

氏 名	かまた かつひろ 鎌田 勝裕
本籍（国籍）	岩手県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博 第338号
学位授与年月日	令和4年3月23日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当 課程博士
研究科及び専攻	工学研究科機械・社会環境システム工学専攻
学位論文 題目	前頸部多チャンネル表面筋電図を利用した嚥下機能評価システムに関する研究
学位審査委員	主査 准教授 佐々木 誠 副査 教授 花原 和之 副査 教授 三好 扶 副査 理事・副学長 水野 雅裕

論文内容の要旨

高齢化が進む現代社会において、嚥下障害の問題が深刻化している。飲食物が気管に侵入することで発症する誤嚥性肺炎による死亡者は年々増加しており、2019年に4万人に達している。また、食物を誤嚥・窒息し、死に至る高齢者は年間約4,000人に上る。嚥下機能は加齢や疾患により低下するが、嚥下機能の精密検査の多くは侵襲性を伴い、検査・診断に専門知識を必要とする。また、検査対象は、嚥下障害を発症した人、もしくはその疑いの強い人に限定されるため、精密検査は日常的な嚥下機能評価には不向きである。更に、嚥下機能評価に関する様々な先行研究が行われている一方で、嚥下機能の低下を、非侵襲かつ簡便に、早期に検出しうる評価技術は確立されていない。

本研究では、加齢や疾患に伴う嚥下諸器官の運動機能の低下に着目し、「異なる嚥下条件に対する対応力」と定義した嚥下機能を、専門知識がなくとも簡便に定量評価し、日常的な嚥下機能の評価に利用が可能な「嚥下機能評価システム」を提案した。本嚥下機能評価システムは、前頸部全体の表面筋電図（Surface electromyography : sEMG）信号を、簡便に計測することのできるハードウェアと、計測された sEMG 信号から、異なる嚥下条件に対する対応力を抽出し定量化するソフトウェアから構成される。

第1章「諸言」では、嚥下のメカニズム、研究背景、本研究の目的と実施項目について述べた。

第2章「前頸部多チャンネル表面筋電図計測装置の開発」では、複数の筋が協調的に活動する複雑な嚥下運動を、専門知識がなくとも前頸部を覆うようにセン

サを装着でき、非侵襲に計測することのできる嚥下機能評価のための専用装置（ハードウェア）を確立した。前頸部に位置する舌骨上筋群と舌骨下筋群の sEMG 信号を計測するための専用形状の多チャンネル電極を設計し、更に多チャンネル電極の各電極と、不関電極から導出される電位差を差動増幅して、全チャンネルの sEMG 信号を同時にサンプリングする絶縁型の表面筋電図計測装置を開発した。

第 3 章「機械学習を用いた嚥下条件分類」では、第 2 章で開発した前頸部の多チャンネル電極を用いて計測した sEMG 信号の時間領域と周波数領域の特徴成分をカラー情報に変換して、嚥下画像を作成した後、事前学習済みの CNN（Convolutional neural network）である AlexNet により画像の特徴ベクトルを抽出し、SVM（Support vector machine）を用いて嚥下条件の分類を行った。その結果、4 つの嚥下条件の違いを、95.7% という高い識別精度で識別できたこと、それによって嚥下画像の中から嚥下条件の違いを表す有益な情報が得られたことを示した。更に、嚥下機能を、異なる嚥下条件における特徴ベクトルのユークリッド距離として定量化する着想を得た。

第 4 章「嚥下画像の特徴変化に着目した評価手法の開発」では、第 3 章で得られた知見を基に、機械学習を用いらずに嚥下画像の特徴ベクトルを、カーネル主成分分析（Kernel principal component analysis : KPCA）により次元圧縮し、「異なる嚥下条件に対する対応力」をユークリッド距離として定量化する嚥下機能の評価手法を開発した。そして若年者群と高齢者群の嚥下機能を比較した結果、4 つの嚥下条件のうち、3 条件に有意差が認められ、評価手法（ソフトウェア）の有効性を示した。これにより本研究で提案する嚥下機能評価システムを確立した。

第 5 章「結言」では、研究成果の総括と今後の展望について述べた。本研究成果を医療機器として上市し、日常的な嚥下機能の健康管理が一般的に普及すれば、嚥下障害に対する様々な社会的、経済的波及効果が期待される。

論文審査結果の要旨

加齢による筋力低下や、脳血管障害や神経筋疾患などの全身疾患が原因で嚥下機能が低下し、誤嚥性肺炎や窒息で命を落とす高齢者は年間 4 万人に達する。一方、嚥下機能の精密検査には、嚥下造影検査が用いられるが、放射線被曝や造影剤誤嚥などのリスクを伴うため、検査対象者は嚥下障害が強く疑われる人もしくは既に重症化している人に限られる。そのため、高齢者の健康寿命を延伸するためには、自覚困難な嚥下機能低下や嚥下障害予備軍を早期発見しうる、非侵襲かつ簡便な評価技術が不可欠である。

本論文は、このような背景のもと、嚥下の主要筋である舌骨上筋群と舌骨下筋群の筋活動パターンを多点計測し、嚥下機能を定量的に評価しうる新しい嚥下機能評価システムの開発を行ったものである。特に、嚥下機能を「異なる嚥下条件

に対する嚥下諸器官の対応力」と定義し、機械学習の視点を取り入れながら、筋活動パターンの変化量を数値化するところに、本研究の特徴がある。

本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章では、嚥下のメカニズム、嚥下機能の検査法、嚥下機能評価の工学的アプローチとその課題について説明し、本研究の目的を示した。

第 2 章では、嚥下の主要筋である舌骨上筋群と舌骨下筋群の協調運動を捉えるために、専用の多チャンネル表面筋電位計測装置を開発した。舌骨上筋群は、オトガイ舌骨筋、顎舌骨筋、顎二腹筋、茎突舌骨筋、舌骨下筋群は、甲状舌骨筋、肩甲舌骨筋、胸骨舌骨筋、胸骨甲状筋で構成され、前頸部に層を成して位置する。本研究では、前頸部全体を覆うように独自設計した 44 チャンネルフレキシブル電極と、それらの信号を同時サンプリングし、信号処理する絶縁型の表面筋電位計測装置を開発し、嚥下時筋活動の詳細な計測と解析を可能にした。

第 3 章では、開発した多チャンネル表面筋電位計測装置を用いて、異なる一回嚥下量 (3, 15 mL) と嚥下方法 (自然嚥下, 努力嚥下) を組み合わせた 4 条件での嚥下データを収集した。そして、計測した 44 チャンネル表面筋電位信号から、各チャンネルの振幅成分 (Root mean square) と周波数成分 (Cepstrum coefficients) を抽出し、カラーマップ化することで、嚥下開始から終了までの一連の筋活動を嚥下画像として表現した。その後、畳み込みニューラルネットワークを用いて嚥下画像から 8,192 次元の特徴ベクトルを抽出し、サポートベクターマシンにより 4 条件の嚥下分類を行った。その結果、識別精度は 95.7% と高い値を示し、嚥下条件によってわずかに異なる嚥下諸器官の運動変化を、筋活動ベースの嚥下画像から抽出できることを明らかにした。

第 4 章では、嚥下画像の類似度に注目することで、「異なる嚥下条件に対する嚥下諸器官の対応力」を数値化する手法を開発した。まず、若年者 15 名と高齢者 15 名を対象に、異なる一回嚥下量 (1, 6 mL) と嚥下方法 (自然嚥下, 努力嚥下) を組み合わせた 4 条件での嚥下データを収集し、嚥下画像を作成した。次に、畳み込みニューラルネットワークを用いて抽出した 8,192 次元の特徴ベクトルを、線形分離可能な高次元特徴空間に写像し、カーネル主成分分析により 3 次元特徴ベクトルに次元圧縮した。その後、各嚥下条件における特徴ベクトルのユークリッド距離を算出し、若年者群と高齢者群の比較を行った。その結果、両群の間に、一回嚥下量や嚥下方法の変化量に有意な差が認められ、加齢変化による嚥下機能低下を定量的に評価できることを示した。嚥下は、随意運動と不随意運動が共存する複雑な生理機構によって実現される。一回嚥下量の違いは嚥下反射の変化を、嚥下方法の違いは随意運動の変化をそれぞれ促すものであり、どちらの嚥下条件においても、加齢変化の特徴を数値化できたことは、嚥下機能低下の箇所を特定し、適切な介入を行う上で重要な知見と言える。

第 5 章では、研究成果の総括と、学術的、社会的な波及効果について示した。

以上のように，本研究成果は，学術的かつ工学的に重要な意義をなすものである．よって，本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める．

原著論文名（1編を記載）

嚙下パターン画像を用いた嚙下機能評価法に関する基礎的検討，鎌田勝裕，佐々木誠，鈴木雅大，横浜裕太，玉田泰嗣，日本機械学会論文集，Vol.87，No.901，DOI:10.1299/transjsme.21-00166，2021年9月