

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04225

研究課題名（和文）骨導立体音像定位システムを個別最適化する補正フィルタ及び適応的学習法の開発

研究課題名（英文）Development of correction filter for 3D spatial audio using bone conduction headphones

研究代表者

杉田 泰則 (Sugita, Yasunori)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30401780

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：骨導音による立体音像定位技術は、補聴器や視覚障害者の歩行支援システムなど、さまざまな応用が期待されている。本研究では、骨伝導ヘッドホンの音像定位技術の精度向上を目的として、まず、3D頭部モデルを用いた骨導音の頭内伝搬シミュレーションを実施した。またクロストークキャンセルと骨導伝達特性の補正を高精度に行うための補正フィルタを検討し、その有効性を被験者実験により検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

骨導音による立体音像定位技術は、補聴器や視覚障害者の歩行支援システムなど、さまざまな応用が期待されているが、気道音による音像定位技術ほど高い定位精度が得られていないのが現状である。本研究では、骨導音受聴での定位精度を向上させるための多くの知見が得られた。これらは、骨導音による補聴システムの音質改善や立体音像定位技術への応用、発展に貢献するものと期待される。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to improve the accuracy of the sound image localization technique using bone-conduction headphones. In order to improve the accuracy of sound localization technology for bone conduction headphones, we investigated a technique for highly accurate correction of crosstalk cancellation and pathway characteristics of bone conduction, and clarified its effectiveness through subject experiments.

研究分野：デジタル信号処理

キーワード：骨伝導 音像定位 クロストークキャンセル 3D頭部モデル FDTDシミュレーション

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

ヘッドホン/イヤホンを用いて頭の外に仮想的な音源を定位させる頭外音像定位技術は、3Dサラウンドシステムなどのエンターテインメント分野だけでなく、視覚障害者の歩行を補助する音声案内システム、脳波による車いす制御やコンピュータへの入力作業をサポートするブレイン・マシン・インタフェースなど、福祉分野への応用も期待されている。しかし、これまでの頭外音像定位研究は、通常のヘッドホン/イヤホンの使用を前提としており、鼓膜を介して音を聞く気道音によるものが殆どである(以下、通常のヘッドホンを気道ヘッドホンと呼ぶ)。気道ヘッドホンを用いる場合、個人のHRTF(Head-Related Transfer Function: 頭部伝達関数)を利用することで高い定位精度を実現できるが、視覚障害者は周りの音の微妙な変化を捕らえることで周辺状況の把握を行っており、情報の入力源である耳を塞がれる気道ヘッドホンの使用には大きな抵抗がある。HRTFとは、音波が頭部や身体、耳介などでの反射や回折を経て聴取者の外耳道入口に到来するまでの伝達特性を記述したものである。

近年、耳を塞ぐことのない骨伝導ヘッドホンを用いた「骨導立体音像定位」に関する研究も行われているが、その多くは、HRTFを畳み込んだ信号を骨導アクチュエータにより側頭骨から呈示するものが殆どである。我々のこれまでの研究では、気道伝達特性(外耳道入口から蝸牛までの伝達特性)と骨導伝達特性(骨導アクチュエータの加振部位から蝸牛までの伝達特性)を線形フィルタによりモデル化し、それを用いて補正フィルタを構築することで定位精度が向上することを確認している。しかしながら、現状での定位精度は約60%程度に留まっている。その原因として、骨伝導ヘッドホンでは、右側で加振した振動が左の蝸牛に、左側で加振した振動が右の蝸牛に到達するといったクロストークを生じることが考えられる。気導ヘッドホンでは、このクロストークは生じない。

2. 研究の目的

本研究では、骨導音の場合に生じるクロストークに着目し、それらの定位精度への影響を調査し、精度の高い骨導立体音像定位システムの開発を目指す。

3. 研究の方法

(1) 骨導音伝搬経路の調査:

骨導音の伝搬過程は気導音よりも複雑であり、骨導音が人体内部(特に頭内)をどのように伝搬しているか、またヒトがどのように骨導音を知覚しているか、そのメカニズムは不明な点も多い。そこで、3次元頭部モデルによる骨導音伝搬シミュレータを構築し、様々な条件下でのシミュレーションを実施するとともに、両耳間ラウドネスマッチングを用いた被験者実験により骨導音成分の調査を行なう。これにより、骨導音の伝搬経路や骨導音知覚メカニズムの解明に繋がる重要な手掛かりを得る。

(2) クロストーク除去手法の検討:

骨導音によって高い精度での音像定位を実現するためには、クロストークに加えて骨導伝達特性を補正する必要があると考えられる。そこで、クロストークキャンセルと骨導伝達特性の補正を同時に実現するために、1) 既存のクロストークキャンセル手法[1]に、骨導伝達特性を補正するための逆フィルタを組み合わせた手法、そして新たに2) トランスオーラルシステムの原理に基づく手法、の2つを検討し、その有効性を調査・明らかにする。

文献[1] IRWANSYAH, TSUYOSHI USAGAWA: "Bone conduction microphone measures in the external auditory canal: An application for implementing cross-talk cancellation for bone-conducted sound", *Acoustical Science and Technology*, Vol.5, pp.356-359 (2019)

4. 研究成果

(1) 骨導音伝搬経路の調査:

まず、Visible Human Project (<http://vhnet.nlm.nih.gov/>) 提供の頭部断面カラー画像を使用して、図1に示すような9つの頭内組織(皮質骨、軟骨、軟組織、象牙質、板間層、脳髄液、脳、内耳、眼球)から成る3次元頭部モデルを作成し、EFDTD(Elastic Finite-Difference Time-Domain)を用いて詳細なシミュレーションを行なった。図2、図3にシミュレーション条件と得られた結果の一例を示す。ここでは、左右の乳様突起部を骨伝導ヘッドホンの加振部位として、右側内耳での加速度応答を測定した結果の例を示す。図3より、周波数によってばらつきはあるものの、乳様突起部を加振部位とした場合、大凡5dB~30dB程度の減衰を伴って骨導

音呈示側とは逆の蝸牛に振動が届いている（クロストークが生じている）ことが確認された。また、骨導知覚寄与成分の調査では、両耳間ラウドネスマッチングを用いた外耳道内音圧の測定や誘発耳音響放射（TEOAE）の測定を実施し、その結果、健聴者においては、骨導音聴取における骨導成分は「完全な骨導経路成分（歯 頭蓋骨 蝸牛の経路成分）」が音の知覚に大きく寄与していることが明らかになった。

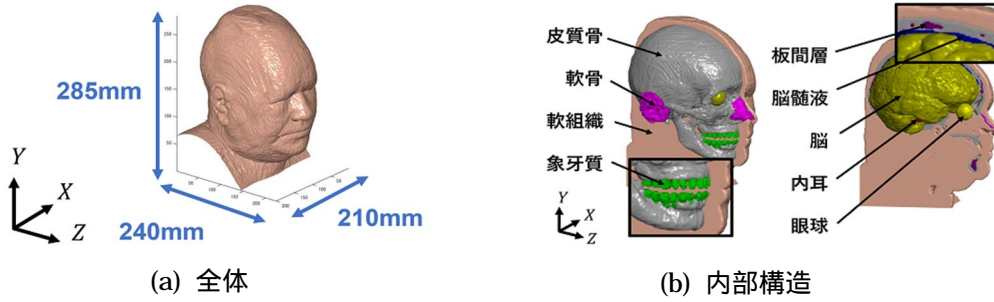


図 1： 3D 頭部モデル

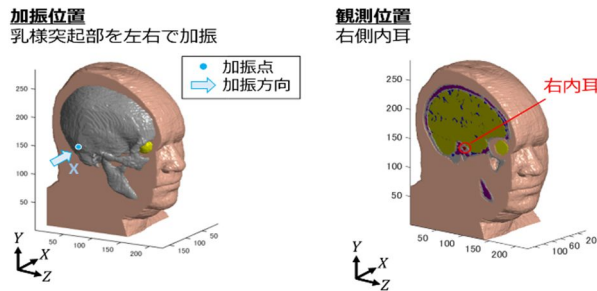


図 2： 加振点と観測点

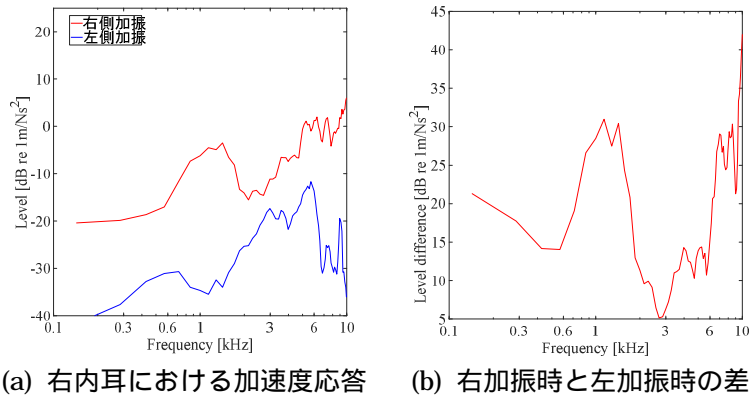


図 3： 蝸牛における加速度応答

(2) クロストーク除去手法の検討：

図 4 に、従来のクロストークキャンセル手法に、骨導伝達特性を補正するための逆フィルタを組み合わせた手法(手法 1) 2)トランスオーラルシステムの原理に基づく手法(手法 2) のブロック図を示す。図において、 $H_{L,l}(\omega)$ 、 $H_{L,r}(\omega)$ は左側の骨伝導トランスデューサーから左側の蝸牛、右側の蝸牛までの伝達特性であり、 $H_{R,r}(\omega)$ 、 $H_{R,l}(\omega)$ は右側の骨伝導トランスデューサーから右側の蝸牛、左側の蝸牛までの骨導伝達特性である。また図 4(a)において、 $H_{wr}(\omega)$ 、 $H_{wl}(\omega)$ は文献で提案されているクロストークを抑制するためのクロストーク補償フ

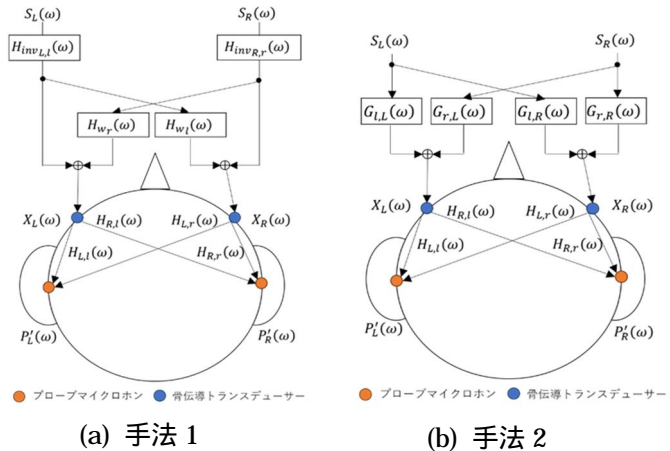


図 4： クロストークキャンセル手法

フィルタであり、 $H_{invL,l}(\omega)$ 、 $H_{invR,r}(\omega)$ は新たに追加された骨導伝達特性（骨伝導ヘッドホンから蝸牛までの伝達特性）を補正するためのフィルタである。これらのフィルタは、事前に測定した骨導伝達特性を用いて設計できる。図 4(b)は、音場再現などに用いられるトランスオーラルシステムに基づくクロストークキャンセル手法であり、フィルタ $G_{l,L}(\omega)$ 、 $G_{r,L}(\omega)$ 、 $G_{l,R}(\omega)$ 、 $G_{r,R}(\omega)$ は骨導伝達特性を用いて次式で求めされる。

$$G_{l,L}(\omega) = \frac{H_{R,r}(\omega)}{H_{L,l}(\omega)H_{R,r}(\omega) - H_{L,r}(\omega)H_{R,l}(\omega)}$$

$$G_{r,L}(\omega) = \frac{-H_{R,l}(\omega)}{H_{L,l}(\omega)H_{R,r}(\omega) - H_{L,r}(\omega)H_{R,l}(\omega)}$$

$$G_{l,R}(\omega) = \frac{-H_{L,r}(\omega)}{H_{L,l}(\omega)H_{R,r}(\omega) - H_{L,r}(\omega)H_{R,l}(\omega)}$$

$$G_{r,R}(\omega) = \frac{H_{L,l}(\omega)}{H_{L,l}(\omega)H_{R,r}(\omega) - H_{L,r}(\omega)H_{R,l}(\omega)}$$

2つの手法を用いて、被験者7名に対してクロストークキャンセルの性能評価を実施した結果、手法1では5~10dBほど、手法2では10~30dBほどのクロストーク成分をキャンセルできることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Saito Shuji, Sugita Yasunori	4. 巻 184
2. 論文標題 Spline nonlinear adaptive filters considering cross terms	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Signal Processing	6. 最初と最後の頁 108054 ~ 108054
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sigpro.2021.108054	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Nishimoto Kakeru, Sugita Yasunori	4. 巻 26
2. 論文標題 Efficiency Evaluation of Bone Conduction Devices Using Three-Dimensional Finite-Difference Time-Domain Head Model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Signal Processing	6. 最初と最後の頁 177 ~ 182
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2299/jsp.26.177	査読の有無 有
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13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 西元翔, 杉田泰則
2. 発表標題 側頭部装着型骨伝導イヤホン使用時の頭内骨導音伝搬解析
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀江智陽, 杉田泰則
2. 発表標題 歯骨伝導による音知覚に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤田啓吾, 杉田泰則
2. 発表標題 パーチャルマイク法を用いた非線形ANCシステムに関する一検討
3. 学会等名 電気学会制御研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阿久津祐稀, 杉田泰則
2. 発表標題 交差項を考慮した一般化スプライン非線形適応フィルタ
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 阿久津祐稀, 杉田泰則
2. 発表標題 L1正則化を用いた一般化スプライン非線形適応フィルタ
3. 学会等名 電気学会 制御研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阿久津祐稀, 杉田泰則
2. 発表標題 非線形システム同定のためのカスケード型スプライン適応フィルタの検討
3. 学会等名 電気学会 制御研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村晃, 杉田泰則
2. 発表標題 骨導音を用いた音像定位における音像スウィング法の適用に関する検討
3. 学会等名 電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西村晃, 杉田泰則
2. 発表標題 骨導音を用いた音像定位における音像スウィング法の切り替え時間に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福森美月, 矢田雅人, 杉田泰則
2. 発表標題 歯骨導音で知覚される音像定位の評価
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 矢田雅人, 杉田泰則
2. 発表標題 歯骨伝導における骨導音知覚寄与成分の調査・検討
3. 学会等名 令和5年度電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akutsu Yuki, Saitou Shuji, Sugita Yasunori
2. 発表標題 Spline nonlinear adaptive filter with cross-terms
3. 学会等名 Proceedings of 27th IEEE International Conference on Electronics Circuits and Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kakeru Nishimoto, Yasunori Sugita
2. 発表標題 A Study on the Usefulness of Dental Bone Guidance by Numerical Analysis
3. 学会等名 Proceedings of The 2022 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keigo Fujita, Yasunori Sugita
2. 発表標題 A Cascaded Spline Nonlinear Adaptive Filter Using L1 Norm Optimization
3. 学会等名 Proceedings of The 2021 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (国際学会)
4. 発表年 2021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	越田 俊介 (Koshi ta Shunsuke) (70431533)	八戸工業大学・大学院工学研究科・准教授 (31103)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------