi:10.1121/1.407089.
- Wightman F.L. y Kistler D.J. Headphone simulation of free-field listening. I: Stimulus synthesis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 85(2):858–867, 1989. ISSN 00014966. doi:10.1121/1.397557.
- Yu G., Wu R., Liu Y., y Xie B. Near-field head-related transfer-function measurement and database of human subjects. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 143(3):EL194–EL198, 2018. ISSN 0001-4966. doi:10.1121/1.5027019.
- Zotkin D.N., Duraiswami R., Grassi E., y Gumerov N.A. Fast head-related transfer function measurement via reciprocity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(4):2202–2215, 2006. ISSN 0001-4966. doi:10.1121/1.2207578.