

氏 名 小木曾 里樹

学位の種類 博士（人間情報学）

学位記番号 博甲第9214号

学位授与年月 平成31年3月25日

学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当（昭和28年4月1日文部省令第9号）

審査組織 グローバル教育院

学位論文題目 聴覚補完のための骨導振動子センサレス接触圧力推定法に関する研究

（大学名 職名）

（学位）

（氏名）

主査 筑波大学・教授 工学博士 水谷孝一

副査 筑波大学・准教授 博士（工学） 若槻尚斗

副査 筑波大学・助教 博士（工学） 善甫啓一

副査 筑波大学・教授 博士（感性科学） 山中敏正

副査 筑波大学・教授 博士（心理学） 綾部早穂

論文の要旨

本研究はヒトの骨導音知覚特性予測を目指し、骨導振動子を介してヒトの振動特性を計測することで、骨導振動子の接触圧力をセンサレスで推定する手法の確立を目的として実施され、聴覚分野を始めとする人間情報学に関する分野において有効な成果を得ている。

第1章では、研究背景について骨伝導による音知覚を概説するとともに、骨導音の知覚特性は接触圧力に影響を受けること等、研究の必要性が示されている。

第2章では、骨導振動子を用いる音提示の問題点が実験により示され、接触圧力等の評価が必要であることが指摘されている。そのための接触圧力推定法として骨導振動子の電気インピーダンスを用いる接触圧力及び毛髪量の推定原理を示し、接触圧力及び毛髪量の変化による電気インピーダンスの変化とこれを用いる接触圧力・毛髪量の推定法を提案されている。

骨導振動子を用いる音提示の例として立体音響提示において、気導音と骨導音の特性差を計測する手法が提案され、これを用いて計測した特性差を補正することで骨導音の音像定位特性の改善が検討されている。その結果、提案された特性差の補正手法では骨導音の音像定位特性の変化が見られず、骨導音に影響する要素が多数あることから、接触圧力等の骨導音提示条件を定量的に評価する必要があることが示された。本論文では、これに対しヒトの機械インピーダンスは接触圧力で変化することを仮定して、この変化を骨導振動子の電気インピーダンスを介して計測する手法を提案

している。電気インピーダンスの変化については接触圧力・毛髪量以外の変化を防ぐため、ヒトの毛髪・皮膚・骨を模したファントムを対象として実験が行われている。実験では、接触圧力と毛髪量により電気インピーダンスが変化することを確認するため、接触圧力 0-5 N、毛髪量 0-169.6 mm³ の範囲について 70 コ条件で計測している。電気インピーダンスは骨導音による可聴域を網羅するため、10 Hz-60 kHz について対数スケールで 500 点計測された。その結果、電気インピーダンスには 4 箇所ピークが見られ、これらが接触圧力及び毛髪量によって変化することが示された。また、3 層からなるニューラルネットワークにこれら関係を学習させ、電気インピーダンスから接触圧力及び毛髪量を推定する手法も提案されている。この手法を実験結果に適用することで、接触圧力及び毛髪量を推定した結果、各々平均で 0.025 N、0.424 mm³ で推定可能であることが示された。これら推定誤差は推定の対象とする範囲に対し十分小さく、提案法により推定が可能であるとの結論が得られている。

第 3 章では、ヒトを対象として電気インピーダンスから接触圧力を推定する提案法を評価している。まず電気インピーダンスと接触圧力の関係について、12 人の被験者を対象とする実験が行われた。電気インピーダンスの計測は 10 Hz-60 kHz について対数スケールで 300 点計測された。その結果、すべての被験者についてピークが 4 箇所に見られ、接触圧力によるピークの変化が被験者に共通して現れることが確認された。つぎにニューラルネットワークを用いる接触圧力推定法を適用し、その推定誤差を評価している。その結果、推定結果の 91.7% が国際規格で必要とされる ± 0.5 N 以内であることから実用的な推定精度を達成可能であることが示された。

第 4 章では、前章で課題とされた物理的妥当性の担保に対し、物理モデルを用いる接触圧力推定法を提案している。ニューラルネットワークを用いる場合は物理的な妥当性がデータのみ依存しており、十分なデータが得られない場合には推定が的外れになる可能性があった。これに対して前章まで計測された電気インピーダンスを表す物理モデルを提案し、この妥当性を確認している。その結果、提案モデルによってピークのうち特に接触圧力による変化の大きい 2 つのピークを再現できることが示された。つぎに、このモデルを用いて電気インピーダンスから物理パラメータを同定し、これと接触圧力の関係を最小二乗法により求めることで接触圧力を推定する手法が提案された。この手法の推定精度を評価するため、提案法を 0.3 N と 0.5 N で得た電気インピーダンスで校正した後、その推定精度を評価している。その結果、推定結果の 97.1% は ± 0.5 N 以内であり、十分実用的な推定が可能であることが示された。さらに提案手法の有用性を示すため、提案手法を用いて骨導振動子を用いる音の提示を行い、左右耳に装着した振動子の接触圧力と音像知覚方向の関係を調べている。音像の知覚方向は音像が正面に定位するときの ILD として計測された。その結果、左右の振動子の接触圧力差と音像が正面に定位する ILD には 1 kHz 以上程度の周波数で相関があることが示された。これにより、提案手法を用いることで骨導振動子を用いる場合の音像定位方向を予測でき、左右の接触圧力として定量的に実験条件を評価できる可能性が示された。

以上から、本研究では骨導振動子の電気インピーダンスから接触圧力を推定する手法を確立したと結論づけている。本研究の成果は聴力検査、補聴器のイコライジングなど聴覚補完の分野に貢献することが期待される。

第 5 章では、本研究の総括がなされている。

審査の要旨

【批評】

本論文は骨導振動子の接触圧力によってヒトの知覚する音が変化することに着目し、接触圧力をセンサレスで推定する手法を確立してヒトの骨導音知覚特性を予測する試みに関するものである。

立体音響計測に関する実験から骨導音を用いる場合の問題点を提起し、このうち接触圧力に対して振動子の電気インピーダンスを用いるセンサレス接触圧力推定法を提案している。これまでは振動子の他に圧力センサを別途用いて接触圧力を計測することが常識とされるなか、本論文では骨導振動子の電気インピーダンスを計測することで骨導振動子自体をセンサとして使用する手法を提案しており、独創的であるとともに、追加のセンサが不要となるため実用的で有効である。本論文では、まずヒトの皮膚表面を模したファントムを対象として実験を行い、接触圧力と骨導振動子の端子間電気インピーダンスに関係があることを示している。また、ファントムを対象として振動子と皮膚の間にはさまる毛髪量についてもその影響を検討しており、毛髪の影響は接触圧力が大きい場合には無視できることを再現性ある実験で示している。これをもとにヒトを対象とした場合の電気インピーダンスを計測し、個人差によらず共通する接触圧力による変化の傾向を明らかにしている。これをもとにした提案法ではニューラルネットワークを用いて電気インピーダンスと接触圧力の関係を学習させ、実用的な精度で接触圧力を推定できることを示したことは評価に値する。

本論文は、ヒトの機能に関する計測に留まらず、ヒトの振動特性を考慮しこれを含むモデルを用いることで、ニューラルネットワークを用いる場合の課題である学習データに対する提案法の依存性を解消するよう提案法の一般化を行っている。特に物理モデルを用いる接触圧力推定法では、2質点系として表現できる骨導振動子一般に適用できるよう提案法の適用可能範囲を広げるとともに、物理モデルにより提案法の限界を明らかにしている。また、以上で提案した接触圧力推定法が骨導音の知覚へどのように貢献するかを示すため、一例としてヒトの両耳に骨導振動子を装着した場合の音知覚との関係性を評価している。この実験から提案法によって計測した接触圧力と骨導音を正面に知覚する際の左右振動子に加える電圧について計測を行い、これらに相関があることを示しており、これは提案法が接触圧力推定への貢献のみにとどまらず、骨導音知覚の特性予測に広く適用できる基盤となる可能性を示している。本論文で提案された（計測のために追加のセンサが必要ないという意味において）センサレスな接触圧力推定法とこれによるヒトの知覚特性の予測は、骨導音知覚においてこれまで経験的に調節されてきた接触圧力を定量的に評価可能とするものであり、今後も聴覚分野はじめ様々な人間情報学分野への展望が期待できることから高く評価できる。

【最終試験の結果】

平成31年2月7日、専門委員会において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（人間情報学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。