

Ungleichförmige Geometriediskretisierung für die numerische Berechnung von Außenübertragungsfunktionen

Harald Ziegelwanger¹, Piotr Majdak¹, Wolfgang Kreuzer¹

¹ Institut für Schallforschung, ÖAW, 1040 Wien, E-Mail: harald.ziegelwanger@oeaw.ac.at

Einleitung

Außenübertragungsfunktionen (engl. head-related transfer functions, HRTFs) beschreiben die personenspezifische richtungsabhängige Filterwirkung des Kopfes, des Torsos und der Pinna am Gehöreingang [1]. HRTFs werden normalerweise akustisch gemessen, sie können aber auch numerisch simuliert werden über die Randelementemethode (engl. boundary element method, BEM) [2]. Allgemein löst die BEM die Helmholtz-Gleichung für eine Randfläche im drei-dimensionalen Raum. In diesem konkreten Fall ist die Randfläche durch die Oberflächengeometrie einer Person bestimmt. Exakte geometrische Daten werden benötigt, um perzeptiv valide HRTFs zu erhalten [3].

Die Oberfläche des Kopfes und der Ohren wird in Form eines drei-dimensionalen Polygonmeshs diskretisiert. Für die Diskretisierung wird allgemein empfohlen die in der Simulation auftretenden Wellenlängen auf mindestens sechs Elemente und möglichst gleichförmig abzubilden [4]. Dadurch wird einerseits der numerische Fehler klein gehalten und andererseits die Stabilität der Berechnung gewährleistet.

Die allgemeine Diskretisierungsempfehlung führt bei der HRTF-Simulation für den gesamten hörbaren Frequenzbereich zu einem linearen Gleichungssystem mit bis zu 150 000 Freiheitsgraden. Die Anzahl der Freiheitsgrade (in unserem Fall: Mesh-Elemente) bestimmt bei Verwendung der schnellen Multipolmethode (engl. Fast-multipole method, FMM) in direkt proportionalem Zusammenhang den erforderlichen Rechenaufwand [2].

Ein interessanter Ansatz diese Limitierung aufzubrechen und die Simulationszeit zu verkürzen wurde für die zweidimensionale Helmholtz-Gleichung vorgestellt [5]. Durch eine *ungleichförmige* Diskretisierung wird die Anzahl an Freiheitsgraden verringert und somit die Recheneffizienz gesteigert ohne die Stabilität der Simulation zu beeinträchtigen. In dieser Studie wird die Idee der ungleichförmigen Diskretisierung aufgegriffen und auf die Helmholtz-Gleichung in 3-D angewandt. Erste Berechnungen bestätigen die Anwendbarkeit für eine effiziente Simulation von perzeptiv validen HRTFs.

Methoden

Ungleichförmige Geometriediskretisierung

Ein Modul zur ungleichförmigen Geometriediskretisierung für die HRTF-Simulation wurde aufbauend auf [6] in Openflipper [7] implementiert. Die Diskretisierung der Geometrie wird, ausgehend von einer einstellbaren minimalen Kantenlänge beim Ohrkanal, linear mit dem Abstand zum Ohrkanal auf eine einstellbare maximale

Kantenlänge vergrößert. Die Vergrößerung erfolgt in einem iterativen Prozess. Innerhalb einer Iteration werden zuerst entweder zu kurze Kanten zu einem Punkt zusammengezogen (engl. edge collapse, siehe Abb. 1) und somit anschließende Kanten gestreckt, oder zu lange Kanten durch Teilen eines Endpunktes (engl. vertex split, siehe Abb. 1) verkürzt. Anschließend wird bei stumpfwinkeligen Dreiecken jeweils die längste Kante umgedreht (engl. edge flip, siehe Abb. 2). Somit wird das Mesh regularisiert.

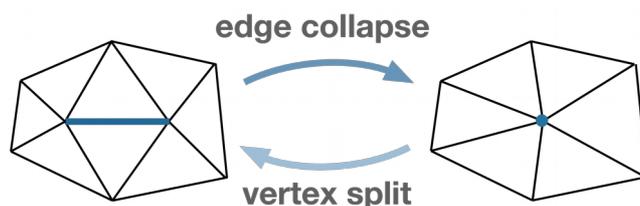


Abbildung 1: Zusammenziehen einer Kante (engl. edge collapse) und Teilung eines Knotens (engl. vertex split).

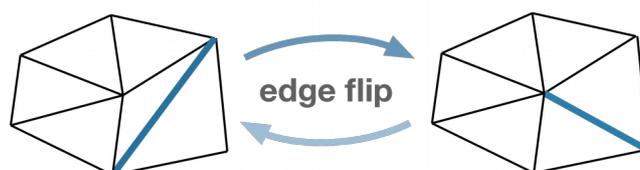


Abbildung 2: Drehen von Kanten in stumpfwinkeligen Dreiecken (engl. edge flipping).

Am Ende einer Iteration wird das gesamte Mesh geglättet und Knotenpunkte werden auf das Ausgangsmesh projiziert. Zehn Iterationen reichen aus um den vorgegebenen Kantenlängenverlauf auf der Kopfoberfläche zu erreichen (siehe Abb. 3).

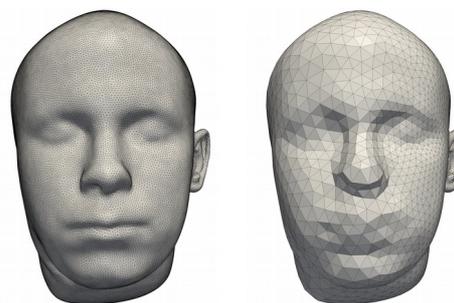


Abbildung 3: Gleichförmig diskretisiertes Mesh mit 2 mm Kantenlänge (links) und ungleichförmig diskretisiertes Mesh mit Kantenlängen von 1 bis 16 mm.

HRTF-Simulation

HRTFs einer männlichen Person wurden reziprok über die Burton-Miller ML-FMM-BEM für 1550 Richtungen simuliert (genauere Informationen siehe Referenz [8], [3]). Drei Geometriediskretisierungen wurden verwendet: gleichförmig (GF2, 2 mm Kantenlänge), gleichförmig (GF5,

5 mm Kantenlänge) und ungleichförmig (UF16, 1-16 mm Kantenlänge).

HRTF-Messung

Die HRTFs der selben Versuchsperson wurden ebenso in einem semi-anechoischen Raum für die selben Richtungen gemessen. Für genauere Informationen siehe Referenz [3], [9].

Evaluierung

Die simulierten HRTFs wurden mittels zweier Modelle mit den akustisch gemessenen HRTFs verglichen und evaluiert. Zum einen wurden spektrale Merkmale mithilfe eines Modells für Lokalisationsleistung in Sagittalebene analysiert [10]. Dieses Modell quantifiziert die Ähnlichkeit über den lokalen polaren RMS Fehler (PE) in Grad und der Quadrantenfehler in Prozent – gängige Fehlermaße aus der Psychoakustik. Zum anderen wurden temporale Merkmale über ein Laufzeitmodell analysiert und mit einem modellierten Kopfradius quantifiziert [11].

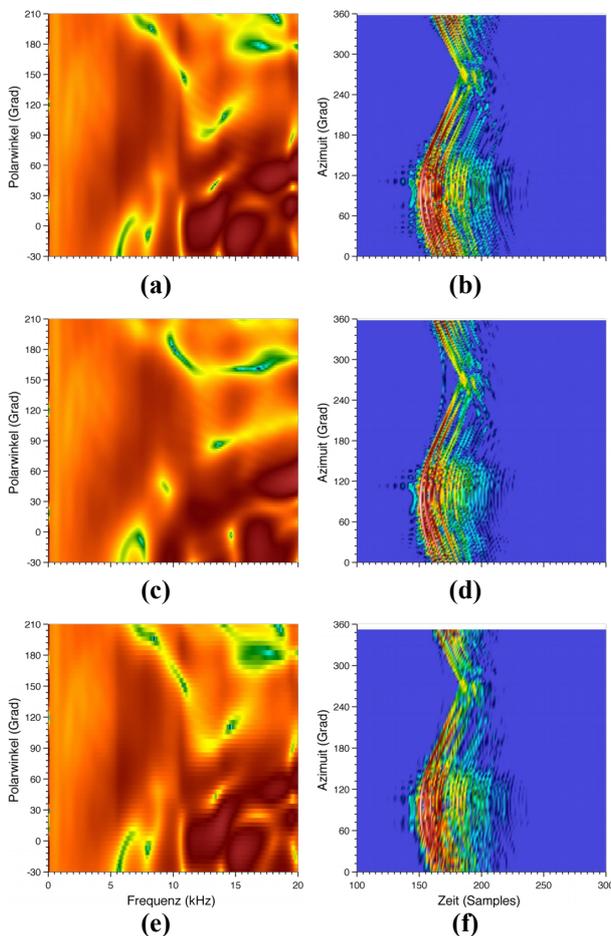


Abbildung 4: DTF-Amplitudenspektren in der Medianebene (a, c, e), und Energy-Time-Curves in der Horizontalebene (b, d, f). Die Polarwinkel 0°, 90°, 180° beschreiben die Schallquellenposition vor, oberhalb und hinter dem Hörer. Die Azimutwinkel 0°, 90°, 180° und 270° beschreiben die Schallquellenposition von vorne, links, hinten und rechts. Die Farbe repräsentiert die Amplitude in dB. Gleichförmig diskretisiertes Mesh mit 2 mm (a-b) und 5 mm AEL (c-d). Ungleichförmig diskretisiertes Mesh mit Kantenlängen von 1 bis 16 mm (e-f).

Resultate

Abb. 4 Zeigt die Simulationsergebnisse, zum einen Amplitudenspektren in der Medianebene (links) und Energie-Time-Curves in der Horizontalebene (rechts). Tab. 1 zeigt die Ergebnisse des Lokalisationsmodells und des Laufzeitmodells. Der Zeitaufwand für die Simulation von GF2 betrug 66 h und von GF5 und UF16 ca. 15 h.

Tabelle 1: Ergebnisse der Evaluierung über das Lokalisationsmodell und über das Laufzeitmodell

Beding- ung	Anzahl der Elemente	Parameter		
		PE (°)	QE (%)	r (mm)
GF2	98 564	32	10	91
GF5	17 432	40	17	92
UF16	15264	31	10	91

Diskussion

Unsere Ergebnisse zeigen zwei klare Vorteile der ungleichförmigen Geometriediskretisierung gegenüber der konventionellen Diskretisierung. Einerseits steigt die Recheneffizienz um den Faktor 4, andererseits bleiben die modellierten Lokalisationsleistungsparameter und der modellierte Kopfradius konstant.

Literatur

- [1] J. Blauert, *Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization*. Cambridge, Mass: MIT Press, 1997.
- [2] W. Kreuzer, P. Majdak, and Z. Chen, "Fast multipole boundary element method to calculate head-related transfer functions for a wide frequency range," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 126, no. 3, pp. 1280–1290, Sep. 2009.
- [3] H. Ziegelwanger, A. Reichinger, and P. Majdak, "Calculation of listener-specific head-related transfer functions: Effect of mesh quality," in *ICA 2013 Montreal*, Montreal, Canada, 2013, vol. 19, p. 050017.
- [4] S. Marburg, "SIX BOUNDARY ELEMENTS PER WAVELENGTH: IS THAT ENOUGH?," *J. Comput. Acoust.*, vol. 10, no. 01, pp. 25–51, Mar. 2002.
- [5] J. T. Chen, K. H. Chen, and C. T. Chen, "Adaptive boundary element method of time-harmonic exterior acoustics in two dimensions," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 191, no. 31, pp. 3331–3345, May 2002.
- [6] M. Botsch and L. Kobbelt, "A Remeshing Approach to Multiresolution Modeling," in *Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Geometry Processing*, New York, NY, USA, 2004, pp. 185–192.
- [7] J. Möbius and L. Kobbelt, "OpenFlipper: An Open Source Geometry Processing and Rendering Framework," in *Proceedings of the 7th International Conference on Curves and Surfaces*, Berlin, Heidelberg, 2012, pp. 488–500.
- [8] H. Ziegelwanger, P. Majdak, and W. Kreuzer, "Effect of element size and microphone model on the numerically calculated head-related transfer functions.pdf," in *Fortschritte der Akustik - DAGA 2013*, Meran, 2013.
- [9] P. Majdak, P. Balazs, and B. Laback, "Multiple Exponential Sweep Method for Fast Measurement of Head-Related Transfer Functions," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 55, no. 7/8, pp. 623–637, Jul. 2007.
- [10] R. Baumgartner, P. Majdak, and B. Laback, "Assessment of Sagittal-Plane Sound Localization Performance in Spatial-Audio Applications," in *The Technology of Binaural Listening*, Berlin, Germany: Springer, 2013.
- [11] H. Ziegelwanger and P. Majdak, "Modeling the direction-continuous time-of-arrival in head-related transfer functions," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 135, no. 3, pp. 1278–1293, Mar. 2014.