

## 論文の内容の要旨

論文題目 「空間共有通信における個人性を考慮した音場情報の処理」

氏名 山本 健一郎

近年の計算機性能の急速な向上、あるいは通信速度の向上は著しいものがある。この進歩により、物理的に離れた空間を結びつける空間共有通信システム、あるいは仮想空間環境構築システムにおいて、より高度な臨場感の実現を目指した研究がますます盛んに行なわれている。しかし一口に臨場感といっても、その要素は様々である。視覚・聴覚・触覚・嗅覚・味覚といった様々な感覚があいまって、臨場感へと結び付いている。中でも、目を閉じていても流れ込んでくる聴覚情報は、臨場感を高める上で必要不可欠な要素であろう。

本論文では、空間共有通信における聴覚情報の提示手法に関して研究を行った。大きく分けて2つある音の提示手法を結び付ける中立的記述を提案し、音場情報の柔軟な利用方法に関して検討した。また音の提示に際して大きな問題となる受聴者の個人差に対し、個人差を考慮した提示を行う手法を検討した。

### 音場情報の中立的記述

聴覚情報の提示手法は大きく分けて以下の2つのアプローチがある。

- ある大きさの空間内全体の音圧を正しく再現する手法
- 左右の鼓膜の直前の音圧のみを正しく再現する手法

前者は音に関する波動方程式（Kirchhoff 積分公式）を解く必要があり、後者は音源から耳への空間伝達関数（頭部伝達関数）を扱うことが必要となる。従来これら2つの

手法の間に接点は無かった。しかし通信を行なおうとする設備間で音場情報取得・再生の手段が異なっていることは充分考えられる。高い臨場感を持つ通信を自由に行なうためには方式間の差を乗り越え、情報を自由に相互利用できることが望ましい。

Kirchhoff の積分公式に基づく音場合成理論によると、ある閉曲面  $S$  上の音圧と面の法線方向の音圧勾配を完全に制御することが可能であれば、閉曲面  $S$  の内部領域  $D$  の音場を完全に再現することができる。ここで図 1 のように、Kirchhoff 積分による方式で再現されている音場の中で受聴者が音を聞いている状況を考える。境界面上の各制御点から受聴者の耳に音が届いており、たくさんの制御点からの音の寄与が足し合わされることによって、結果的に音場が再現されて聞こえることがわかる。この場合には、境界面上の音圧情報に対して頭部伝達関数を畳み込み処理してやることにより、提示方式の変換が実現可能である。

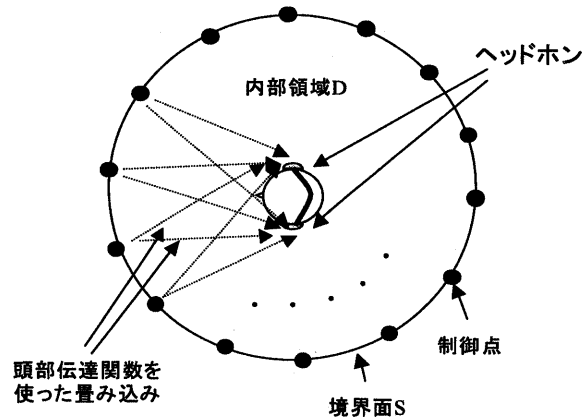


図 1: 提示方式の変換

また境界面を設けることで、受聴者の頭部形状による影響等の個性が含まれる領域(境界面内側)と、含まれない領域(境界面外側)を分離して扱うことが可能となる。

また境界面を設けることで、受聴者の頭部形状による影響等の個性が含まれる領域(境界面内側)と、含まれない領域(境界面外側)を分離して扱うことが可能となる。

### スピーカアレイを用いた空間共有システムの構築と特性解析

空間共有システムにおいて、複数人が様々な位置で音場を受聴できるシステムを構築するには、Kirchhoff 積分公式を利用し、閉空間内の音圧を再現する手法が適している。しかし大画面立体映像表示システムと組み合わせようとする、スクリーンによりスピーカの設置場所が制限を受ける。そこで、映像との融合が容易になるよう考慮した音場通信のモデルについて提案し、そのモデルを実装したシステムを構築した。さらに、シミュレーションによって特性解析を行い、今後同様な手法で音場合成を試みる場合の設計指針を示した。

### 空間共有通信における実音場情報の伝送

空間共有通信において、入力側がマイクアレイ、出力側が2チャンネルのスピーカという非対称な通信を想定し、音場の中立的記述の概念でそれらを結び付けるシステムを構築し、音場情報の伝送実験を行った。またこの実験では、4眼カメラを用いた広視野角ステレオ画像通信システムと組み合わせ、実音場情報をスピーカで、立体映像をスクリーンで提示し、遠隔地との空間共有を実現した。

## 頭部伝達関数の測定および個人志向ダミーヘッドマイクの作成

左右の鼓膜の直前の音圧のみを正しく再現する音場提示手法においては、頭部伝達関数を用いた畳み込み処理が必要不可欠である。頭部伝達関数は音源から耳への空間伝達関数であり、耳介や頭部の形状に強く依存する。これらの形状は人によって千差万別であり、他人の頭部伝達関数を用いて再現した音はうまく定位しないということが起こる。

このような頭部伝達関数の個人差を解析するためのデータを得るために、複数人の被験者に対して測定を行った。ただし、測定には多くの時間がかかるため、生身の人間に関して詳細なデータを得ることは容易ではない。そこで2名の被験者に関して頭部や耳介形状を型取りして個人を忠実に模したダミーヘッドマイクを作成し(図2)、これを用いて詳細な頭部伝達関数の測定データを取得した。



図 2: 個人志向ダミーヘッドマイク

## 頭部伝達関数の解析とクラスタリング

頭部伝達関数の個人差のため、万人に効果のある音場情報提示システムを構築することは困難である。そこで、頭部伝達関数を調節して個人差に適応させるシステムの構築を目的とし、複数被験者による頭部伝達関数データベースを用いて、個人差の要因の解析を行った。音源の方向に応じて頭部伝達関数が増減する様子を、主成分分析による直交基底空間中の軌跡として捕らえ、それに着目することによって、似た特徴を持つ頭部伝達関数をクラスタリングした。そこから幾つかの特徴的な頭部伝達関数を抽出し、それらが個人差を補償可能であるか、有効性を検証した。また抽出したデータを用いたリアルタイム音場提示システムを構築した。

## 磁気センサとトランスオーラル処理を用いた音像の定位

ヘッドホンを用いて音像を提示すると、周囲の音はヘッドホンに遮られてしまう。複合現実感システムのように仮想世界と現実世界の聴覚情報の融合を考える上では適切な方法とは言い難い。このことから、スピーカを使ったシステムが有効であると思われる。しかし受聴者の動きに合わせてリアルタイムに音像を定位させるスピーカシステムを構築することは容易ではない。そこで固定的な（スピーカと頭部の位置および向きに制約のある）トランスオーラル処理を用いてこれを実現する簡易なシステムの構築を検討した。

音像の提示装置に音像の提示位置の情報を与える方法について、磁気センサによって得られる情報のうち、頭部の位置情報を利用し向きの情報は用いないトランスオーラルシステムにより、上記簡易システムが実現可能であることを期待し、それを検証するための実験を行った。

頭部の向きの情報に関する実験からは、向きの情報を利用しない場合は、頭部を正面方向から $-45^{\circ}$ 回転させていても、 $-30^{\circ}$ から $+30^{\circ}$ の領域ではほぼ正しい方向に定位することがわかった。一方向きの情報を利用した場合は、音像の定位方向にずれが生じてることがわかった。このことから、本システムにおいては頭部の向きの情報は利用しない方が良いことが確かめられた。

頭部の位置情報に関する実験からは、頭部の位置情報を用いれば、少なくとも音像の左右の方向は正しく認識されることがわかり、頭部の位置情報を利用する方が良い事が確かめられた。

これらの結果を踏まえ、4通りの音像提示方法を用意し比較試聴実験を行った。その結果期待通り、頭部の位置情報は用い、向きの情報は用いないシステムが評価された。

## 結論

本論文では、空間共有通信における聴覚情報の提示手法に関して研究を行った。大きく分けて2つある音の提示手法を結び付ける中立的記述を提案し、幾つかの音場情報提示システムに関してその有効性を検証した。また、頭部伝達関数の個人差の問題に着目し、主成分分析を用いた個人差の解析やクラスタリング、個人差を考慮した音像提示システムを構築した。本研究は、空間共有通信におけるより効果的な音場情報の提示に貢献するものである。