

令和 6 年 6 月 16 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K12745

研究課題名（和文）遅延聴覚フィードバックが与える影響の客観的評価と老人性難聴用補聴器への応用

研究課題名（英文）Objective evaluation of effects of delayed auditory feedback and its application to hearing aids for elderly people

研究代表者

村上 隆啓（MURAKAMI, Takahiro）

明治大学・理工学部・専任講師

研究者番号：50409463

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題は、老人性難聴用補聴器の改善に関するものである。本研究ではまず、自身が発した音が遅れて聞こえる遅延聴覚フィードバックが起きている場合の影響を調べるために、そのときの違和感を主観的に評価する実験を比較的大規模に実施し、大学生を中心とした若年者と比較して60歳以上の高齢者では違和感の発生しづらさに有意差があることを示した。次に、より細かい調査を実施するために、これを客観的に評価するためのボタン押し課題および装置を開発し、大雑把であるがボタン押し課題によって年齢による影響の差を測定できることを確認した。また、上記の調査および補聴器の性能改善と関連した音響信号処理技術も新たに開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

加齢に伴う聴力の衰えである老人性難聴は、近年になって認知症リスクの上昇につながる可能性が指摘されていて、それを補助するための補聴器の利用が推奨されている。しかし、補聴器の普及率は非常に低い。その理由は、利用者の期待と比較して補聴器の性能が十分ではないためと考えられる。補聴器の性能が限定的な理由の一つに、補聴器に許容される入出力音の時間差が非常に短いことが考えられる。本研究課題は、この時間差の許容量が老人性難聴の場合には比較的長く設定できる可能性を示すものである。本研究課題で得られた結果により、この時間差を長く設定できるようになり、それによって補聴器の性能の大幅な改善が期待される。

研究成果の概要（英文）：This research aims to improve hearing aids for age-related hearing loss. In this research, we first investigated the effects of delayed auditory feedback (DAF) by subjective evaluation. The DAF means that sounds generated by a person, such as voices and sounds related to body movements, arrive at an auditory sense. The subjective evaluation by elderly and young people revealed that elderly people tend to feel less discomfort by the DAF in comparison to young people. Next, for the detailed investigation of the effect of the DAF, we developed a method of objective evaluation using a button pressing task. From the objective evaluation by elderly and young people, it was shown that the button pressing task can measure differences of the effect of the DAF between elderly and young people. In addition, related to the methods of subjective and objective evaluation and improvement of the performance of hearing aids, we developed a number of algorithms of acoustic signal processing.

研究分野：医療福祉工学

キーワード：老人性難聴 補聴器 遅延聴覚フィードバック 客観評価 マイクロホンアレー校正 非負値行列因子分解 到来方向推定 phase vocoder

1. 研究開始当初の背景

年齢の上昇に伴って起きる聴覚器官の衰えは「老人性難聴」と呼ばれる。老人性難聴では、広く知られている高い周波数からの感度の低下以外にも、表1のような機能の低下が見られる。これらの機能の低下は、周囲とのコミュニケーションがとりづらくなるなどの問題を発生させたり、近年は認知症リスクを高める可能性が指摘されたりしている。そのため、老人性難聴による機能の低下を補うための補聴器の需要は高まっているはずであるが、実際の補聴器の普及率は15%以下と非常に低い。また、補聴器使用者の満足度も40%以下となっていて、使用者の満足度の低さが普及率低下の一因になっていると考えられる。現在の補聴器には、デジタル信号処理技術を応用した様々な音響処理技術が実装されているが、これらの技術による性能改善が補聴器使用者にとっては満足度が向上するほどには感じられていないものと思われる。

補聴器においてデジタル信号処理技術による性能の改善があまり実感できない原因の一つに、補聴器に入力される音と補聴器から出力される音の間の時間差が10ミリ秒を超えないように設計されていることが考えられる。一般に、デジタル信号処理技術では入力信号を時間領域のまま処理するよりも、時間周波数領域に変換した方が複雑な処理を行える。そして、処理系に入力される信号と出力される信号の時間差が大きいほど、時間周波数領域ではより複雑な処理を行うことができる。しかし、10ミリ秒以下の入出力時間差は、一般的な音響信号を時間周波数領域で処理するには短い。そのため、補聴器ではデジタル信号処理による性能の改善幅が限定的になっていると考えられる。

一方、老人性難聴では、表1に見られるように感度低下以外にも様々な機能の低下が見られる。中でも、時間分解能の低下からは、用途を老人性難聴に限定した補聴器の場合に現行品における入出力時間差の制限を緩和できる可能性が読み取れる。そこで、本研究課題の準備段階に位置付けられる研究において、自身が発話した音声が遅延して聴覚に届く遅延聴覚フィードバック(DAF)発生装置を開発し、60歳以上の高齢者および大学生を中心とした若年者を被験者としたDAF発生時の朗読における違和感を主観的に評価する実験を実施した。その結果、高齢者ではDAF発生時の違和感がある程度覚える遅延時間が、若年者の場合と比較して大幅に長いことが示唆された。本研究課題では、この研究結果を発展させた仮説「補聴器の入出力時間差の許容量は、加齢による聴力損失の大きさに伴って増加する」の検証を行うこととした。

表1 老人性難聴の特徴

低下する機能	起きる症状
感度	小さい音が聞こえなくなる。
ダイナミックレンジ	小さい音は聞こえず、うるさい音は従来どおりうるさく聞こえる。
周波数分解能	複数の音が混ざると聞き取れなくなる。
時間分解能	機能低下前は早口と感じなかった音声を早口と感じるようになり、聞き取れなくなる。

2. 研究の目的

本研究課題では、以下の4点を明らかにすることを目的とした。

(1) DAFが身体運動に与える影響の主観的評価実験における高齢者と若年者の結果の統計的な有意差の確認

(2) DAFが身体運動に与える影響の客観的評価方法の確立

(3) 加齢による聴力損失とDAFにおける許容遅延時間の関係

(4) 聴力損失に合わせた補聴器の入出力時間差の上限の決定

上記(1)は、本研究課題の準備段階に位置付けられる研究において得られた結果について、統計的な有意差があるかを仮説検定によって確認するためのものである。過去の研究で得られた結果は、統計的な有意差を確認するには不十分な内容であったため、これを補完するための追加評価実験の実施を計画した。上記(2)は、DAFによる影響の主観的評価実験で得られた結果では個人差によるばらつきが大きくなる傾向が見られたため、このばらつきの発生を抑えた評価結果を得るために行うものであった。

3. 研究の方法

上記の目的に沿った研究の遂行を予定していたが、世界的なパンデミックによって人を対象とした評価実験を実施することができなくなった。特に、高齢者を対象とした評価実験が必要となる上記(1)および(2)を全く実施できなくなった。そのため、上記の研究計画を一部変更し、以下の4点を遂行することとした。

(a) 補聴器への実装を想定したデジタル信号処理技術の開発

(b) (パンデミックに終息の傾向が見られた場合を想定して) 上記(1)のための若年者を対象とした主観的評価実験および高齢者による結果との統計的な有意差の確認

(c) (パンデミック終息後を想定して) 上記(2)および(3)のためのボタン押し課題実験

装置の開発および実験方法の確立

上記 (a) では、補聴器における入出力時間差を現在よりも大きく設定できる場合を想定して、複数のマイクロホンを用いるマイクロホンアレーにおけるマイクロホン座標の簡便で正確な校正、1本のマイクロホンのみを用いた音の到来方向推定、話速変換(または再生速度変換)アルゴリズムにおける音質劣化の軽減などについて、それぞれ研究を遂行した。上記 (b) では、過去の研究で実施した高齢者を対象とした主観的評価実験において用いたものと同じの設定パラメータを若年者を対象とした評価実験でも用いることで、両者の統計的な有意差を仮説検定によって調査した。上記 (c) では、被験者が一定の時間間隔でボタンを押下するボタン押し課題において、ボタンを押下した際に発生する音をミリ秒単位で遅延させて被験者に聞かせるDAF発生装置およびそれを用いた実験方法の開発を行った。

4. 研究成果

(a) 補聴器への実装を想定したデジタル信号処理技術の開発

マイクロホンアレーの校正に関する研究では、マイクロホンアレーを構成する各マイクロホンの座標を正確に把握するためのアルゴリズムの開発を行った。マイクロホンアレーを用いたアレー信号処理では、1本のマイクロホンのみを用いた信号処理と比較して複雑な処理を行うことができるが、アレーを構成する各マイクロホンの座標を正確に把握する必要がある。そのため、実験室等において手作業でマイクロホンアレーを構成した場合、配置した座標には必ず誤差が含まれるため、この誤差を調整する校正を行わないとアレー信号処理性能が劣化する。従来は、校正のためには到来方向が既知である参照信号を2個以上用いる必要があった。本研究では、各マイクロホンの配置誤差がガウス分布に従うと仮定して、参照信号の到来方向が未知または到来方向そのものに誤差が含まれる場合でも各マイクロホンの座標を正確に推定する校正方法を開発した。図1に、提案法によって校正したマイクロホンアレーの座標を示す。この図において、「Nominal」は誤差がない理想的なマイクロホンの座標、「Actual」は誤差が含まれる実際の座標、「Proposed」は提案法によって校正したマイクロホンの座標である。この図より、提案法によってマイクロホンアレーの座標が効果的に校正されることが示された。

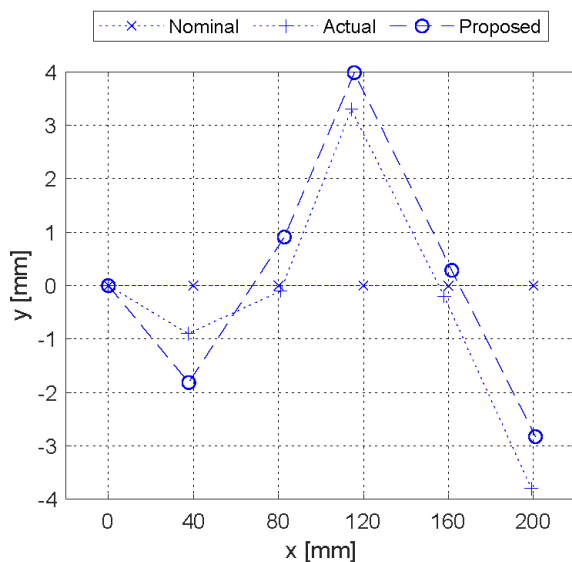


図1 提案法によって校正されたマイクロホンアレーの座標

1本のマイクロホンのみを用いた音の到来方向推定に関する研究では、マイクロホンの近傍に設置した平らな反射板を利用した方法の一般的な音響信号への拡張を行った。従来のアルゴリズムでは、対象となる信号の振幅スペクトルがガウス性白色雑音のようにほぼ一定値である必要があった。本研究では、中心極限定理を利用してこの方法を音声などの一般的な音響信号にも適用できるように拡張した。図2に、提案法の性能を確認したシミュレーションの結果を示す。この図において、横軸は真の到来方向、縦軸は到来方向の推定値、「True direction」は真の到来方向、「Proposed method」は提案法による推定結果、「Conventional method」は従来の方法による推定結果である。この図より、提案法によって到来方向推定性能が劇的に改善されることが示された。

話速変換(または再生速度変換)アルゴリズムにおける音質劣化の軽減に関する研究は、近年インターネット動画再生用アプリケーション等実装されている再生速度変換機能に関するものである。話速変換(または再生速度変換)とは、音響信号の音高(周波数)を変えずに速さ(または長さ)のみを変換する技術の総称であり、近年実装されている方法は時間領域で処理を行うものが主流である。時間領域話速での変換法は、単独話者による音声などの単一の音響信号に対しては少ない計算量で高音質な変換を行えるが、複数の音と同時に発生している一般的な音楽の信号などでは変換によって音質が大幅に劣化する。一方、時間周波数領域で処理を行う方法は、

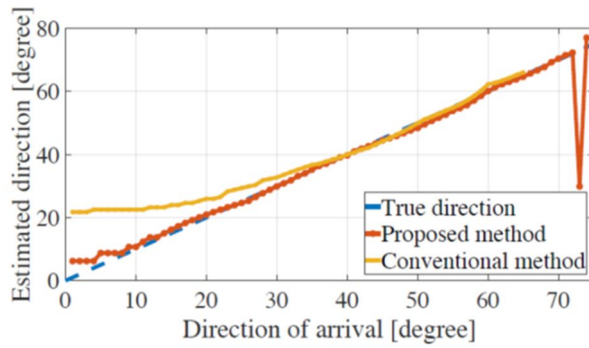


図2 1本のマイクロホンによる音の到来方向推定結果

複数の音が同時に含まれていても話速の変換が可能であるが、振幅が急峻に変化する音の場合は単独の音であっても音質が劣化する問題が知られている。本研究では、時間周波数領域での変換法の一つである phase vocoder と呼ばれるアルゴリズムについて、音質の劣化が発生する箇所である振幅が急激に変化する信号を変換する場合に変換前の音響信号のスペクトルをそのまま利用する新しい方法を開発した。図3に、提案法によって話速変換を行ったドラムスティックの打音の例を示す。この図において、上段は変換前の信号、中段は従来の phase vocoder による変換結果、下段は提案法による変換結果である。この図より、従来法では振幅がなだらかに変化する劣化が発生しているが、提案法では変換前と同様に振幅が急峻に変化していて、話速変換による音質の劣化を大幅に削減できることが示された。

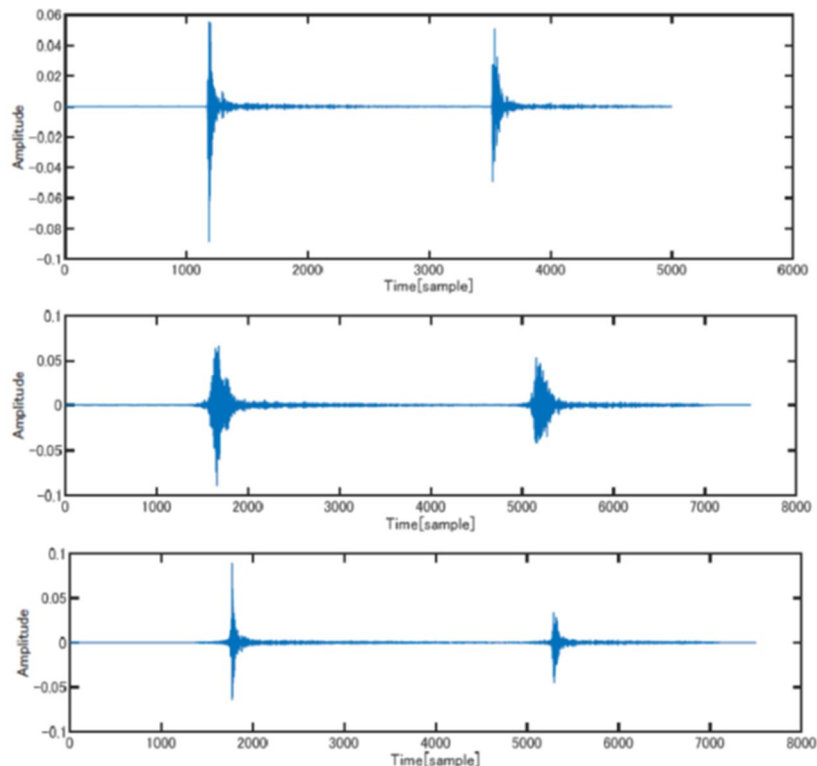


図3 ドラムスティックの打音の話速変換結果

(b) 若年者を対象としたD A F発生時の違和感の主観的評価実験および高齢者による結果との統計的有意差の確認

D A F発生時の朗読において覚える違和感を主観的に評価する実験を、大学生を中心とした若年者を対象に実施した。この主観的評価実験では、本研究課題の準備段階に位置付けられる研究によって開発したD A F発生装置および評価実験方法を用いた。この実験で使用したD A F発生装置は、自身が発話した音声ミリ秒単位で遅延して発話者自身に聞こえる、というものである。また、この評価実験では、表2に示す序数尺度を評価基準として用いる。そのため、この評価実験によって得られた結果から統計的有意差を調べるためには、比較対象に設定するパラメータを揃える必要がある。そこで、本研究では、過去の研究において高齢者を対象として実施した主観的評価実験で使用したパラメータを用いて、新たに評価実験を実施した。そして、得られた評価結果は、仮説検定の一つである2標本コルモゴロフ・スミルノフ検定によって統計的有意差を確認した。

表2 DAF発生時の影響の主観的評価実験に用いた評価基準

評点	「発話時にしゃべりにくくないか?」の評価基準(評価1)	「発話時に遅れが気にならないか?」の評価基準(評価2)
優(4点)	しゃべりにくくない	遅れがまったく分からない
良(3点)	しゃべりにくいが気にならない	遅れが分かるが気にならない
可(2点)	しゃべりにくい	遅れが気になる
不可(1点)	ともしゃべりにくい	遅れがはっきり分かる

得られた結果を表3に示す。この表において、網掛けとなっている項は統計的に有意な差があると判断されたものである。この表より、しゃべりにくさを評価する評価1では遅延時間が25ミリ秒以上で有意差が見られるが、遅れが気になるかを評価する評価2では遅延時間が8ミリ秒でも有意差が見られることが分かった。この結果から、高齢者と比較して、若年者ではDAFによる遅延がわずかな場合でもそれを感じてはいるが、それが発話等の身体運動に影響するのは10~20ミリ秒以上の遅延時間の場合である可能性が高いことが分かった。今後は、被験者数を増やすことで、より信頼度の高いデータを得る必要がある。

表3 主観的評価実験結果から得られたコルモゴロフ・スミルノフ検定統計量

遅延時間 [ms]	8	10	12	14	16	18	20	25	30
評価1	0.11	0.02	0.09	0.22	0.42	0.18	0.07	0.61	0.61
評価2	0.48	1.03	0.81	0.53	1.32	0.96	1.25	1.73	1.78

(c) DAF発生時の影響の客観的評価のためのボタン押し課題実験装置および実験方法の開発

DAF発生時に身体運動に現れる影響を計測することで、DAFが与える影響の客観的な評価を実施した。この研究では、まず被験者がボタンを押下すると実験者が指定した時間だけ遅延して聞こえるDAF発生装置を作成した。この装置では、ミリ秒単位での遅延の制御が可能である。次に、この装置を身に着けた被験者に、一定の時間間隔で示される合図に合わせてボタンを押下するボタン押し課題を実行してもらい、様々な遅延時間の発生パターンでDAFが発生したときのボタン押下間隔の乱れを計測した。その結果、DAFが連続的ではなく時々発生する場合にボタン押下間隔の乱れが大きくなることが分かった。この結果を基に、ボタン押し課題におけるボタン押下間隔の乱れをDAF発生時の影響の客観的な評価指標として用いることとした。そして、このボタン押し課題を用いた評価実験を、60~82歳の高齢者28名および21~25歳の若年者38名を対象として実施した。

得られた結果を図4に示す。この図において、横軸は発生させた遅延時間、縦軸はボタン押下間隔の乱れであり、グラフの「RMSE」はこの乱れを平均二乗誤差に基づいて評価したもの、「MAE」は乱れの絶対値の平均に基づいて評価したものである。この図より、高齢者と若年者ではDAF発生時のボタン押下間隔の乱れに大きな差があることが分かった。一方、この評価実験で実施した被験者数は十分とは言えない。また、高齢者では遅延が発生していない場合でも一定のボタン押下間隔の乱れが発生している被験者が多くみられた。今後は、これらの課題を解決する必要がある。

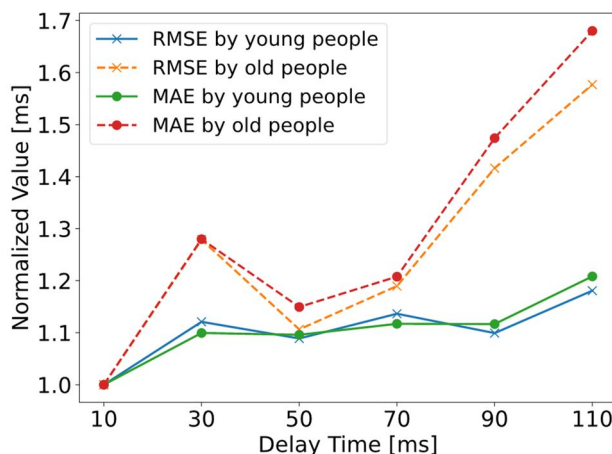


図4 DAF発生時に身体運動に現れる影響の客観的評価実験結果

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 TANJI Hiroki, MURAKAMI Takahiro	4. 巻 E106.A
2. 論文標題 Deep Multiplicative Update Algorithm for Nonnegative Matrix Factorization and Its Application to Audio Signals	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 962 ~ 975
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2022EAP1098	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 Murakami Takahiro, Onodera Shogo, Tanji Hiroki	4. 巻 144
2. 論文標題 未知の到来方向を含んだ参照信号を用いたマイクロホンアレーの校正	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 53 ~ 63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.144.53	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11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 八木澤太貴, 丹治寛樹, 村上隆啓
2. 発表標題 Phase Vocoderを用いた話速変換におけるTransient Smearingの軽減
3. 学会等名 第38回信号処理シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山下一樹, 安田和生, 丹治寛樹, 村上隆啓
2. 発表標題 若年者と高齢者の遅延聴覚フィードバックの身体運動への影響の比較
3. 学会等名 電子情報通信学会東京支部学生会第29回研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 八木澤太貴、池内柁、丹治寛樹、村上隆啓
2. 発表標題 Phase Vocoderの音質改善に向けた位相スペクトルを用いた音の境目の検出
3. 学会等名 電気学会システム研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masaki Ikeuchi, Hiroki Tanji, and Takahiro Murakami
2. 発表標題 Improvement of the direction-of-arrival estimation method using a single channel microphone by correcting a spectral slope of speech
3. 学会等名 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference 2022 (APSIPA ASC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 香山実結花、山下一樹、丹治寛樹、村上隆啓
2. 発表標題 若年者と高齢者の聴覚フィードバックにおける遅延時間の許容量の統計的分析による比較
3. 学会等名 電子情報通信学会東京支部学生会第28回研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小野寺章吾、池内柁、丹治寛樹、村上隆啓
2. 発表標題 到来方向に誤差を含む参照信号を利用したマイクロホンアレーの校正
3. 学会等名 電気学会システム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池内 稯, 小野寺章吾, 丹治寛樹, 村上隆啓
2. 発表標題 最尤推定に基づく1ch到来方向推定法の音声信号への拡張
3. 学会等名 電気学会システム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroki Tanji and Takahiro Murakami
2. 発表標題 Learning the statistical model of the NMF using the deep multiplicative update algorithm with applications
3. 学会等名 Proc. Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference 2021 (APSIPA ASC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松尾宇紘, 丹治寛樹, 村上隆啓
2. 発表標題 1chマイクロホンによる音響信号の到来方向推定のための最尤原理に基づいたノッチ周波数推定法
3. 学会等名 電子情報通信学会信号処理研究会1月研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松尾宇紘, 丹治寛樹, 村上隆啓
2. 発表標題 最尤推定に基づいたノッチ周波数推定法におけるステップサイズパラメータについての検討
3. 学会等名 電子情報通信学会東京支部学生会第26回研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 丹治寛樹, 村上隆啓
2. 発表標題 深層乗算更新アルゴリズムを用いた非負値行列因子分解の統計モデルの学習
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>明治大学ホームページ https://www.meiji.ac.jp/sst/information/2020/6t5h7p00003alps0.html https://www.meiji.ac.jp/sst/information/2022/6t5h7p00003fude.html</p>

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
研究協力者	丹治 寛樹 (TANJI Hiroki) (40896255)	明治大学・理工学部・助教 (32682)	
研究協力者	松尾 宇紘 (MATSUO Takahiro)		
研究協力者	香山 実結花 (KAYAMA Miyuka)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	山下 一樹 (YAMASHITA Kazuki)		
研究協力者	池内 柁 (IKEUCHI Masaki)		
研究協力者	小野寺 章吾 (ONODERA Shogo)		
研究協力者	八木澤 太貴 (YAGISAWA Hiroki)		
研究協力者	安田 和生 (YASUDA Kazuki)		

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