

氏名 (本籍)	Kim Hae Young 金 海 永	(韓国)
学位の種類	博士 (情報科学)	
学位記番号	情博 第107号	
学位授与年月日	平成11年3月25日	
学位授与の要件	学位規則第4条第1項	
研究科, 専攻	東北大学大学院情報科学研究科 (博士課程) システム情報科学専攻	
学位論文題目	音像の距離定位に関する研究	
論文審査委員	(主査)	
	東北大学 教授 曾根 敏夫	東北大学 教授 牧野 正三
	東北大学 教授 中村 信良	東北大学 助教授 鈴木 陽一
	(工学研究科)	

## 論文内容要旨

### 第1章 序論

音像定位の物理的要因に関する研究の中で、水平面や正中面での音像の方向定位については、その物理的要因はかなり明らかになっており、耳入力信号の両耳間レベル差、両耳間時間差、周波数スペクトル、頭部の移動による耳入力信号の変化などが挙げられている。一方、音像の距離感を決定する物理的要因には、耳入力信号のラウドネス、周波数スペクトル、両耳間差などが考えられてきた。以上の要因は、頭部伝達関数によって、完全に記述することができるが、頭部伝達関数に含まれるどのような要因が距離定位に役立つのかは、方向定位の場合に比べて明確でない。そこで、本論文では、聴覚系における音像の距離定位過程を明らかにすることを大きな目的とした。この目的を達成するために、本論文では、自由空間内で聴取者が、両耳に到達した音の音像定位を行うのに必要な物理的要因がほぼ全て含まれている頭部伝達関数に着目し、頭部伝達関数のどのような要因を手がかりに距離知覚が行われているかを、頭部伝達関数の距離による変化の分析を通して考察した。また、どのような仕組みで距離定位を行っているかを知るために、頭部伝達関数を用いた近距離における音像距離知覚のモデル化について検討した。また、人間の距離知覚における頭部伝達関数の役割をより深く理解するために、音像距離の絶対知覚だけでなく、相対知覚について検討を行い、音像の距離定位が行われるための心理物理的要因を考察した。

### 第2章 頭部伝達関数の測定及び模擬手法

第2章では、音源の方向や距離の情報など、音源から鼓膜面上までの伝達系の情報を総合的に含むと考えられる頭部伝達関数を測定し、その音源距離との関係について考察した。また、2チャンネルス

ピーカによる頭部伝達関数の模擬手法を用いたときの物理的模擬精度を評価した。

その結果、音源の距離によって、頭部伝達関数の音圧特性が変化していることが確認された。さらに、各距離、各方向において測定した頭部伝達関数を、2チャンネルスピーカ法により模擬し、測定した頭部伝達関数に対する、模擬した頭部伝達関数の誤差を、1/3オクターブ帯域ごとに分析したレベルの平均値によって評価した。その結果、音源側の耳では、0.25 dB程度の高い模擬精度が得られた。音源方向と反対側の耳では、頭部や耳介による回折や反射により、頭部伝達関数が複雑に変化するため、誤差はこれより大きいものの、0.35 dB程度と、やはり高い模擬精度が得られた。以上の考察から、2チャンネルスピーカを用いた頭部伝達関数の模擬手法を用いることにより、頭部伝達関数の忠実な模擬が可能であることを示した。

### 第3章 音像の距離定位の手がかりについての検討

第3章では、自由空間内において、音像の距離定位に影響を及ぼす物理的な要因を、実音源を用いた聴取実験を通じて考察した。具体的には、(1) 音像の距離定位とラウドネスとの関係、(2) 時間波形の異なる刺激音の音像距離定位への影響、(3) 音像の距離定位に対する周波数帯域の影響について調べた。

その結果、被験者位置における音圧レベルを一定とし、ラウドネスをほぼ一定に保った場合でも、正面方向、斜め方向共に、2 m ぐらいまでの音源距離においては、知覚した音像距離が、音源の距離に応じて増加することが明らかになった。これは、この範囲では、刺激音の音圧レベルや反射音以外の物理的要因、即ち、頭部伝達関数に含まれる物理的特性の音源距離による変化を手掛りとしている可能性を示すものである。時間変動音を用いた音像距離定位の実験では、刺激音がピンクノイズの場合の知覚距離が、他の刺激音(パルス列、音声信号、音楽)よりも、有意に遠くに知覚されたが、他の刺激音では、知覚した距離の間には有意な差は見られなかった。また、中心周波数の異なるオクターブ帯域雑音を用いて距離定位実験を行った結果、刺激音の周波数帯域が、音像距離にある程度影響を及ぼしていることを明らかにした。すなわち、人間は、周波数帯域によって、音像距離を異なるように判断する可能性がある。しかし、音像の距離定位に大きな影響や効果を有する周波数帯域は、特定されなかった。

### 第4章 近距離音像の距離定位のモデル化

第4章では、近距離における音像距離知覚のモデルとして、Hirsch や、田原らによる両耳間時間差とレベル差の変化に着目した「Hirsch-田原モデル」と、音源距離が変化すると、音源から両耳を見込む輻輳角が変化することに着目した「輻輳角モデル」を取り上げ、その有効性や限界について考察した。まず、Hirsch-田原モデルによる実験から、両耳間時間差やレベル差だけの情報からでは、音像距離の知覚は、40 cm 以内の近距離に限定されることが示された。一方、輻輳角モデルに基づく実験結果においては、頭部伝達関数の場合とほぼ同様に、1.25 m 程度までは、模擬した音源距離の増加に伴い、知覚した距離も増加し、1.5 m 以上の距離では、知覚した距離の増加が飽和するという傾向が見られた。Hirsch-田原モデルには、音源から両耳までの両耳間差がない正面方向や真後ろ方向には適用できないことや、頭部や耳介の回折効果による頭部伝達関数のスペクトルの変化は考慮していないという問題点がある。また、輻輳角モデルには、音源から両耳までの方位角の差がない真横方向においては、原理的に適用することができないという問題点がある。

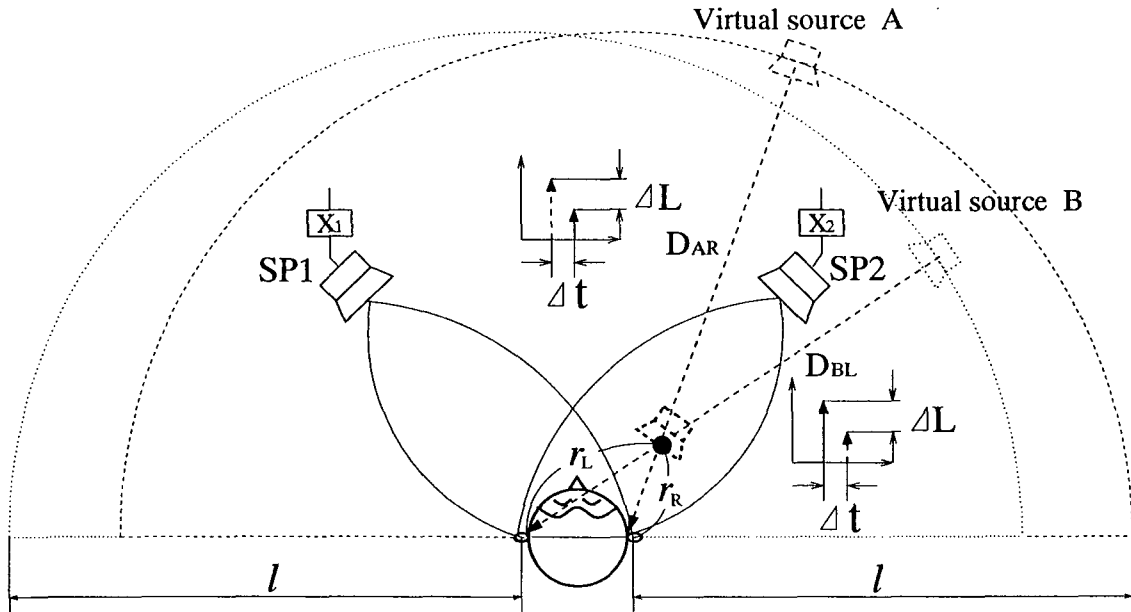


図1 拡張輻角モデルに基づく音像距離定位の模擬系

これらの問題点を踏まえて、輻角モデルを真横方向を含む全方向の距離定位について一般に適用するために、音源から両耳までの経路差による両耳間時間差やレベル差を考慮した「拡張輻角モデル」を提案し、聴取実験を通じてその有効性について考察を行った。図1に、拡張輻角モデルに基づく音像距離定位の模擬系を示す。拡張輻角モデルでは、図1のように、輻角モデルに基づいて定められる仮想的な2音源から左右耳までの伝達関数に、各音源距離による両耳間時間差とレベル差を加えることにより、ある方向のある距離に音像が定位されると考える。このことは、拡張輻角モデルでの模擬すべき所望の頭部伝達関数は、スピーカAから右耳までの頭部伝達関数と、スピーカBから左耳までの頭部伝達関数に、ある音源位置から両耳までの距離の経路差による両耳間時間差とレベル差を与えることを意味する。音源方向が真横方向の場合には、両耳間時間差は音源距離によらず一定の値を持つため、両耳間レベル差だけが変化する。これらの伝達関数を2チャンネルスピーカを用いた頭部伝達関数の模擬法によって実現する。

図2(a)に、実音源による音像の距離定位実験結果、図2(b)に、拡張輻角モデルに基づく音像距離の制御実験結果を示す。図2(a), (b)から、実音源を用いて各距離において刺激音を提示した場合と、拡張輻角モデルに基づいて音像距離を模擬した場合共に、約1.25 mまでの距離では、模擬した距離の増加に伴い、知覚した距離が増加していることが分かる。それ以上の距離では、模擬した音源の距離が遠くなるに伴い、知覚した距離は飽和する傾向が見られる。また、拡張輻角モデルに基づく手法によって知覚された音像距離は、実音源により知覚した音像距離よりも遠い。しかし、その割合は各距離や方向によらずにほぼ一定であり、知覚された音像距離は対角線にほぼ平行に沿っている。このことから、拡張輻角モデルは、Hirsch-田原モデルや輻角モデルの問題点を補うモデルであり、真横方向を含む全方向に適用できる音像の距離定位のモデル化が可能になったと言える。すなわち、近距離における距離定位は、両耳から音源を見込む輻角情報によるスペクトルの変化に加え、音源から両耳までの経路差による両耳間時間差とレベル差を考慮することにより、ある程度説明できることを示した。

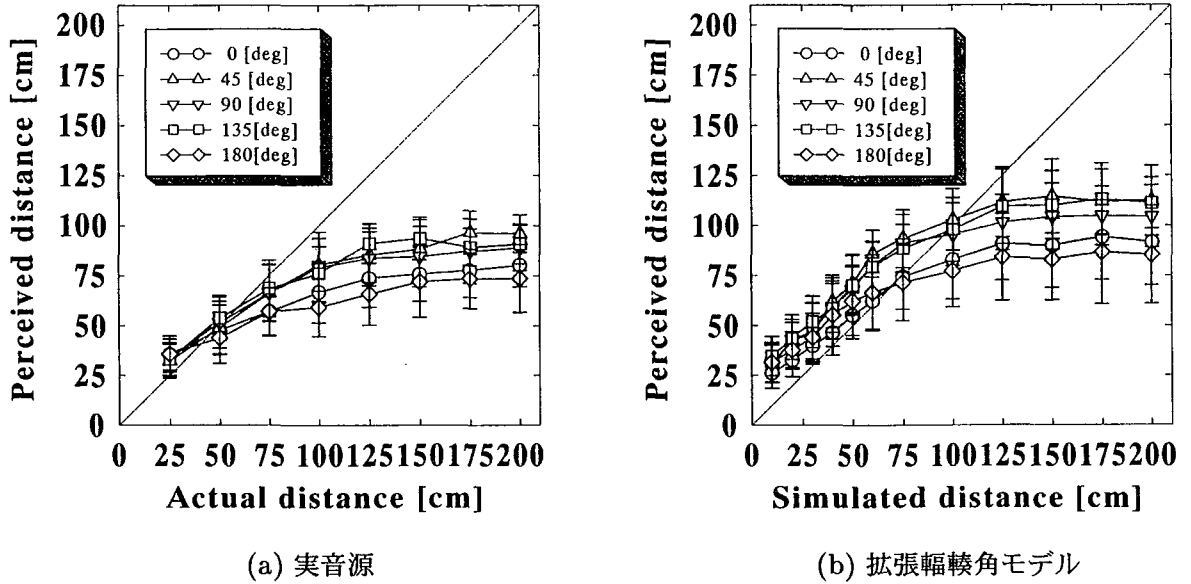
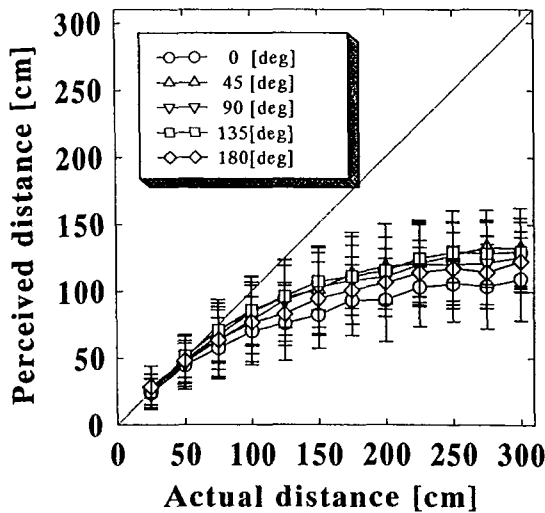


図2 実音源と拡張輻射角モデルに基づく手法により知覚された音像距離

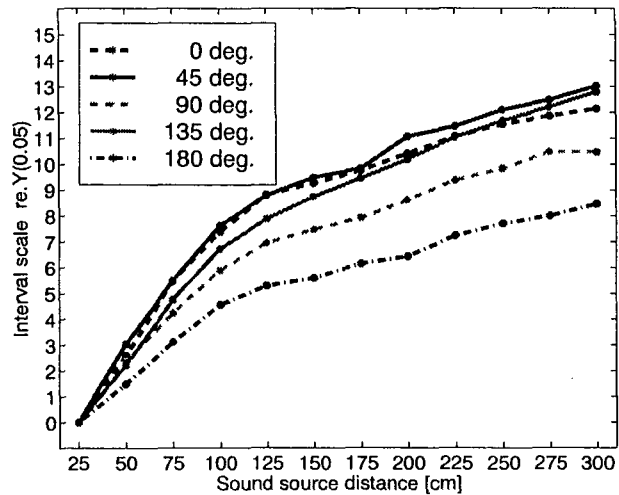
## 第5章 音像距離の相対知覚に関する考察

通常、われわれは、単一音源からの音だけではなく、複数の音源からの音を聞いている。このように、実際の聴取状態に即して考えると、一つの音源の距離を絶対的に判断するだけではなく、その周囲に存在する他の音と何らかの比較を行うことによって、相対的な判断をしていることが少なくないと考えられる。したがって、単一音源による絶対距離知覚の結果だけでは、距離知覚における頭部伝達関数の役割を説明するのに、限界があると考えられる。そこで、本章では、人間の距離知覚における頭部伝達関数の役割をより深く理解するために、同一の音源信号を用いて絶対距離知覚と相対距離知覚の両方の聴取実験を行い、両者の結果の比較を通じて、音像距離の相対知覚について考察した。

図3(a)に、絶対距離判断の実験の結果を示す。図3(a)の結果から、音源距離の増加に伴って、知覚した音像距離が増加しているものの、音源距離が遠くなるにつれて音像距離の増加の割合は小さくなっていることが分かる。絶対判断では、音像の遠近判断の際の基準となる位置情報を得ることが極めて困難であるため、頭部伝達関数に含まれているスペクトルの変化や両耳間差が、主に判断の材料として用いられると考えられる。頭部伝達関数は、約1mを越えると距離による変化が小さくなるため、それ以上遠い距離においては、距離の弁別限が大きくなると考えられる。また、図3(b)に、各音源の物理的距離と相対判断によって知覚された心理的距離尺度値との関係を示す。図の横軸は提示した音源距離を、縦軸は心理的距離尺度値をヤードスティック Y(0.05) で正規化した値を表わしている。図で、ある二つの距離に着目したとき、両者の尺度値の差が「1」より大きい場合には、二つの距離の遠近感、危険率5%で有意である。図から、音源距離が1m以上の距離になると、心理的距離尺度値の増加が緩やかになることが分かる。相対判断においても、絶対判断で見られるように、近距離においては音像の遠近感を判断しやすいが、ある程度遠くなると、遠近の判別が困難になることが示されている。しかし、絶対判断の場合の知覚距離が、音源距離が3mに近づくにつれて飽和しているのに対し、相対判断の場合には、このような飽和は見られない。実際、絶対判断では、音源距離が1.5mを超える距離では、二つの音源距離が75cm以上離れないと、二つの音像距離の違



(a) 絶対判断



(b) 相対判断

図3 絶対判断によって知覚された音像距離と相対判断によって知覚された心理的距離尺度値

いは弁別できないのに対し、相対判断の場合には、2~3 m ぐらいまでのより遠い距離においても、50 cm 以上離れている音源について、二つの距離の間の違いを有意に弁別することが可能であった。これは、絶対判断では、音像の遠近判断の際の基準となる位置情報を得ることが極めて困難であるのに対し、相対判断では、判断基準として、二つの遠近感を数秒の差で比較する「短期記憶」を用いることにより、頭部伝達関数の形状の違いが弁別可能となり、より遠い距離まで遠近判断が可能になるものと考えられる。もう一つの理由としては、音像距離の絶対判断では、被験者が知覚した音像の遠近判断とそれに数値を割り当てる二段階の判断が必要となり、誤差が生じ易いのに対して、相対判断では、二つの音像の遠近判断の一段階の判断のみで済むため、誤差が生じる要素が少なくなることが考えられる。

## 第6章 結論

本章では、本研究によって得られた結論を総括した。

## 論文審査の結果の要旨

聴覚系における三次元音像定位のための知覚過程の解明は、バーチャルリアリティ、高次臨場感通信などの応用面からも、強く望まれているところである。この三次元定位のうち、方位角定位と仰角定位についての理解はかなり進んでいるが、距離定位については、不明の点が多く残されている。著者は、音像距離の知覚過程について、自由音場内に置かれた音源から耳までの特性を表現する音響伝達関数、すなわち、頭部伝達関数の距離定位知覚における役割に着目して研究を進めてきた。本論文は、その研究の成果をまとめたもので、全編6章からなる。

第1章は、序論である。

第2章では、頭部伝達関数の音源距離による変化を実測し、それが、方向によって異なる距離依存性を示すことを確認している。

第3章では、実音源の距離定位の絶対判断について、聴取実験により検討している。無響室内の自由音場で、耳もとでの音圧レベルを一定に保った実験により、音源距離が2 m以内の範囲では、ラウドネスの変化によらずに音像距離の知覚が可能であることを示している。また、この距離知覚は、音源の時間特性や周波数特性によって、有意に変化することを明らかにしている。これは、距離知覚における頭部伝達関数の重要性を示すもので、興味ある知見である。

第4章では、頭部伝達関数に含まれる音像距離知覚の決定要因を明らかにするため、モデル化された伝達関数を用いて聴取実験を行った結果、両耳から音源を見込む角度の差の情報だけを含む輻輳角モデルにより合成した伝達関数を用いても、実音源とほぼ同様の距離定位が実現可能であることを示している。更に、輻輳角モデルで対応できない真横方向について、幾何学的経路差をも考慮した拡張輻輳角モデルを提案し、聴取実験の結果、真横方向も含めて、実音源とほぼ同様の距離知覚が可能であることを示した。これは、頭部伝達関数に含まれる輻輳角情報の重要性を示すものとして評価できる。

日常の音環境においては、単一音源の定位位置の絶対判断だけでなく、複数の音の定位位置間の相対判断も重要であると考えられる。第5章では、この点を考慮した相対距離知覚に関する聴取実験を行い、絶対距離知覚と比較して考察を行っている。その結果、相対判断の場合には、絶対判断では弁別が困難な2～3 mの距離においても、距離の弁別が可能であることを見出している。これは、実際の音の距離知覚を考える上で、有用な知見である。

第6章は、結論である。

以上要するに、本論文は、これまであまり理解が進んでいなかったヒトの聴覚系における音像距離定位について、多くの聴取実験に基づき、頭部伝達関数の役割を中心に考察を進め、輻輳角情報や相対判断の重要性を明らかにしたもので、音響情報工学およびシステム情報科学の進展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は、博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。