

令和元年6月25日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2018

課題番号：15K12064

研究課題名（和文）雑音環境下で頑健に動作するサイレント音声通話技術の構築

研究課題名（英文）Development of silent speech telecommunication techniques robust against external noise

研究代表者

戸田 智基（Toda, Tomoki）

名古屋大学・情報基盤センター・教授

研究者番号：90403328

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、実環境下において秘匿性の高い通話や周囲に迷惑をかけない通話を実現するために、外部雑音環境下でも頑健に動作するサイレント音声通話技術の構築に取り組んだ。体内伝導マイクروفोनと空気伝導マイクروفोनを併用し、体内伝導音声と空気伝導音声を相補的に活用する技術を構築することで、耐雑音性の高いサイレント音声強調処理を実現した。また、雑音環境下において聞き取りやすい音声へと変換する技術も実現し、話し手側と聞き手側において、各々の外部雑音環境に対応可能な処理を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究結果により、古くから盛んに研究されている空気伝導音声に対する強調処理に加え、新たに体内伝導音声も併用することで、お互いの収録過程に起因する音響的特徴を相補的に有効利用できることが示された。これにより、空気・体内伝導音声情報処理といった新たな研究分野が見い出された。本研究課題で構築した技術は、携帯電話やスマートフォンなどを用いた通話において、秘匿性を保持した発話や、周囲に迷惑をかけない発話を可能とするものであり、より利便性の高い音声コミュニケーションの実現が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research project, towards the development of a telecommunication system capable of keeping privacy and avoiding annoying others under real environments, we studied silent speech telecommunication techniques robust against external noise. We developed silent speech enhancement techniques making it possible to enhance body-conducted speech under noisy conditions complementary using air-conducted speech as well, which are detected using both body- and air-conductive microphones. Moreover, we developed speech modification techniques to enhance speech intelligibility under noisy conditions. Consequently, we have significantly improved robustness of silent speech telecommunication against external noise in both speaker and listener sides.

研究分野：音声情報処理

キーワード：音声強調 雑音抑圧 音声変換 音声加工 サイレント音声

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 携帯電話やスマートフォンの普及により、異なる環境下にいる人とも容易に音声でコミュニケーションがとれる社会となり、聞き手が周囲にいない状況で声を発するという行為が頻繁に行われるようになった。これに伴い、1) 発声された音声は周囲の人にとっては雑音となり得る、2) 秘匿性の高い発話内容も周囲に聴こえてしまう、という問題が浮き彫りとなった。これらは、聴取可能な声を発声しなければならないという制約によるものであり、音声という媒体が持つ本質的な問題といえる。

(2) これに対し、聴取可能な声を出さずに音声コミュニケーションを行う技術として、サイレント音声インタフェースの研究が行われている。我々は、周囲が聴取困難なほど微弱なささやき声を用いたサイレント音声通話の実現を目指し、世界に先駆けて、1) 体表密着型マイクロフォンを用いて微弱なささやき声を体内伝導収録する技術と、2) それをより自然な声に変換する統計的体内伝導音声強調技術に関する研究を進めてきた。その結果、体内伝導収録された微弱なささやき声は、そのままでは通話可能な品質を有していないが、統計的手法に基づく強調技術を用いることで大幅に品質を改善できることが分かり、サイレント音声通話を実現できる可能性が見い出された。

(3) 一方で、これまでの研究では主に防音室内にて収録された体内伝導音声を対象としており、本技術の実環境への適用については未知の領域であった。実環境下では、多種多様な外部雑音が存在するなど、統計的体内伝導音声強調処理の性能低下を招く要因が数多く存在すると考えられるため、これらを考慮した技術の構築が必要であった。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究では、周囲に聴取困難なほど微弱なささやき声によるサイレント音声コミュニケーションの実環境下への適用を目指し、外部雑音に対して頑健に動作するサイレント音声通話技術の研究開発に取り組むことを目的とした。従来技術である体内伝導マイクロフォンによる微弱なささやき声の集音処理と統計的手法に基づく体内伝導音声強調処理に加え、新たに空気伝導マイクロフォンを用いた外部雑音モニタリング処理を導入することで、1) 発声者側では、外部雑音に起因する体内伝導収録音声の歪みや発話様式変化に対しても対処可能な体内伝導音声強調技術を構築し、また、2) 聞き手側では、外部雑音に応じた各種強調音声の選択的聴取を可能とする強調音声制御技術を構築し、さらに、3) これらを統合したテストベッドシステムの構築および評価を行うことで実用化に向けた課題を整理することを目的とした。

### 3. 研究の方法

(1) 従来の体内伝導音声強調技術を基盤技術として活用し、発声者側においては、1) モニタリングされた外部雑音信号を利用した体内伝導音声用雑音抑圧技術と、2) 外部雑音モデリングを用いた体内伝導音声強調技術の構築に取り組んだ。聞き手側においては、3) 外部雑音に応じた強調音声の選択的聴取の実現に向けて、強調音声制御技術の構築に取り組んだ。最終的に、4) 要素技術を統合したテストベッドシステムの構築および雑音環境下における性能評価を実施した。

(2) **課題1**「外部雑音モニタリングを用いた体内伝導音声に対する雑音抑圧技術の構築」：外部雑音が混入した体内伝導収録音声に対して、空気伝導マイクロフォンで収録される外部雑音を用いて、時々刻々と変化する混入雑音信号を推定し、雑音抑圧処理を行う技術の構築に取り組んだ。実環境下での応用を想定し、雑音の種類や雑音源の数に関する制約を必要としない枠組みを検討した。空気伝導マイクロフォンで収録される外部雑音信号と、体内伝導マイクロフォンで収録される混入外部雑音信号の音響特性の違いを考慮して、空気伝導雑音信号から体内伝導混入雑音信号を推定するための手法を考案し、体内伝導音声に対する雑音抑圧技術の確立に取り組んだ。

(3) **課題2**「外部雑音モニタリングを用いた体内伝導音声強調技術の構築」：雑音抑圧処理された体内伝導音声に対して統計的音声強調を適用するために、雑音抑圧処理に伴い生じる歪みに対して頑健に動作する体内伝導音声強調技術の確立に取り組んだ。また、発声時には聴覚フィードバックが必要となるがゆえに、外部雑音は発声者の発話様式にも影響を与えるが、この外部雑音に応じた発話様式変化に対応するための技術の構築に取り組んだ。

(4) **課題3**「聞き手による選択的聴取の実現に向けた強調音声制御技術の構築」：聞き手側において外部雑音が存在する際に、統計的音声強調モデルにおける強調音声を制御して、より明瞭性が高い音声の提示を実現する技術の構築に取り組んだ。従来の統計的音声強調技術で目標音声として用いられる空気伝導ささやき声や空気伝導通常音声に加えて、雑音環境下で発声された通常音声（ロンバード音声）などの利用についても検討した。また、雑音環境下における明瞭性を向上させる音声加工技術の構築にも取り組んだ。

(5) **課題4**「テストベッドシステムの構築および評価」：各要素技術を統合することで、テストベッドシステムの構築に取り組んだ。雑音環境下において、各種要素技術とシステム全体の性能評価を行うとともに、実用化に向けた課題の整理に取り組んだ。

#### 4. 研究成果

(1) **成果1**「外部雑音モニタリングを用いた体内伝導音声に対する雑音抑圧技術の構築」：空気伝導マイクロフォンを体内伝導マイクロフォン付近に装着した状態で、外部雑音および非可聴つぶやき発声の収録を行い、外部雑音モニタリングが有効に機能する条件について調査を行った。その結果、60 dBA以上の騒音下において、外部雑音モニタリングが有効に機能することを示した。次に、外部雑音モニタリングを用いた雑音抑圧技術として、独立成分分析に基づくセミブラインド音源分離を応用し、空気伝導マイクロフォンによりモニタリングされた外部雑音を用いて、体内伝導マイクロフォンで収録された信号に対する雑音抑圧を行う手法を提案した。実験的評価結果から、本手法は従来のエコーキャンセラで生じるダブルトーク問題の影響を受けずに、高精度な雑音抑圧が可能であることを示した（5. 雑誌論文 など）。さらに、調査を進めた結果、セミブラインド音源分離に基づく手法は、複数音源や移動音源が外部雑音として存在する際には、十分な抑圧性能が得られないことを明らかにした。この問題を解決する手法として、外部雑音モニタリングの制約を活用した非負値テンソル因子分解に基づく雑音抑圧技術を提案し、実験的評価結果からその高い有効性を示した（5. 雑誌論文 など）。

(2) **成果2**「外部雑音モニタリングを用いた体内伝導音声強調技術の構築」：外部雑音変化に伴う発話様式変化（ロンバード効果）が生じている音声データに対して、外部雑音モニタリングを用いた雑音抑圧技術の性能評価を行い、発話様式変化に対して頑健に動作することを明らかにした。一方で、体内伝導音声の音響特徴量変化が、後段の統計的体内伝導音声強調処理に悪影響を与えることを明らかにした（5. 雑誌論文 など）。この問題を解決するために、統計的音声強調処理に適した雑音抑圧処理手法を提案し、その有効性を示した（5. 学会発表 など）。さらに、耐雑音性に優れた統計的音声強調処理の実現を目指し、基盤技術となる統計的音声強調処理の外部雑音に対する頑健性に関する調査を行った。実験的評価の結果から、音声波形直接加工に基づく統計的音声強調処理が高い耐雑音性を持つことを明らかにした。

(3) **成果3**「聞き手による選択的聴取を可能とする強調音声制御技術の構築」：強調時の目標音声として、ささやき声、通常音声、ロンバード音声への変換処理を実施し、聴取側の外部雑音の有無により、適切な目標音声が変わることを実験的に明らかにした。また、外部雑音下において明瞭な音声への変換処理の実現に向けて、通常音声からロンバード音声への変換処理による明瞭性改善効果を調査した。その結果、十分な明瞭性改善効果が得られず、特に子音の変換処理に問題があることが分かった。この結果に基づき、統計的変換処理ではなく、信号処理に基づく波形加工処理をベースとした明瞭性改善手法の構築に取り組んだ。従来の波形加工処理に対して、外部雑音の統計量を加味した改善を施すことで、高い明瞭性改善効果が得られる波形加工処理を実現した。実験的評価結果から、様々な雑音環境下において、提案法は高い明瞭性改善効果が得られることを明らかにした（図1）。

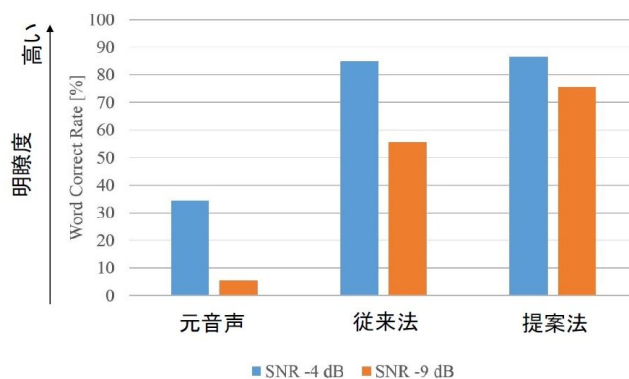


図1. 雑音環境下における単語書き取り評価の結果

(4) **成果4**「テストベッドシステムの構築および評価」：外部雑音モニタリング機能を備えた体内伝導音声収録装置を開発し、各種要素技術を統合することで、テストベッドシステムを構築した。実験的評価結果から、本研究課題で構築した各種要素技術により、雑音環境下における体内伝導音声強調性能が大きく改善されることを示した。また、本システムの実用化に向けた検討を進めた結果、サイレント音声に限らず、通常音声など様々な発話様式に対しても、雑音下で頑健に動作する自己発声音声強調処理が必要になる可能性が見い出された。そこで、外部雑音モニタリングを用いた雑音抑圧技術の枠組みをさらに発展させて、空気伝導マイクロフォンアレーおよび体内伝導マイクロフォンを活用して雑音抑圧を行う枠組みを考案するとともに、空気・体内伝導音声信号を対象とした多チャンネル信号処理に基づく自己発声音声強調技術を構築した。ネックバンド式の体内伝導マイクロフォンを改良することで、空気伝導マイクロフォンアレー機能を備えたウェアラブル型空気・体内伝導音声マイクロフォンを開発し、テストベッドシステムを構築した。実験的評価結果から、空気伝導音声信号と体内伝導音声信号を相補的に活用することで、高い音声強調性能が得られることを示した（5. 雑誌論文 など）。

(5) **成果5**「当初の実施計画には含まれないものの本研究課題を通して実施した課題」: 統計的音声変換に基づく強調処理の性能改善に向けて、空気伝導マイクロフォンと体内伝導マイクロフォンによる収録信号を併用したステレオチャンネル音声変換法を提案した。これにより、静音環境下および雑音環境下のどちらにおいても、変換性能の上限値を大幅に改善できることを示した(5. **雑誌論文** など)。また、体内伝導音声認識システムの構築にも取り組み、深層学習に基づく体内伝導音声認識システムに対して、発話様式適応処理、話者適応処理、ならびに、外部雑音環境適応処理を導入することで、各種要因を考慮した体内伝導音声認識処理を実現し、その有効性を確認した。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 7 件)

Moe Takada, Shogo Seki, Tomoki Toda, Self-produced speech enhancement and suppression method using air- and body-conductive microphones, Proceedings of APSIPA ASC, 査読有, pp. 1240–1245, 2018

DOI: 10.23919/APSIPA.2018.8659663

Yusuke Tajiri, Hirokazu Kameoka, Tomoki Toda, A noise suppression method for body-conducted soft speech based on non-negative tensor factorization of air- and body-conducted signals, Proceedings of IEEE ICASSP, 査読有, pp. 4960–4964, 2017.

DOI: 10.1109/ICASSP.2017.7953100

Yusuke Tajiri, Tomoki Toda, Nonaudible murmur enhancement based on statistical voice conversion and noise suppression with external noise monitoring, Proceedings of 9th ISCA Speech Synthesis Workshop (SSW9), 査読有, pp. 54–60, 2016.

DOI: 10.21437/SSW.2016-9

Yusuke Tajiri, Tomoki Toda, Satoshi Nakamura, Noise suppression method for body-conducted soft speech enhancement based on external noise monitoring, Proceedings of IEEE ICASSP, 査読有, pp. 5935–5939, 2016.

DOI: 10.1109/ICASSP.2016.7472816

Yusuke Tajiri, Kou Tanaka, Tomoki Toda, Graham Neubig, Sakriani Sakti, Satoshi Nakamura, Non-audible murmur enhancement based on statistical conversion using air- and body-conductive microphones in noisy environments, Proceedings of INTERSPEECH, 査読有, pp. 2769–2773, 2015.

[https://www.isca-speech.org/archive/interspeech\\_2015/i15\\_2769.html](https://www.isca-speech.org/archive/interspeech_2015/i15_2769.html)

(この他に 2 件)

### 〔学会発表〕(計 25 件)

戸田 智基, 音声変換による発声機能の拡張、東京大学ヒューマンオーグメンテーション学第 4 回セミナー、2018 年 11 月、**招待講演**。

高田 萌絵、関 翔悟、戸田 智基、ウェアラブルな空気 / 体内伝導マイクロフォンを用いた自己発声音強調 / 抑圧法、電子情報通信学会応用音響研究会、2018 年 8 月。

野田 聖太、林 知樹、戸田 智基、武田 一哉、DNN 適応に基づく非可聴つばやき認識用話者・環境依存音響モデルの構築、電子情報通信学会音声研究会、2017 年 12 月。

戸田 智基、音声変換技術の進展と課題、日本音響学会東海支部総会・講演会、2017 年 3 月、**招待講演**。

田尻 祐介、亀岡 弘和、戸田 智基、セグメント特徴量正則化 NTF に基づく雑音環境下における非可聴つばやき強調、電子情報通信学会音声研究会、2017 年 3 月。

野田 聖太、林 知樹、戸田 智基、武田 一哉、非可聴つばやき認識のための通常音声を活用した DNN 音響モデル学習、日本音響学会 2017 年春季研究発表会、2017 年 3 月。

Tomoki Toda, Statistical voice conversion and its application to augmented speech production, 名古屋工業大学情報科学フロンティア研究院特別講演会、2016 年 11 月、**招待講演**。

田尻 祐介、亀岡 弘和、戸田 智基、実環境下におけるサイレント音声通話の実現に向けた雑音環境変動に頑健な非可聴つばやき強調法、第 3 回サイレント音声認識ワークショップ、2016 年 10 月、**学生奨励賞** (受賞者: 田尻 祐介)。

田尻 祐介、亀岡 弘和、戸田 智基、中村 哲、空気 / 体内伝導信号の非負値テンソル分解に基づく体内伝導微弱音声に対する雑音抑圧法、日本音響学会 2016 年春季研究発表会、2016 年 3 月、**第 13 回日本音響学会学生優秀発表賞** (受賞者: 田尻 祐介)。

田尻 祐介、戸田 智基、中村 哲、外部雑音モニタリングに基づく体内伝導微弱音声に対する雑音抑圧法、電子情報通信学会応用音響研究会、2015 年 11 月。

(この他に 15 件)

### 〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 1 件）

名称：肉伝導音集音システム及び肉伝導音集音システムの装着方法

発明者：田尻 祐介、戸田 智基、グラム ニュービッグ、サクリアニ サクティ、中村 哲

権利者：国立大学法人奈良先端科学技術大学院大学

種類：特許

番号：特願 2015-170837

出願年：2015 年

国内外の別：国内

取得状況（計 1 件）

名称：信号解析装置、方法、及びプログラム

発明者：亀岡 弘和、田尻 祐介、戸田 智基、中村 哲

権利者：日本電信電話株式会社、国立大学法人奈良先端科学技術大学院大学

種類：特許

番号：特許第 6519801 号

取得年：2019 年

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<https://www.toda.is.i.nagoya-u.ac.jp/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：中村 哲

ローマ字氏名：(NAKAMURA, Satoshi)

所属研究機関名：奈良先端科学技術大学院大学

部局名：情報科学研究科

職名：教授

研究者番号（8 桁）：30625083

2016 年 3 月まで研究分担者として参加

研究分担者氏名：サクティ サクリアニ

ローマ字氏名：(SAKTI, Sakriani)

所属研究機関名：奈良先端科学技術大学院大学

部局名：情報科学研究科

職名：助教

研究者番号（8 桁）：30625083

2016 年 3 月まで研究分担者として参加

研究分担者氏名：ニュービッグ グラム

ローマ字氏名：(NEUBIG, Graham)

所属研究機関名：奈良先端科学技術大学院大学

部局名：情報科学研究科

職名：教授

研究者番号（8 桁）：70633428

2016 年 3 月まで研究分担者として参加

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、研究者個人に帰属されます。