

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25540071

研究課題名(和文)発話運動の3次元センシングとその認知科学的応用に関する研究

研究課題名(英文)A study on three-dimensional sensing of articulatory movements and its application to cognitive sciences

研究代表者

鍋木 時彦(Kaburagi, Tokihiko)

九州大学・芸術工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：30325568

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):本課題では、小型の受信コイルを発話器官に固定し、これらの位置を3次元測定する磁気センサを構築した。本来、送信用のコイルから生成される交流磁界は、空間内の位置によって決まる。磁気センサでは、その逆問題を考え、受信コイルに磁界から誘導される受信信号を測定し、磁界方程式の制約のもとでその位置を推定する。この時、送信側の磁界の非線形性や多自由度性が要因となって、解の多義性が生じ、マーカー位置の推定において大きな誤差を生じる問題があった。本課題では、送信コイルの配置を最適化することで、この問題を低減できることを示した。位置推定誤差は、最適化によって1.58 mmから0.40 mmまで減少した。

研究成果の概要(英文):An electromagnetic sensing system was developed to observe the position of multiple receiver coils attached to the surface of the articulatory organs. This system detects the receiver position by measuring signals induced from surrounding magnetic fields and by solving a set of simultaneous equations representing the predicted magnetic fields by using a dipole model of the transmitter coils. Previous studies report a noticeable increase in the position estimation error irrespective of small signal prediction error and the existence of non-uniqueness problem in the position estimation was hypothesized to be the cause of this problem. To resolve the problem, we optimized the alignment of the transmitter coils by maximizing the difference between the receiver signals for any pair of states in the measurement region and evaluated the alignment by performing computer simulations and actual measurement. As a result, measurement error was decreased from 1.58 mm to 0.40 mm.

研究分野：音声情報処理

キーワード：音声情報処理 発話運動 磁気センサ 3次元計測 運動計測

1. 研究開始当初の背景

(1) 人の音声コミュニケーションに関する基礎科学は、発話や知覚に関する従来の個別的探求から脱却し、今後は、中枢での言語知識表現や言語獲得、言語進化の問題に焦点を絞りつつ、認知科学的傾向を鮮明化していくものと考えられる。本課題では、聴覚情報としての音声の実時間性、聴覚フィードバック現象に見出される感覚-運動系の連携、さらに音声発話における脳活動までを考慮して、音声コミュニケーションの認知科学研究を推進するため、音声器官の発話運動を3次元でリアルタイム計測する磁気センサを構築する。本システムは、音声器官の運動、音声、声帯振動などの発話情報を同時に取得可能な、きわめて有用性の高い実験システムとなることを目指す。

2. 研究の目的

(1) 本課題では、小型・軽量のソレノイドコイルを舌、口唇、軟口蓋、下顎などの音声器官に固定し、これらマーカーの3次元位置を、交流磁界を用いて測定する、発話運動のセンシングシステムを構築する。音声器官の動的特性を考慮して、各マーカーの測定周波数は毎秒100~200サンプル、測定誤差は0.5mm以下を達成する。本システムは、音声や発話運動との同時測定、感覚フィードバックの付与や光トポグラフィとの同時使用など、上で述べた必要条件をすべて満足することができる。

(2) 従来の予備検討により、本課題で取り組む3次元磁気センサには、「マーカー位置推定における解の不確定性」という、物理的逆問題における解の多義性の問題が存在することがわかっている。本来、送信用のコイルから生成される交流磁界の強度は、空間内の位置によって決まる。3次元磁気センサでは、その逆問題を考え、受信用のマーカーコイルに磁界から誘導される電気信号を測定して、非線形な磁界方程式の制約のもとで、その位置を推定する。

(3) この時、送信側の磁界の非線形性および多自由度性(マーカーコイルの位置と向きに関する自由度を解消するため、5個以上の送信チャンネルが必要となる)が要因となって、解の多義性が生じ、マーカー位置の推定において極めて大きな誤差を生じる。このような不確定性を解消し、マーカー位置を高精度に測定し得るシステムを構築することが、本課題の中心テーマである。この成果は、発話運動の安定な3次元センシング技術の確立に、不可欠な知見をもたらす。

3. 研究の方法

(1) 本課題では、自然発話における音声器官の運動をリアルタイム測定する、3次元磁気センサを構築する。高性能なシステムの実現

には、ハード、ソフト両面からのデザインが必要である。特に、ハード面では、「マーカー位置推定における解の不確定性」の問題に対処するため、場の数値解析による磁界生成の最適設計を取り入れ、不確定性を反映した客観的評価基準のもとに、システムの最適化を図る。ソフト面では、磁界センシングからのマーカー位置推定という非線形・多変数の物理的逆問題に対して、最適な非線形計画法を適用する。平成26年度末を目途にシステムを完成させ、平成27年度は被験者実験を通して有効性を検証する。

(2) 初年度は、不確定性の問題に対処することを主眼として、場の数値計算に基づく磁界生成の最適設計をおこない、その結果をハードウェア設計に反映させる。位置マーカー用の受信コイルに誘導される信号強度は、送信コイルの空間的な配置に依存する。従って、マーカー位置推定における不確定性を解消するには、送信コイルの配置を最適化することが必要である。そこで、ここでは、送信コイルの配置によって決まる交流磁界の空間的パターンを、近接場の磁気双極子モデルを用いて数値的に解析する。さらに、位置マーカー用のコイルに誘導される信号や、位置の推定精度を計算機シミュレーションによって求め、定量的な評価基準に基づいて、送信コイルの最適配置を決定する。

(3) システムの製作自体は、1年目から継続的におこなうが、2年目は、特に、送信コイルの最適配置に関する数値的な検討結果を基として、ハードウェアシステムを完成させ、実際の測定精度を検証する。この際、計算機、送信用と受信用のアンプ、送信用ソレノイドコイルなどを1年目に購入し、2年目には、送信コイルを被験者の頭部周辺に固定するための筐体などを製作する。A/D変換器、D/A変換器は、既存の装置を使用する。あわせて、受信信号からマーカー位置を推定する非線形最適化問題を含め、システムの制御用ソフトウェアの全体的な見直しを行う。完成したハードウェアシステムおよび制御用ソフトウェアを用いて、マーカー位置の測定精度を評価し、不確定性の問題が十分に解決されていることを確認する。発話運動センシング用の実験システムを確立したのちに、被験者を用いた観測実験を通して、本システムの有効性を検証する。

4. 研究成果

(1) 発話運動センシング用の3次元磁気センサでは、まず、計算機で作成した駆動用の正弦波信号を増幅した後に送信用ソレノイドコイルに送り、話者の頭部周辺に交流磁界を生成する。個々の送信用コイルに、異なる周波数の正弦波を用いる。受信側では、小型、軽量の受信コイルを位置マーカーとして音声器官に装着し、磁界から誘導

される受信信号を増幅した後に計算機に取り込む。次に、受信信号をそれぞれの送信コイルに対応した信号成分に分離し、受信コイルの位置を推定する。位置推定では、送信コイルが生成する交流磁界を近接場の磁気双極子を用いてモデル化し、受信コイルの3次元位置と傾きをパラメータとして、磁界モデルからの予測値と実際に測定される信号値の誤差が最小となるようにパラメータ値を推定する。コイルは5個の自由度を有するため（位置3個、傾き3個）、5個以上の送信コイルが必要である。このとき、個々の送信コイルに対応する磁界方程式を連立させることで、受信コイルの位置が計算される。

(2) 本課題では、6個の送信チャンネルを有するシステムについて検討した。これらの送信コイルは、3次元座標の各軸において、原点から等距離の位置に配置されるものとする。今回の検討では、これらの送信コイルの位置は固定とし、各送信コイルの向きを最適化することによって、磁界の空間パタンの最適化と「マーカー位置推定における解の不確定性」の問題の解消を図った。この最適化の際には、測定領域内の2点における受信信号が大きく異なることを評価尺度として、組み合わせ最適化の手法によって、計算機上の磁界シミュレーションにより、個々の送信コイルの向きを決定した。さらに、この最適化された送信コイルの配置をもとにして、受信コイルの位置の推定精度を検証した。

(3) 磁界の計算機シミュレーションに基づく受信コイルの位置推定誤差を図1に示す。図の横軸は、位置推定における受信信号の誤差である。また、送信コイルの配置は、最適化前のものである。一方、図2は、送信コイルの配置を最適化した後の結果である。図1と図2は、縦軸と横軸のスケールが大きく異なっていることに注意が必要である。以上の結果より、送信コイルの配置を最適化し、磁界の空間的なパターンを調整することによって、受信コイルの位置推定結果が大きく異なることがわかる。位置推定誤差に関しては、1桁程度の誤差の減少が見られる。これによって、推定精度が大幅に改善される可能性が見込まれる。また、図1においては、横軸にとった受信信号誤差が小さいにも関わらず、位置の推定誤差が大きいサンプルが多数見受けられる。このようなサンプルが生じる原因は、本課題で問題とする「マーカー位置推定における解の不確定性」によるものであり、図2でこのようなサンプルが消失していることから、送信コイルの配置の最適化は、不確定性の解消においてきわめて有用であることが示された。

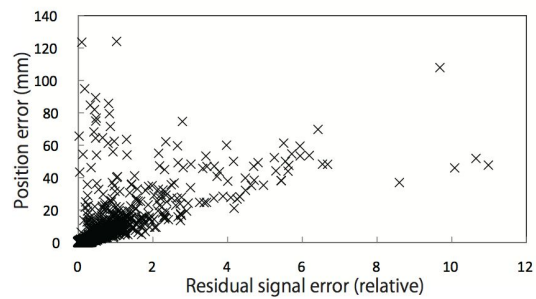


図1: 磁界のシミュレーションによる位置推定誤差の計算結果（最適化前）

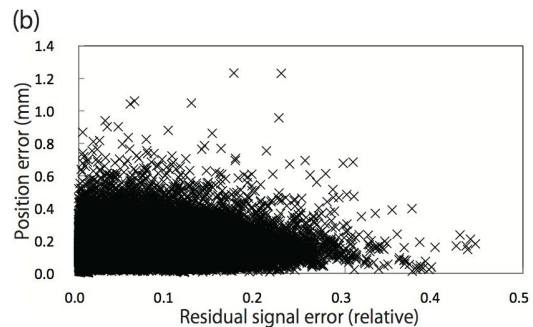


図2: 磁界のシミュレーションによる位置推定誤差の計算結果（最適化後）

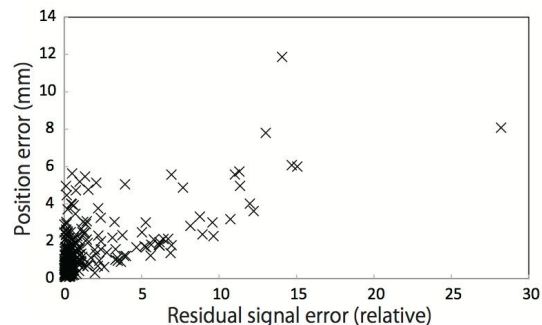


図3: 実測に基づく位置推定誤差（最適化前）

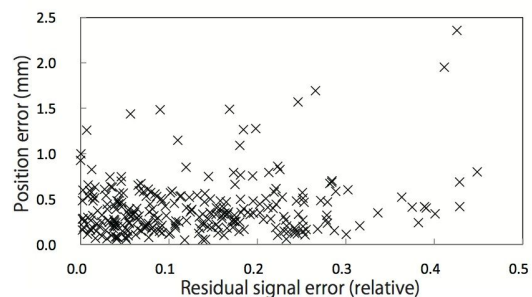


図4: 実測に基づく位置推定誤差（最適化後）

(4) 次に、測定システムのハードウェアを用いた、実測に基づく受信コイルの位置推定精度を図3と図4に示す。図はそれぞれ、送信コイルの配置を最適化する前と後のものである。実測では、計算機シミュレーションによる図1、図2と比べてサンプル数が少な

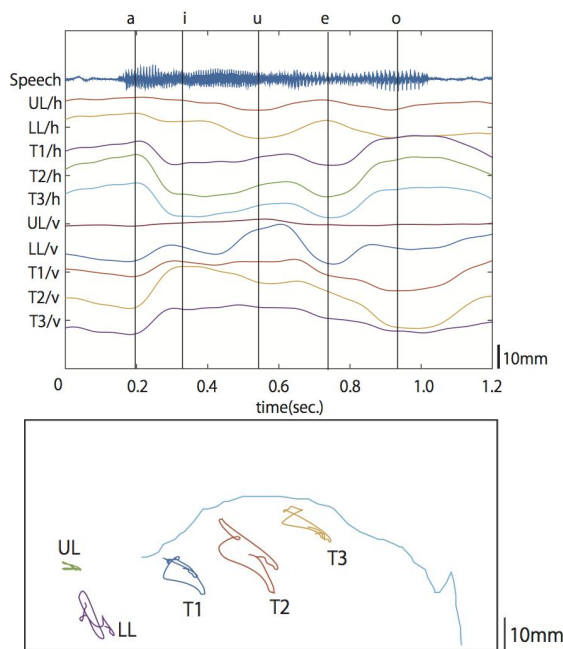


図 5: 発話運動の観測結果。

いものの、送信コイルの配置の最適化による測定精度の改善効果は、明確に確認することができた。位置推定誤差の平均値は、最適化前が 1.58 mm、最適化後は 0.40 mm であった。最適化後の測定性能は、音声発話時の調音器官の運動を実際に測定する上で、十分な精度を有していると考えられる。また、図 3 においては、横軸にとった受信信号誤差が小さいにも関わらず、位置の推定誤差が大きいサンプルが多数見受けられる。このようなサンプルが生じる原因は、本課題で問題とする「マーカー位置推定における解の不確定性」によるものであり、図 4 でこのようなサンプルの生起頻度が低下していることから、送信コイルの配置の最適化は、不確定性の解消においてきわめて有用であることが実測実験に基づいて示された。

(5) 男性話者 1 名が発話した母音「あいうえお」の測定結果を図 5 に示す。図の上段は水平方向と垂直方向の変位を時間的な変化として表したもので、下段は頭部の正中面における軌道として表したものである。UL と LL は上下の唇、T1 から T3 までは舌面に固定したマーカーを表す。得られたデータは、各母音の調音的な特徴をとらえたものとなっており、本システムの有効性を示すものとなった。本システムは、音声の同時収録が可能であり、音声の音響的な特徴と調音運動とを対比的に研究することが可能となっている。今回は音声のみであったが、電気式喉頭計の同時使用も可能であり、声帯の振動パターンを音声や調音運動と同時に観測することが可能となっている。

(6) 本課題における検討の結果、磁気センサの送信コイルの配置を一定の規範のもとに最適化することによって、システムの測定精度を改善できることが示された。さらに、このようなシステム設計において、磁気双極子モデルに基づく磁界の計算機シミュレーションが有効であることも同時に確認された。現在のシステムは、送信コイルの個数が 6 個となっているが、送信コイルの個数を増やし、受信コイルの位置推定における拘束条件を強めることによって、さらなる測定精度の改善が期待される。現在は、磁界の計算機シミュレーションにより、その有効性を検証している段階である。今後は、システムを構築する際の機器の制約を考慮し、特に送信コイルの個数を 8 個とすることで、新たな測定システムの構築を図る予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Hidetsugu Uchida, Kohei Wakamiya and Tokihiko Kaburagi, Improvement of measurement accuracy for the three-dimensional electromagnetic articulograph by optimizing the alignment of the transmitter coils, *Acoustical Science and Technology*, 査読有, 37(3), 106-114, 2016.

[DOI:10.1250/ast.37.106]

〔学会発表〕(計 6 件)

若宮幸平, 内田秀継, 鍋木時彦, 最適配置された送信コイルをもつ 3 次元磁気センサシステムの構築, 日本音響学会春季研究発表会, 3-P-27, 2016年3月11日, 桐蔭横浜大学・横浜市.

Kohei Wakamiya, Hidetsugu Uchida, and Tokihiko Kaburagi, The effect of additional transmission channels in three-dimensional electromagnetic articurography, *Proc.YKJCA2015*, 2015 年 1 月 10 日, 長崎大学・長崎市.

Hidetsugu Uchida, Kohei Wakamiya, and Tokihiko Kaburagi, A study on the improvement of measurement accuracy of the three-dimensional electromagnetic articulography, *Proc.Interspeech2014*, pp.726-730, 2014年9月16日, シンガポール.

若宮幸平, 内田秀継, 鍋木時彦, 3 次元磁気センサシステムにおける送信チャンネル

数に関する検討，日本音響学会秋季研究発表会，1-R-41，2014年9月3日，北海学園大学・札幌市.

内田秀継，若宮幸平，籙木時彦，3次元磁気センサシステムにおける送信コイル配置の検討と精度評価，音響学会秋季研究発表会，1-P-37a，2013年9月25日，豊橋技術科学大学・豊橋市.

内田秀継，若宮幸平，籙木時彦，三次元磁気センサシステムにおける送信コイルの配置の最適化についての検討，日本音響学会音声研究会，SP2013-75，2013年11月21日，奈良先端大学院大学・生駒市.

6．研究組織

(1)研究代表者

籙木 時彦 (KABURAGI, Tokihiko)
九州大学・大学院芸術工学研究院・教授
研究者番号：30325568