

Untersuchungen der Lokalisation bei Darbietung binauraler Signale mit übersprechkompensierten Lautsprechern in Abhängigkeit von der Hörerposition

O. Schmitz, Institut für Technische Akustik, RWTH Aachen, 52056 Aachen

Einleitung

Im Rahmen der Entwicklung eines Wiedergabesystems für binaurale Signale auf Basis von Lautsprechern wurden Hörtests durchgeführt, um wichtige Randbedingungen für die sich anschließende Implementation zu ermitteln. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden hier diskutiert.

Motivation

Ziel des laufenden Projektes ist, ein Wiedergabesystem für binaurale Signale zu entwickeln, das nicht auf Kopfhörern basiert. Begründet liegt dieser Ansatz in der Tatsache, daß für eine optimales Eintauchen in eine virtuelle Umgebung mit einem räumlich ausgedehnten Schallfeld das Gefühl einen Kopfhörer zu tragen, unnatürlich ist. Ein weiteres Problem von Kopfhörern ist bekanntlich die Im-Kopf-Lokalisation. Ausgangspunkt dieser Entwicklung ist die Übersprechkompensation nach Atal und Schroeder [1].

Gegenüber anderen lautsprecherbasierten Reproduktionssystemen, die auf Intensity-Panning beruhen, liegt der Vorteil der binauralen Wiedergabe in der Fähigkeit, auch kopfnah Schallquellen realistisch wiedergeben zu können. In diesem Fall sind die interauralen Pegel- und Laufzeitdifferenzen für die gleiche Richtung höher als bei größerem Abstand. Ein entferntes, mehrkanaliges Lautsprechersystem kann diesen Effekt nicht nachbilden. Insbesondere wenn der Benutzer des binauralen Systems mit seinen Händen in der virtuellen Szene agiert und dort Geräusche auslöst, ist der Abstand zwischen Quelle und Kopf im Allgemeinen kleiner als ein Meter.

Übersprechkompensation

Von Gardner [2] wurde gezeigt, daß es möglich ist, den „sweet spot“, also den Punkt für den die Übersprechkompensation eingemessen ist, den Bewegungen des Zuhörers nachzuführen. Eine mit der Kopfhörerwiedergabe vergleichbare Qualität kann aber nur erreicht werden, wenn ausreichend schnell auf Bewegungen seitens des Betrachters reagiert werden kann, bevor er den noch zu bestimmenden Toleranzbereich um den „sweet-spot“ verläßt. Dieser Toleranzbereich, in dem noch eine hinreichend gute Wiedergabe erfolgt, soll in den durchgeführten Hörtests bestimmt werden. Dabei wird nicht nur Wert auf die Lokalisation gelegt, sondern auch auf die Veränderung der klanglichen Eigenschaften.

Hörtests

Die Ergebnisse anderer Autoren und eigene Erfahrungen legen nahe, daß insbesondere seitliche Abweichungen und die Rotation des Kopfes einen negativen Einfluß auf die Wiedergabe ausüben.

In dem hier beschriebenen Test sollen die individuellen Grenzen für die maximale Translation und die maximale Rotation bestimmt werden, bei denen gerade eine wahrnehmbare Änderung auftritt. Weiterhin soll die Art dieser Änderungen bestimmt werden. Dazu werden 12 Testpersonen untersucht. Einige der Probanden besitzen bereits Erfahrungen im Hören binauraler Signale.

Als Testsignale dienen Kunstkopfaufnahmen von Pulsen weißen Rauschens der Länge 250 ms die im reflexionsarmen

Raum mit einem Lautsprecher für verschiedene Richtungen in der Horizontalebene mit einem Raster von 30 Grad aufgenommen wurden. Fünf unkorrelierte Pulse für eine Richtung mit jeweils 500 ms Pause dazwischen bilden ein Testsignal.

Die übersprechkompensierten Lautsprecher befinden sich in einem Abstand von ca. 2 Metern in ± 45 Grad bezogen auf die Blickrichtung. Die Kompensationsfilter werden aus Messungen der vier Übertragungsfunktionen zwischen den Lautsprechern und einem Kunstkopf durch Invertieren der Übertragungsmatrix und anschließendem Fenstern auf 413 Samples gewonnen und in einem DSP System implementiert (siehe z.B. Schmitz [3]). Der gesamte Aufbau ist zweimal vorhanden, einmal mit einem speziellen Stuhl, der es erlaubt, den Kopf reproduzierbar an einem Punkt, dem Referenzpunkt, zu positionieren, zum anderen mit einem "Head-Tracker" zur Positionsmessung, so daß sich der Proband frei bewegen kann. Der Sensor des Trackers wird durch ein Brillengestell aus Kunststoff sowohl am Kunstkopf als auch am Kopf des Probanden befestigt. Auf diese Weise wird zunächst die Referenzposition bestimmt, für die die Übersprechkompensation eingemessen ist.

Der Test wird in drei Schritten durchgeführt, einer Lernphase, einem statischen und einem dynamischen Test. In der Lernphase werden den Probanden zwei volle Umläufe der Testsignale aus der horizontalen Ebene dargeboten. Der sich unmittelbar anschließende statische Test, der wie die Lernphase mit fixierter Kopfposition durchgeführt wird, soll dazu dienen, Vergleichswerte für die Lokalisationsleistung im optimalen Fall zu bestimmen. Dazu werden die Testsignale in zufälliger Reihenfolge dargeboten, der Proband muß dann die wahrgenommene Richtung angeben.

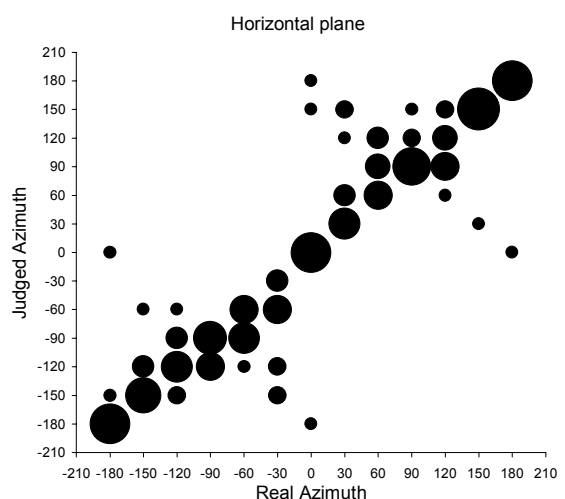


Abbildung 1 Ergebnisse des statischen Hörtests in der horizontalen Ebene

In Abbildung 1 werden die Ergebnisse für den statischen Test dargestellt. Auf der Abszisse ist die dargebotene Richtung, auf der Ordinate die wahrgenommene Richtung aufgetragen. Die Fläche der Kreise ist der Anzahl der Entscheidungen proportional. Idealerweise sollten alle Entscheidungen auf der Diagonalen liegen. Die Ergebnisse zeigen den typischen Verlauf für Lokalisationsversuche mit nicht individualisierten HRTFs. Die Lokalisation gelingt recht gut. Man erkennt allerdings deutlich vorne-hinten-Inversionen.

Beim dynamischen Test kann sich die Testperson in Grenzen frei bewegen. Ihre Position und Orientierung wird mit dem Head-Tracker aufgezeichnet. Dargeboten werden für alle Versuche abwechselnd Rauschpulse aus 90 und 45 Grad. Die Testpersonen haben den Auftrag zunächst die Referenzposition einzunehmen. Dazu wird die aktuelle Position bezogen auf die Referenzposition auf einem Monitor angezeigt. Dann soll sie sich so weit von dieser Position in die vorgegebene Richtung entfernen, bis ein Unterschied gerade wahrgenommen werden kann. Durch Betätigen eines Tasters wird dann die aktuelle Position aufgezeichnet. Die Art des wahrgenommenen Unterschiedes wird ebenfalls abgefragt. Untersucht wird die Translation seitlich und vorne-hinten, sowie die Rotation um die Senkrechte- und die Blickachse

Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Abbildung 2 bis Abbildung 4 zu sehen. Dargestellt ist jeweils die Häufigkeitsverteilung einer bestimmten maximalen Auslenkung aus der Referenzposition. Die Ergebnisse schwanken erheblich zwischen den Testpersonen. Tabelle 1 zeigt die Streubreite der Ergebnisse. Die Ergebnisse für die vorne-hinten Verschiebung sind nicht dargestellt, da die erlaubte Abweichung um eine Größenordnung größer ermittelt wurde als bei seitlicher Verschiebung.

Translation seitlich	0,8 cm – 30 cm
Rotation azimuthal	3,5° - 27°
Rotation frontal	2,3° - 33,8°

Tabelle 1 Streubreite der Ergebnisse

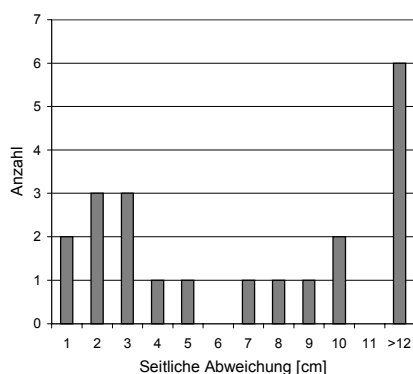


Abbildung 2 Häufigkeitsverteilung für seitliche Abweichung

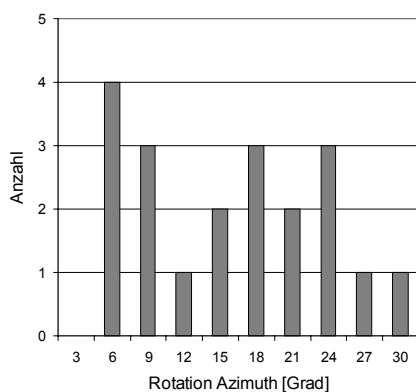


Abbildung 3 Häufigkeitsverteilung für azimuthale Rotation

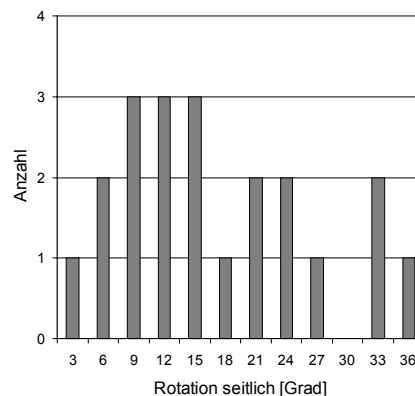


Abbildung 4 Häufigkeitsverteilung für frontale Rotation

Bei der seitlichen Verschiebung sowie bei der azimuthalen Rotation wurden folgende Änderungen der wahrgenommenen Situation berichtet:

- Die Lokalisation der Quelle wandert nach hinten,
- Die Lokalisation der Quelle wandert in den Lautsprecher,
- Das Bild der Quelle wird diffuser, die Quelle wird größer,
- Die Klangfarbe ändert sich.

Bei der frontalen Rotation wurde zusätzlich zu den oben genannten Änderungen noch folgendes berichtet:

- Die Lokalisation der Quelle wandert nach oben,
- Abnahme des Pegels.

Bewertung

Die große Streubreite, insbesondere bei der seitlichen Verschiebung, läßt Zweifel aufkommen, ob alle am Test teilnehmenden Personen die gleichen Kriterien für die Bewertung der dargebotenen Situation angewendet haben. Trotzdem kann den Ergebnissen entnommen werden, wie empfindlich das menschliche Gehör auf Abweichungen von der Referenzposition bei übersprechkompensierter Wiedergabe binauraler Signale mit Lautsprechern reagiert. Bei einem Wiedergabesystem, das diese Technik verwendet, müssen daher extrem hohe Anforderungen an die Latenzzeiten und die Orts- und Winkelauflösung gestellt werden. Der Autor vermutet, daß einem bewegten Zuhörer eher Klangverfärbungen auffallen werden als Ungenauigkeiten in der Lokalisation, insbesondere wenn in einer virtuellen Umgebung auch visuelle Reize dargeboten werden.

Ausblick

Zur Zeit wird ein System implementiert, das auf Basis der Übersprechkompensation binaurale Signale wiedergeben soll. Die Qualität dieses Systems, insbesondere bei bewegtem Betrachter, wird in ausgiebigen Hörtests untersucht werden.

1 Atal, B.S.; Schroeder M. R.; Gravesaner Blätter 27/28, S. 124, 1966

2 Gardner W. G.; 3-D Audio Using Loudspeakers; PhD Thesis Massachusetts Institute of Technology 1997

3 Schmitz A.; Naturgetreue Wiedergabe kopfbezogener Schallaufnahmen über zwei Lautsprecher mit Hilfe eines Übersprechkompensators. Dissertation RWTH Aachen 1994