

# TECNICHE DI GENERAZIONE DELLE HRTF PER LA RIPRODUZIONE BINAURALE

Valeria Bruschi, Nefeli Dourou, Alessandro Terenzi, Stefania Cecchi

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione (DII), Università Politecnica delle Marche,  
Via Brecce Bianche 60131, Ancona (AN)

Il modello matematico che descrive il percorso acustico tra una sorgente sonora e l'orecchio dell'ascoltatore è rappresentato dalla *head-related transfer function* (HRTF) nel dominio della frequenza e dalla *head-related impulse response* (HRIR) nel dominio temporale. Per ogni posizione  $(r, \theta, \varphi)$  della sorgente sonora, vengono definite due HRTF, una per l'orecchio sinistro e una per quello destro. Queste HRTF sono uniche per ogni individuo, poiché sono influenzate dalle riflessioni delle onde sonore sul corpo superiore, come la forma della testa, la geometria dei padiglioni auricolari e le dimensioni del torso, encapsulando tutti i segnali uditivi che il sistema percettivo utilizza per determinare direzione e distanza di una fonte sonora, inclusi differenze interaurali di tempo (ITD) e di livello (ILD), e spettrali.

Le caratteristiche delle HRTF permettono il loro utilizzo nello sviluppo di sistemi audio spaziali che possono quindi essere realizzati filtrando un segnale audio con delle specifiche HRTF. Riproducendo tramite delle cuffie i segnali ottenuti, l'ascoltatore percepisce la sorgente sonora come proveniente dalla posizione originale codificata nelle HRTF (sintesi binaurale). Le HRTF trovano applicazione anche nella riproduzione immersiva tramite altoparlanti, dove una rete di filtri, detta crosstalk canceller, è impiegata per mitigare gli effetti indesiderati dei segnali acustici percepiti da entrambe le orecchie. Tale sistema si basa sull'inversione di una matrice costituita dalle HRTF relative alla posizione dei due altoparlanti rispetto alle orecchie.

La generazione delle HRTF può essere fatta attraverso diversi metodi che possono essere raggruppati in 4 metodologie, mostrate in Figura 2: la misurazione diretta, la modellazione fisica, approcci antropometrici e morfologici e tecniche di interpolazione. Questi metodi sono stati ampiamente discussi ed analizzati in [1].

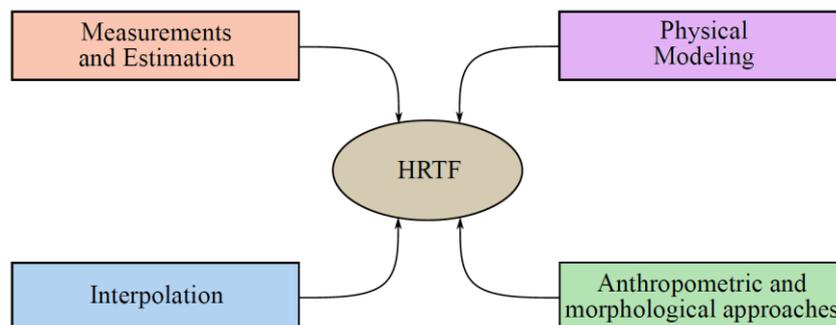


Figura 1: Schema delle metodologie di generazione delle HRTF

I manichini binaurali, ovvero manichini con sembianze umane dotati di due microfoni nella posizione delle orecchie, possono essere utilizzati per la misurazione delle HRTF. Queste misurazioni aiutano nell'analisi di aspetti importanti, come la risoluzione spaziale e la distanza dell'ascoltatore dal diffusore acustico. Tuttavia, la standardizzazione non coglie le differenze individuali tra le HRTF dovute alle differenze morfologiche di ogni essere umano. L'uso di microfoni intra-auricolari posizionati nel canale uditivo di soggetti reali può risolvere questo problema e permette di ottenere HRTF individuali (o personalizzate) [2].

Per quanto riguarda la modellazione fisica, essa si basa sul fatto che l'HRTF è una misura di un processo fisico, ovvero la dispersione di un'onda sonora da parte di un corpo rigido (la testa e il torso di un individuo) in un ambiente anecoico e illimitato. Questo processo è completamente governato dall'equazione delle onde con condizioni al contorno opportunamente scelte. Questo rende possibile generare HRTF attraverso una soluzione numerica di un problema matematico ben definito. Il metodo degli elementi di contorno (BEM) è uno degli approcci più popolari per la modellazione dei problemi di dispersione in acustica e molto utilizzato per la modellazione delle HRTF.

Gli approcci antropometrici si basano sull'idea che l'HRTF di un individuo sia influenzata dalle caratteristiche somatiche di alcune parti del corpo, come la dimensione e la forma del torso, della testa e del padiglione auricolare. Inoltre, l'uso dei dati antropometrici consente un approccio meno intrusivo e più scalabile, attraverso il quale possono essere derivate HRTF personalizzate.

Le tecniche di interpolazione sono essenziali per migliorare la fluidità e la continuità delle esperienze audio spaziali, soprattutto quando si tratta di dataset HRTF incompleti o sparsi. Diversi studi discutono dello sviluppo di algoritmi di interpolazione per migliorare l'accuratezza e le prestazioni delle HRTF. I metodi classici sono quelli basati sull'interpolazione dei punti vicini (nearest-neighbor) e si possono classificare in interpolazione lineare [3,4], bilineare, basata sulla vector-base amplitude panning (VBAP) e sulla inverse-distance weighting (IDW) [5]. Un esempio dei risultati ottenuti dalle diverse tecniche di interpolazione è mostrato in Figura 3.

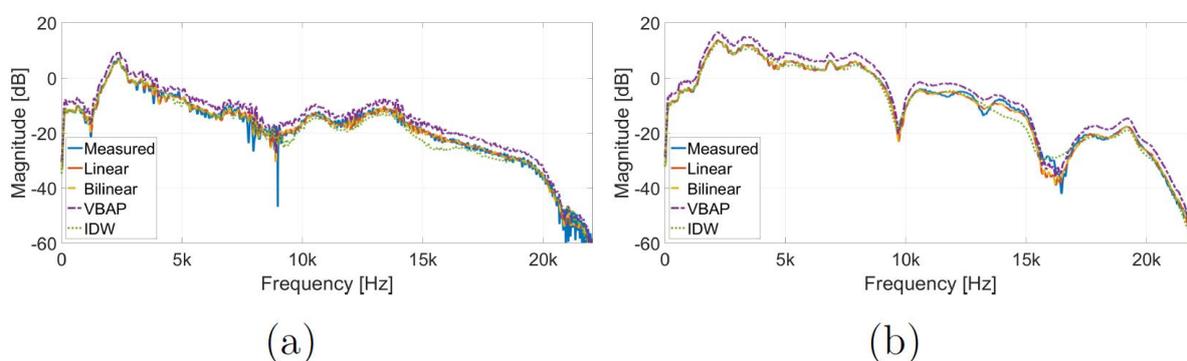


Figura 2: Confronto dei metodi di interpolazione delle HRTF considerando (a) l'orecchio sinistro e (b) l'orecchio destro

## BIBLIOGRAFIA

- [1] V. Bruschi, L. Grossi, N. Dourou, A. Quattrini, A. Vancheri, T. Leidi, and S. Cecchi, "A Review on Head-Related Transfer Function Generation for Spatial Audio." *Applied Sciences*, 14(23), 11242, 2024.
- [2] V. Bruschi, Valeria, A. Terenzi, N. Dourou, S. Spinsante, and S. Cecchi. "Comparative Analysis of HRTFs Measurement Using In-Ear Microphones." *Sensors* 23.13 (2023).
- [3] V. Bruschi, S. Nobili, S. Cecchi, and F. Piazza, "An innovative method for binaural room impulse responses interpolation," in AES Convention 148, May 2020.
- [4] V. Bruschi, N. Dourou, A. Carini, and S. Cecchi, "A New HRTF Interpolation Approach for Nonlinear 3D Audio Systems." *2023 Immersive and 3D Audio: from Architecture to Automotive (I3DA)*. IEEE, 2023.
- [5] V. Bruschi, N. Dourou, S. Nobili, and S. Cecchi, "A new method for HRTFs interpolation based on inverse distance weighting". Audio Engineering Society Convention 154. Audio Engineering Society, 2023.