

令和 2 年 6 月 25 日現在

機関番号：23201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00244

研究課題名（和文）モノラル立体音再生システム

研究課題名（英文）Monaural 3D sound reproduction system

研究代表者

平原 達也（Hirahara, Tatsuya）

富山県立大学・工学部・教授

研究者番号：80395087

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、両耳聴手がかりが利用できない単耳受聴状態においては、頭部伝達関数のスペクトルの特徴が水平面の音像位置を決定する音響特徴として利用されることを実験的に明らかにした。その結果、単耳受聴時でも開放耳側にある音源の音像は定位できること、単耳受聴時に受聴者が頭部を回転すると音像は動くこと、この頭部回転に伴う音像の動き方は頭部伝達関数から概ね予測できること、刺激音の音圧レベルが閉塞耳の最小可聴閾値を越えると頭部回転に伴って音像が移動する音源方位は減少することがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

単耳受聴状態では頭部回転に伴って音像が移動するという知覚現象を見つけ、その現象の成因を明らかにするとともに、それを利用して耳栓装着時の健聴者が単耳受聴状態にあるかどうかを判定する方法を考案した本研究の成果は、人間の知覚情報処理分野の学術的発展に貢献する。また、完全な単耳受聴状態であれば頭部伝達関数に含まれるスペクトルの特徴を刺激音に附与することにより水平面の立体音像をモノラル再生することが可能であるが、動的モノラル信号は音像定位に貢献しない、というモノラル立体音再生システムの設計指針を得たことは、補聴器機能の高度化など社会的意義もある。

研究成果の概要（英文）： In this study, it was shown experimentally that the spectral features of the head-related transfer function of a listener can be used to determine the sound image position in the horizontal plane in monaural listening condition, where binaural cues are not available. It was found that the sound image could be localized in the open ear even in monaural listening, that the sound image moved when the listener rotated his or her head during monaural listening, that the movement of the sound image with head rotation could be predicted from the listener's head-related transfer functions, and that the range of the sound source position where the sound image moved with head rotation was narrowed when the sound pressure level of the stimulus sound exceeded the minimum audible threshold of the occluded ear.

研究分野：知覚情報処理

キーワード：音像定位 モノラル 立体音再生システム 頭部伝達関数

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

両耳受聴状態では、聴覚系は両耳間時間差 (ITD: interaural time difference) と両耳間レベル差 (ILD: interaural level difference) から音の方位を、SCs (SCs: Spectral Cues) と呼ばれる、複雑な凹凸形状を持つ耳介の共鳴によって耳に届く音のスペクトルの高域に生じる特徴的なピークやノッチから音の仰角を計算していることが知られている[1]。これらの音の空間情報を与える音響手がかりは、HRTF (HRTF: Head-Related Transfer Function) に全て含まれており、HRTF を音源信号に畳み込んだバイノーラル信号をイヤホンで再生することにより立体音像を再生することができる。

このバイノーラル再生方式では、受聴者の頭部運動を反映しない静的バイノーラル信号を用いる場合が多いが、受聴者の正確な HRTF と厳密な音響条件を満たすイヤホンを使用しないと再生音像が空間的に歪む。これに対して、受聴者の頭部の動きを反映した動的バイノーラル信号を用いると、再生音像の空間的な歪みが減じる。動的バイノーラル信号では ITD, ILD, SCs という静的な音響手がかりに加えて、頭部運動に伴って生じるそれらの時間変化である Δ ITD, Δ ILD, Δ SCs という動的な音響手がかりが利用できるために、前後誤りなどの音像定位の曖昧さが減るからである。

これに対して、単耳受聴状態では、ITD と ILD を利用できないために、音像定位は困難であるとされている。ところが、健聴者が片耳を遮音量を確保した耳栓で塞いで単耳受聴した場合には、開放耳半面から呈示した刺激音の音像を定位正答率が 70%以上もある。単耳聴手がかりは、HRTF スペクトルに現れるピークとノッチ、すなわち SCs である。このうち、高域のスペクトル・ノッチは、音像の仰角を決める音響手がかりであることが知られており、ITD と ILD が利用できる両耳受聴状態では補助的な役割しか果たさないとされている。一方、低域のスペクトル・ノッチは両耳受聴状態における水平面の音像定位には全く影響を与えないとされている。単耳受聴状態では、両耳聴手がかりである ILD は非常に大きく ITD を計算できない特異な状況下にあるが、開放耳半面から呈示した刺激音の音像を定位正答率は 70%以上あるということは、単耳受聴状態で唯一利用可能な SCs を利用して脳が音像の方位を計算している可能性がある。

2. 研究の目的

立体音の知覚は、通常、左右の耳で聴く両耳受聴 (バイノーラル) を前提とする。しかし、多くの通信機器や視覚障害者用の音響ナビゲーション装置や高齢難聴者を含む聴覚障害者用の補聴器などでは、片側の耳だけで聴く単耳受聴 (モノラル) する場合にも立体音を呈示できる技術が求められている。そこで本研究では、ひとつのイヤホンで立体音を提示するモノラル立体音再生システムの設計指針を定めるために、単耳受聴時には HRTF の SCs が水平面の音像位置を決定する音響手がかりとして利用されることを実験的に検証する。そして、これらの実験結果に基づいてモノラル立体音再生システムの設計指針を定める。

3. 研究の方法

本研究では、実頭とテレヘッドを用いた単耳受聴状態での水平面音像定位実験を行い、受聴者の HRTF と実験結果を総合することにより、単耳受聴時には HRTF の SCs が水平面の音像位置を決定する音響手がかりとして利用されることを示す。

4. 研究成果

(1) 実験システムの構築

単耳受聴条件における音像定位位置と移動する音像軌跡を測定する実験システムを整備し、健聴者が片耳を耳栓で閉塞した単耳受聴状態で、受聴時に頭部を静止した場合の音像定位実験と受聴時に頭部を時計回りあるいは反時計回りに 60° 回転させた場合の音像軌跡と、頭部を 10° ごとに水平回転したときの音像方位を測定するシステムを構築した。また、最新の超小型動電型スピーカードラ - バユニットの音響特性を明らかにするとともに新しいマイクロホンアレイを整備し、受聴者の HRTF を相反法を用いて従来のシステムよりも短時間、広帯域、かつ安定して測定できるようにした。

また、耳栓を装着したときに単耳受聴状態を確保することを担保する手順を定めた。すなわち、受聴者の両耳に耳栓を装着し、右または左耳の真横 1 m の位置に置いたラウドスピーカからある A 特性補正音圧レベル (L_A) で呈示した白色雑音が全く聴こえないことを確認する。その後片耳の耳栓を外すことにより、単耳受聴状態を確保できる。また、耳栓の遮音量は、両耳に耳栓を装着した時と耳栓を装着しない時の最小可聴閾値を比較することにより得た。発泡ウレタン製の耳栓 (Purafit, Moldex) の遮音量は 35 ~ 50 dB で、白色雑音の L_A が 40 dB 以下であれば全ての受聴者に対して単耳受聴状態を確保できた。

(2) 頭部静止条件での水平面音像定位実験

両耳受聴状態と単耳受聴状態の水平面音像定位実験を頭部静止条件で行った。半径 1 m の水平面円周上に 30° 間隔で 12 方向に設置した 12 個のラウドスピーカから、立ち上がり立ち下がり 30 ms の線形テーパをかけた持続時間 3 s の、 L_A が 70 dB あるいは 40 dB の白色雑音を呈示し、受聴者に知覚した音像の方位を回答させた。両耳受聴状態では、いずれの L_A でも定位正答率は 97%であった。片耳に耳栓を装着した状態では、 L_A が 70 dB の定位正答率は 71%、

L_A が 40 dB の定位正答率は 37%であった。 L_A が 40 dB の場合は完全な単耳受聴状態であるが、 L_A が 70 dB の場合は耳栓を装着下側の耳にも減衰した刺激音が入力される不完全な単耳受聴状態あるいは不完全な両耳受聴状態といえる。この状態では、耳栓の遮音量が 30 ~ 50 dB あるので、ILD は ± 20 dB を越える極端な値になっていると考えられる。一方、 L_A が 70 dB の刺激音の 1/3 oct.帯域スペクトルのレベルは低域で最小可聴閾値を超えるので、ITD は聴覚系内で計算されている可能性がある。従って、刺激音の L_A が 70 dB の不完全な単耳受聴状態では、受聴者はこの ITD も手がかりにして水平面の音像定位をしたと考えられる。

(3) 頭部回転条件での水平面音像定位実験

両耳受聴状態と単耳受聴状態の水平面音像定位実験を、刺激音の呈示中に頭部を正面から ± 60 度回転する条件で行った。両耳受聴状態では近傍角度への定位誤りが減少し、いずれの L_A でも定位正答率は 99%であった。耳栓を片耳に装着した状態では、いずれの L_A でも、刺激音の呈示方位によっては頭部回転に伴って音像が動き、音像を定位できなかった。特に、 L_A が 40 dB の刺激音では、ほとんどの刺激音呈示方位の刺激音の音像が頭部回転に伴って動いた。そして、刺激音の L_A を 50 dB, 60 dB と上げると、頭部回転に伴って音像が動く刺激音呈示方位は少なくなり、頭部を回しても音像が定位する刺激音呈示方位が増えていった。 L_A が 70 dB の刺激音では、耳栓を装着した閉塞耳の斜め後方から呈示した刺激音の音像だけが頭部回転に伴って動いた。

この結果は、頭部を動かして刺激音を受聴すると音像が動くか動かないかを判断させることにより、耳栓で片耳を閉塞した状態が両耳受聴状態にあるのか単耳受聴状態にあるのかを判別できることを示す。この方法を利用して両耳・単耳受聴状態の判別を行った結果、受聴者の高域の最小可聴閾値が、単耳受聴状態を確保する刺激音の音圧レベルに影響することが判った。また、刺激音の呈示レベルを上げると不完全な両耳受聴状態になるということは、聴力が低下している側の耳に入力する音の音圧レベルを補聴器で上げることにより、音像定位が可能になることを示唆する。

他人のダミーヘッドを搭載したテレヘッドを用いて収録したバイノーラル信号の片チャンネルだけをヘッドホンで動的モノラル再生する条件で音像定位実験を行った。実耳受聴した場合と同様に、ダミーヘッドを受聴者の頭部回転に追従して回転させると音像は頭部回転に伴って開放耳半面で動き、閉塞耳半面にある音源が開放耳半面に来るようにダミーヘッドを回転した場合に音像が大きく動いた。しかし、頭部回転に伴って知覚される音像の移動角度は、片耳を耳栓で閉塞した実耳で受聴した場合よりも小さかった。これは、テレヘッドに搭載した他人のダミーヘッドの耳介形状が受聴者の耳介形状と異なるためと考えられる。HRTF の SCs は個人個人の耳介形状に応じたものであり、脳は音の到来方位と耳介形状に対応した音響の手がかりとの対応関係を個別に学習していると推測される。

(4) 単耳受聴状態における頭部回転に伴う音像の移動軌跡

単耳受聴状態で、頭部回転条件で L_A が 40 dB の刺激音を受聴したときの音像軌跡を記録した。その結果、受聴者に依らず、頭部回転によって刺激音の呈示方位が閉塞耳半面と開放耳半面の境界を横切る場合に頭部回転に伴う音像の移動角度は大きく、刺激音の呈示方位が閉塞耳半面あるいは開放耳半面内にとどまる場合は、頭部回転に伴う音像の移動角度は小さかった。さらに、頭部回転によって音像が大きく移動する場合には、音像が二つに分離して知覚された直後に音像位置が跳躍したように知覚されることがあった。なお、頭部回転に伴う音像の移動角度の多寡は受聴者による違いが大きかった。これは実験方法や実験手順によるものではなく、耳介形状が規定する SCs の違いに因るものと考えられる。

HRTF は主として頭部形状と耳介形状によって規定されるためにその個人差は大きい。特に、個人差が大きい耳介形状が規定する同側の HRTF の高域周波数に出現するピークやノッチ周波数の個人差は大きい。これに対して、頭部によって遮蔽される対側の HRTF は個人に依らず高域の利得が低い。特に、測定耳の対側後方の HRTF には 1 ~ 2kHz に深いノッチがあり、測定耳と同側後方の HRTF は 5 kHz 以上の利得が低い。したがって、開放耳の対側後方から呈示された刺激音は、開放耳における実効的な L_A が低い。この対側後方にある音源位置が、頭部回転に伴って開放耳から見える方位に来ると、開放耳の SCs から音像方位を計算できるようになる。そのため、音源が開放耳が見えない位置にあったときには曖昧だった音像の方位が確定するために、動く音像が知覚されたと考えられる。また、刺激音の L_A を高くすると、閉塞耳の低域に刺激音が入力されて不完全な両耳受聴状態になり、ITD を利用して音像方位を計算できるようになる。その結果、頭部回転にともなって生じる ΔITD も利用可能になり音像が定位したと考えられる。

(5) 頭部伝達関数と音像定位結果の関係

受聴者の HRTF を測定し分析した結果、水平面の HRTF の高域に現れるスペクトルのピークとディップの位置が受聴者によって異なることを確認した。そして、正面を向いた受聴者の水平面 HRTF と受聴者が頭部を θ 度回転させたときの音源位置の HRTF とのスペクトル距離が最小となる HRTF の水平角を求めると、それは概ね受聴者が音像を定位した方位と一致した。この結果は、受聴者の脳は、SCs のマッチングによって音像方位を計算していることを示唆する。

SCs は、正中面上にある音像の仰角を判断する音響手がかりとして知られているが、ITD と ILD という両耳聴手がかりが利用できない、あるいは異常な値である場合には、水平面上にある音像の方位角を判断するためにも利用されると考えられる。

(6) モノラル立体音再生システムの設計指針

刺激音に個人の HRTF に含まれる SCs を与えることにより水平面の立体音像をモノラル再生することは可能である。ただし、完全な単耳受聴状態を実現することが必要である。イヤホンの音響クロストーク量は、密閉型のヘッドホンや挿入型イヤホンでは最大 - 60 dB で、開放型ヘッドホンやイントラコンカ型イヤホンでは - 30 ~ - 50 dB 程度である。すなわち、例えば 70 dB の刺激音を片耳に呈示すると、10 ~ 40 dB の強さの刺激音が反対側の耳にも入力される状態にある。したがって、完全な単耳受聴状態を実現するためには、音響クロストークが少ないイヤホンを選択し、刺激音の呈示音圧レベルを低くする必要がある。

頭部回転運動を反映した動的バイノーラル信号は、バイノーラル立体音再生システムの音響的制約を緩和するとともに正確な音像定位を実現することに寄与した。しかし、頭部回転運動を反映した動的モノラル信号は、モノラル立体音再生システムにおいては役に立たない。すなわち、単耳受聴状態で頭部を回転させると音像は移動し、定位しなくなる。したがって、モノラル立体音再生システムにおいては静的モノラル信号を使用する必要がある。そして、静的モノラル信号の合成に受聴者個人の HRTF を用いると正確なモノラル立体音像の呈示が可能であるが、他人あるいは一般化された HRTF を用いると、再生音像の定位位置は曖昧になる。

以上のことを考慮すると、単耳受聴状態が担保できる片耳難聴者用の補聴器などにおいてモノラル立体音再生システムを組みこむことは十分可能と考えられるが、両耳聴手がかりが利用できる健聴者用のさまざまな通信機器や視覚障害者用の音響ナビゲーション装置などにモノラル立体音再生システムを組みこむことはむづかしいと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 平原達也	4. 巻 73
2. 論文標題 両耳インパルス応答の測定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本音響学会誌	6. 最初と最後の頁 172-179
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 平原達也
2. 発表標題 音像位置の「計算」に用いられる音響てがかりについての論考
3. 学会等名 日本音響学会 聴覚研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平原達也
2. 発表標題 耳と音響実験機器のエイジング
3. 学会等名 日本音響学会 聴覚研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平原達也, 渡辺 亮, 森川大輔
2. 発表標題 モノラル音像定位おける頭部運動の効果
3. 学会等名 日本音響学会 2019年春季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森川大輔, 粟田隼平, 平原達也
2. 発表標題 スピーカアレイによる反射の低減
3. 学会等名 日本音響学会 2018年秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatsuya Hirahara, Daiki Kojima, Daisuke Morikawa
2. 発表標題 Monaural sound localization under conditions of active head rotation
3. 学会等名 The New Zealand/Japan Joint Research Meeting on Psychological & Physiological Acoustics and Electroacoustics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 寺島眞生, 森川大輔, 平原達也
2. 発表標題 USBオーディオインタフェースを用いた頭部伝達関数の高速計測システム
3. 学会等名 音学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森川大輔, 小島大輝, 平原達也
2. 発表標題 単耳受聴時の音像の分離知
3. 学会等名 日本音響学会 2019年秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森川大輔, 小島大輝, 平原達也
2. 発表標題 単耳受聴時に生じる音像分離知覚
3. 学会等名 日本音響学会 聴覚研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daisuke Morikawa, Daiki Kojima and Tatsuya Hirahara
2. 発表標題 Spatial sound segregation in monaural listening condition
3. 学会等名 23rd International Congress on Acoustics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寺島眞生, 森川大輔, モクタリ パーハム, 平原達也
2. 発表標題 水平面上の頭部伝達関数および両耳聴手がかりの音源距離依存性
3. 学会等名 電子情報通信学会 応用音響研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寺島眞生, 森川大輔, モクタリ パーハム, 平原達也
2. 発表標題 相反法による頭部インパルス応答の高速計測システム
3. 学会等名 日本音響学会 2020年春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺島眞生, 森川大輔, 平原達也
2. 発表標題 両耳間時間差と両耳間音圧差の距離依存性
3. 学会等名 2019年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	森川 大輔 (Morikawa Daisuke) (70709146)	富山県立大学・工学部・講師 (23201)	