

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：32660

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22980

研究課題名（和文）嚥下バイオメカニクスに基づく機能電気刺激による嚥下機能支援システム

研究課題名（英文）Swallowing Function Support System using Functional Electrical Stimulation based on Swallowing Biomechanics

研究代表者

橋本 卓弥（Hashimoto, Takuya）

東京理科大学・工学部機械工学科・講師

研究者番号：60548163

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：日常生活の中で嚥下（飲み込み）機能を補助するための支援装置の実現を目指し、嚥下のバイオメカニクスに基づいて機能的電気刺激（FES）により喉頭挙上運動を効率よく補助するための方法論を確立することを目的とした。そこで、まず、嚥下意図の同定のために、PVDFフィルムを用いて嚥下関連の複数の生体信号を同時に計測可能なマルチモーダル嚥下機能評価デバイスを開発した。また、嚥下筋骨格モデルを用いた筋活動解析なども行い、嚥下FESにより効果的に喉頭挙上を惹起するための刺激位置や強度などについて検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、これまで試行錯誤的に行われていた嚥下FESの刺激位置・順序・強度を定めるための方法論の確立につながり、日常生活での利用も期待できるようになる。社会の高齢化と共に嚥下機能が低下する人の割合は増えているものの、四肢の運動支援等に比べて嚥下の運動支援に関する研究は極めて少ないため、日常生活の中で嚥下機能を補助するための支援装置の実現に挑む本研究の意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study was to establish a methodology to efficiently assist laryngeal elevation movements by functional electrical stimulation (FES) in order to develop an assistive device to assist swallowing function in daily life. First, we developed a multimodal measurement device of swallowing-related biological signals using PVDF (Poly Vinylidene Difluoride) film to identify the swallowing intention. In addition, the stimulation position and intensity to induce laryngeal elevation effectively by the swallowing FES were examined, incorporating the musculoskeletal analysis of swallowing.

研究分野：知能機械学・機械システム

キーワード：嚥下 電気刺激 筋骨格モデル マルチモーダル計測

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

神経筋疾患や加齢に伴う筋力の低下によって嚥下（飲み込み）機能に障害が生じると、嚥下障害となり、誤嚥性肺炎の発症リスクが高まる。そのため、高齢化が進む日本では、肺炎での死者数が増加傾向にある。嚥下障害のうち、特に咽頭期の障害では、舌骨・甲状軟骨の前上方への運動に伴う喉頭挙上の移動量不足が顕著に現れ、十分な喉頭挙上運動を再建することが嚥下障害に対する治療・リハビリテーションの第一義的な目標となっている。近年、この喉頭挙上を補助する有効な方法として機能的電気刺激（Functional Electrical Stimulation, 以下 FES）が注目されており、臨床応用が進められている。しかしながら、嚥下運動には複数の筋が協調的に関わっており、電気刺激の位置・順序によっては意図しない運動が生じる可能性がある。特に表面電極の場合、電極の位置によっては複数の筋を同時に刺激する可能性があり、筋の選択性の問題が顕著となる。これまでのところ、嚥下 FES における刺激パターンの設計方法は確立されておらず、試行錯誤的に実施する必要があるため、被験者の負担が大きく、再現性も低い。また、四肢の運動とは違い、嚥下運動は生体内の運動であるため計測が難しく、これまでの嚥下 FES では基本的に開ループでのシーケンシャルな制御が用いられてきた。そのため、食塊の量や姿勢、筋疲労による動きの変化を補償することができず、動作の安定性が低かった。そのため、日常的なケアが求められるにも関わらず、日常の食事の中で嚥下機能を補助する支援装置は未だに実現されていない。

2. 研究の目的

人間の嚥下意図に合わせて効率よく喉頭挙上の運動を補助することができる支援システムの実現を目指し、申請者がこれまでに取り組んできた嚥下機能評価や嚥下筋骨格モデル解析を活用し、嚥下 FES で喉頭挙上を惹起する際の最適な刺激位置、強度、タイミングについて検討することを目的とする。

3. 研究の方法

まず、PVDF フィルムを用いて喉頭挙上に関連する信号が計測できるかどうかを検討し、嚥下関連信号として筋音、嚥下音、喉頭挙上を計測可能なマルチモーダル嚥下機能評価デバイスを試作した。そして、嚥下運動補助のための機能的電気刺激（嚥下 FES）装置を試作し、喉頭挙上を惹起可能な刺激周波数や刺激時間について検討した。さらに、刺激位置の標準化のために、被験者間に共通して大きな喉頭挙上量が得られる刺激位置を求めると共に、刺激強度についても検討した。この他、嚥下 FES による刺激パターンの設計指針を得るために、嚥下筋骨格モデルを用いた筋活動解析を行い、被験者間に共通する筋活動パターンを求めた。

4. 研究成果

(1) PVDF フィルムを用いたマルチモーダル嚥下機能評価デバイスの開発

これまでの研究において、PVDF フィルムを用いて嚥下運動における筋音と嚥下音の同時計測に取り組んできた。これに加え、喉頭挙上の計測を実現することにより、嚥下運動における筋活動（筋音）、食塊の流入（嚥下音）、喉頭挙上に関する情報を基にした多角的な嚥下機能評価が実現できると考えられる。また、筋活動と喉頭挙上運動から嚥下のタイミングを検出することができれば、嚥下 FES のトリガとして使うことができ、随意的な嚥下機能補助への応用が期待できる。そこで、PVDF フィルムにより喉頭挙上を計測できるかどうか実験を行った。

実験では、筋音計測位置に合わせ、甲状軟骨付近の 2 箇所（胸骨舌骨筋（SN）と甲状舌骨筋（TH））に貼った PVDF フィルムで計測を行った（図 1）。また、比較用として、被験者の左側方からビデオカメラにより喉頭部分の動きも撮影した。計測時間は 3 秒間とし、その時間内に水 10 ml を嚥下するように指示した。被験者は健常者 3 名で、それぞれ 5 回測定を行った。

計測結果の一例として、最も良い結果が得られた SN での計測結果を図 2(a) に示す。

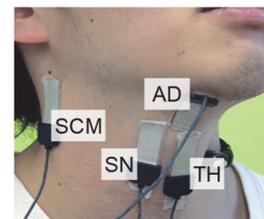


図 1 PVDF による嚥下機能評価

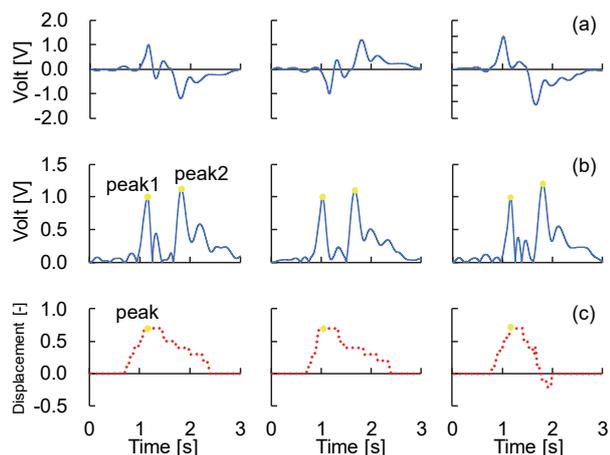


図 2 PVDF による喉頭挙上関連信号の計測例。

この結果から、上下が反転する場合もあるものの、類似した波形が得られていることが分かる。計測波形を全波整流した結果(図2(b))と動画から得られた喉頭隆起の上下方向の移動量(図2(c))を比較すると、PVDF フィルムの波形には明確な2つのピーク(peak1, peak2)が存在し、peak1は喉頭挙上が最大となるときの一致していることが分かる。また、波形の開始・終了位置も概ね一致していることから、PVDF フィルムで喉頭挙上に関連する波形を計測できることが確認できた。

(2) 嚥下筋骨格モデルによる筋活動パターンの解析

嚥下 FES による刺激パターンや刺激タイミングを調整するための指針を得るために、これまでの研究で開発してきた嚥下筋骨格モデルを用いた筋活動解析を行い、複数の健常者に共通する筋活動パターンを調査した。

解析では、まず、320列 CT で撮影された健常者7名の嚥下動態を基に、舌骨と甲状軟骨の運動を計測した(図3)。また、得られた CT データを基に、被験者毎に筋骨格モデルを作成した。そして、得られた運動データを用いた筋活動解析を行い、正常嚥下における筋活動の様子を調べた(図4)。その結果、被験者に共通して高い筋活性度を示す筋があることが分かった。

次に、筋シナジー仮説に基づいて得られた筋活動から筋シナジーを抽出することにより、嚥下運動における筋の協調運動の様子を解析した。その結果、嚥下運動における筋活動は、2~3のシナジーで構成されていることが分かった。そして、抽出されたシナジーの発生順序と舌骨の運動には整合性があることを確認した。

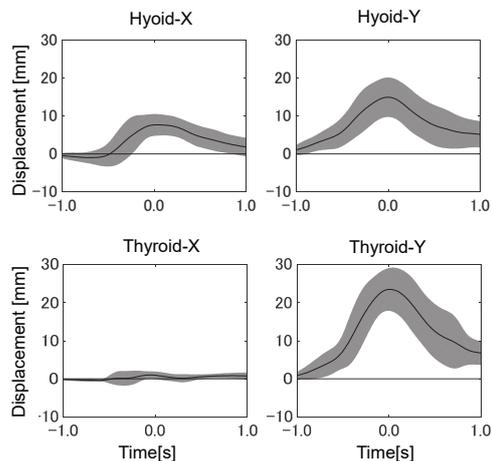


図3 舌骨・甲状軟骨の運動解析結果。

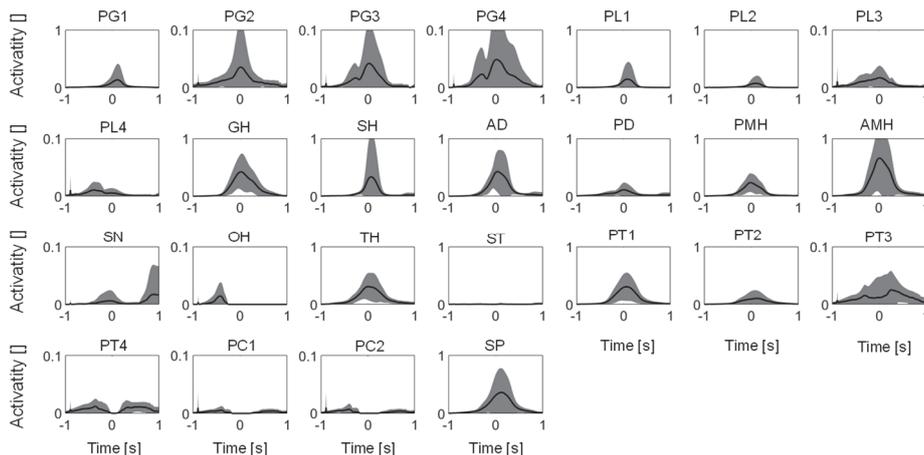


図4 筋骨格モデルによる筋活動解析結果。被験者に共通して主導的に働いている筋があることが分かる。

(3) 嚥下 FES 装置の試作と刺激位置および刺激強度の検討

まず、本研究用に定電圧型の電気刺激装置を試作した(図5)。本装置では、PCで生成した刺激信号を D/A ボードを介して送ると、その信号を増幅して筋肉に刺激を与えられるようになっている。刺激信号には、図6に示すような2相性パルス波を用い、先行研究を参考に、パルス幅 $P_w=0.1$ ms、総刺激時間 $St=2.4$ ms、刺激周波数 $F_s (=1/T_s)=20$ Hz を基本の刺激パターンとした。また、急激な刺激を抑えるため、前半に緩やかな立ち上がり区間を設けた。

これまでの嚥下 FES に関する研究では、喉頭部の解剖学的な筋肉の位置を基に刺激位置を決めることが多かった。そのため、専門的な知識が無いと刺激位置の調整が容易ではなく、家庭や福祉施設等での使用には向かないものであった。そこで本研究では、筋肉の位置を意識せずに刺激位置を調整する方法について検討した。そのために、まず、被験者の喉頭部の形状に合わせて格子を描いた透明シート(図7左)を用意し、その格子点に合わせて電極パッドを貼り付けられるようにした。シートの作成に当たっては、被験者毎に図7右に示す A, B, C のサイズを計測し、舌骨付近を起点として(A)舌骨上筋群(顎先まで)方向を3

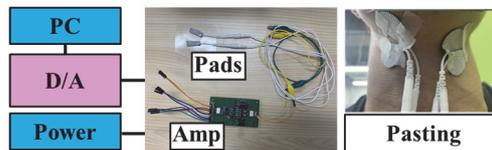


図5 試作した嚥下 FES 装置

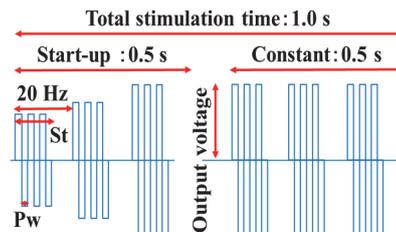


図6 基本の刺激波形

等分, (B)舌骨下筋群(鎖骨付近まで)方向を5等分, (C)耳方向を3等分するようにした。

次に, 健常被験者6名を対象に, 甲状軟骨周囲の8箇所(P1~P8)に刺激を与えた際の喉頭挙上量を計測した。この際, 刺激電圧として30Vおよび40Vの2種類で計測を行った。なお, 挙上量には個人差があり, 直接比較することが難しいため, 被験者ごとに最大挙上量を用いて正規化することとした。そして, 各刺激位置での全被験者分の挙上量の平均値を求め, 分布図を作成した(図8)。この結果から, 30Vと40Vの挙上量の分布は類似した結果となり, P6, P5, P3の順に挙上量が大きかった。また, 30Vに比べて40Vの方が, 大きな挙上量が得られる範囲が広がっていることも確認できた。なお, 実際の嚥下関連筋の配置との対応を見てみると, P2がオトガイ舌骨筋, P3~P4が顎二腹筋の前腹や茎突舌骨筋, P5~P6が甲状舌骨筋や胸骨舌骨筋の近くに位置しており, 実際の筋の位置との整合性も取れていることが分かった。

上述の実験から, 刺激強度にも個人差があることが分かったため, それぞれの刺激位置において大きな挙上量が得られる刺激強度についても検討することとした。そこで, 多くの被験者において高い挙上量が得られると思われるP3, P5, P6の3箇所を対象に, 刺激強度を変えたときの挙上量の変化を調べた。図9は, 刺激強度は20Vから50Vまで5V刻みで変化させた結果を示しており, 個人差はあるものの, 刺激強度を上げていくことで挙上量が増加していくことが確認できた。特に, P3とP5の2箇所については, 被験者間で挙上量の変化がある程度類似していた。一方で, ある刺激強度からは挙上量の増加が見られない被験者もいた。結果として, 挙上量が得られた場合では, 空嚥下時の喉頭挙上量に対してP3では最大50%程度, P5では最大40%程度, P6では最大50%~60%程度の挙上量が得られた。

(4)まとめと今後の展望

人間の嚥下意図に合わせて効率よく喉頭挙上の運動を補助することができる支援システムの実現を目指し, 嚥下運動のモデリング, 計測, 制御技術の基礎を確立することができた。一方, それぞれを連携するまでには至らなかった。特に, 嚥下意図の検出は, 嚥下FESに随意性を持たせるのに必要であると考えられるため, 今後, 優先的に取り組んでいく予定である。また, 小さな刺激強度で効果的に喉頭挙上を惹起できるようにするために, 刺激パターンについても調べていきたい。

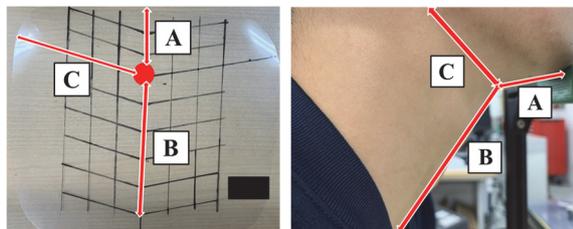


図7 テンプレートシート(左)と喉頭部の計測位置(右)

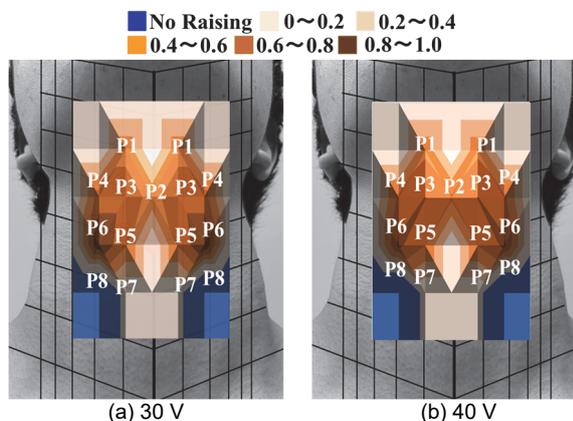


図8 正規化された挙上量の分布

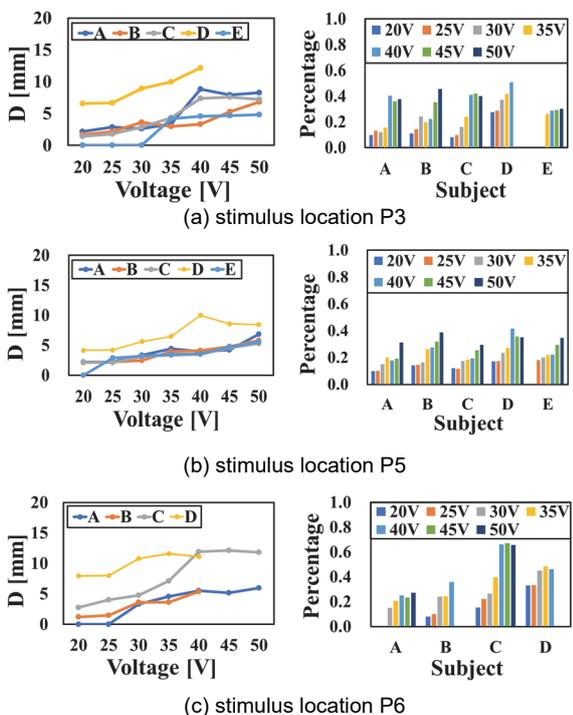


図9 刺激電圧を変えた時の挙上量の変化(左: 挙上量, 右: 唾液嚥下時の挙上量で正規化した値)。

特に, 嚥下意図の検出は, 嚥下FESに随意性を持たせるのに必要であると考えられるため, 今後, 優先的に取り組んでいく予定である。また, 小さな刺激強度で効果的に喉頭挙上を惹起できるようにするために, 刺激パターンについても調べていきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

| | |
|--|------------------------|
| 1. 著者名 AZEGAMI Hideyuki, ONO Shinjiro, TAKEUCHI Kenzen, KIKUCHI Takahiro, MICHIWAKI Yukihiro, HANYU Keigo, KAMIYA Tetsu | 4. 巻 17 |
| 2. 論文標題 Identification of muscle activity in tongue motion during swallowing through medical image data | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Biomechanical Science and Engineering | 6. 最初と最後の頁 21-00254 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jbse.21-00254 | 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 道脇幸博 | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 動態力学シミュレーションによる嚥下機能の解析 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 嚥下医学 | 6. 最初と最後の頁 21～27 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 無 |
| 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 橋本卓弥 | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 嚥下の筋骨格モデル | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 嚥下医学 | 6. 最初と最後の頁 15～20 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 無 |
| 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 Hashimoto Takuya, Urabe Mariko, Chee-Sheng Foo, Murakoshi Atsuko, Kikuchi Takahiro, Michiwaki Yukihiro, Koike Takuji | 4. 巻 10 |
| 2. 論文標題 Development of a Musculoskeletal Model of Hyolaryngeal Elements for Understanding Pharyngeal Swallowing Mechanics | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Applied Sciences | 6. 最初と最後の頁 6276～6276 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/app10186276 | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計21件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Motoki Inoue, Yoshio Toyama, Tetsu Kamiya, Megumi Takai, Keigo Hanyuu, Takahiro Kikuchi, Yukihiro Michiwaki |
| 2. 発表標題 A Novel Choking Risk Assessment Method for Safe Food Designs |
| 3. 学会等名 6th International Conference on Food Oral Processing (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 井上元幹, 菊地貴博, 外山義雄, 佐原資謹, 道脇幸博 |
| 2. 発表標題 とろみ水の口腔から咽頭への流れに及ぼす増粘剤種類の影響 |
| 3. 学会等名 認知症と口腔機能研究会第2回学術集会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 道脇幸博, 菊地貴博, 井上元幹, 高井めぐみ, 神谷哲, 外山義雄 |
| 2. 発表標題 コンピュータグラフィックスで見る嚥下と誤嚥のメカニズム |
| 3. 学会等名 第26,27回合同学術大会日本摂食嚥下リハビリテーション学会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 須佐千明, 道脇幸博, 菊地貴博, 井尻敬, 小林琢也, 佐原資謹 |
| 2. 発表標題 4次元CTの領域分割による舌運動の描出 |
| 3. 学会等名 第26,27回合同学術大会日本摂食嚥下リハビリテーション学会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 井上元幹, 菊地貴博, 外山義雄, 神谷哲, 高井めぐみ, 道脇幸博 |
| 2. 発表標題 子供の気道異物のメカニズムを解明するための嚥下シミュレーションSwallow Visionの活用 |
| 3. 学会等名 第26,27回合同学術大会日本摂食嚥下リハビリテーション学会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 橋本卓弥, 井尻敬, 菊地貴博, 道脇幸博 |
| 2. 発表標題 4DCTを用いた嚥下運動の筋骨格モデル解析 |
| 3. 学会等名 第26・27回合同学術大会日本摂食嚥下リハビリテーション学会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yukihiro Michiwaki, Takahiro Kikuchi, Chiaki Susa, Motoki Inoue, Megumi Takai, Yoshio Toyama, Tetsu Kamiya, Takashi Ijiri, Yoshinori Sahara |
| 2. 発表標題 Visualization of both bolus flow and biologic organ movement using segmentation of 4-dimensional CT for swallowing |
| 3. 学会等名 2nd World Dysphagia Summit (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yukihiro Michiwaki, Takahiro Kikuchi, Motoki Inoue, Megumi Takai, Yoshio Toyama, Tetsu Kamiya |
| 2. 発表標題 Visualization of the Integrated Relationship between Muscle Activity and Organ Movement during Swallowing using a Muscle-driven Computer Simulation |
| 3. 学会等名 2nd World Dysphagia Summit (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 道脇幸博, 菊池貴博, 神谷哲, 高井めぐみ, 井上元幹, 外山義雄 |
| 2. 発表標題 コンピュータシミュレーションを使った嚥下中の粘度変化と摩擦効果の推定 |
| 3. 学会等名 Life2020-2021 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 静谷光一郎, 橋本卓弥, 菊池貴博, 佐原資謹, 井尻敬, 道脇幸博 |
| 2. 発表標題 嚥下筋骨格モデルによる筋シナジー解析 |
| 3. 学会等名 LIFE2020-2021 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山根正之, 道脇幸博 |
| 2. 発表標題 嚥下と誤嚥のメカニズムを解説・可視化するコンピュータグラフィックス動画の制作 |
| 3. 学会等名 第212回日本口腔外科学会関東支部学術集会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 道脇幸博 |
| 2. 発表標題 医用画像に基づくコンピュータシミュレーションによる嚥下のメカニズム解明 |
| 3. 学会等名 令和3年度日本補綴歯科学会 西関東支部・東関東支部合同学術大会 シンポジウム |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 道脇幸博 |
| 2. 発表標題 嚥下中の筋活動と器官の運動の統合的關係を解明するための筋駆動型コンピュータシミュレーションの開発 |
| 3. 学会等名 第45回日本嚥下医学会ならびに学術集会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小池裕貴, 橋本卓弥, 菊池貴博, 道脇幸博 |
| 2. 発表標題 機能的電気刺激による嚥下運動補助のための刺激位置の検討 |
| 3. 学会等名 第22回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takuya Hashimoto, Takahiro Kikuchi, Yukihiro Michiwaki |
| 2. 発表標題 Swallowing Musculoskeletal Analysis Using 320-ADCT |
| 3. 学会等名 The 42nd International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 橋本卓弥 |
| 2. 発表標題 嚥下の筋骨格モデル |
| 3. 学会等名 第44回日本嚥下医学会総会ならびに学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Mariko Urabe, Takuya Hashimoto, Takahiro Kikuchi, Yukihiro Michiwaki, and Takuji Koike |
| 2. 発表標題 Estimation of Muscle Activity Change under Different Bolus Conditions Using Musculoskeletal Model of Swallowing |
| 3. 学会等名 The 41st International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC ' 19) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Takuya Hashimoto |
| 2. 発表標題 Measurement of Laryngeal Elevation using PVDF Film for Multimodal Assessment of Swallowing Function |
| 3. 学会等名 The 41st International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC ' 19) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 橋本卓弥, 菊地貴博, 道脇幸博 |
| 2. 発表標題 筋音計測による咀嚼・嚥下機能の定量的評価に関する研究 |
| 3. 学会等名 日本機械学会福祉工学シンポジウム2019 (LIFE2019) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 道脇幸博, 占部麻理子, 菊地貴博, 橋本卓弥, 神谷哲, 外山義雄, 井上元幹, 高井めぐみ, 八尋恒隆 |
| 2. 発表標題 嚥下のバイオメカニクス解明のための呼吸運動のコンピュータ・シミュレーションの製作 |
| 3. 学会等名 第25回日本摂食嚥下リハビリテーション学会学術大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 占部麻里子, 菊地貴博, 道脇幸博, 小池卓二, 橋本卓弥 |
| 2. 発表標題 嚙下筋骨格モデルを用いた異なる食塊による筋活動変化の推定 |
| 3. 学会等名 第25回日本摂食嚙下リハビリテーション学会学術大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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 |
|-------|---|--------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 道脇 幸博 (Michiwaki Yukihiro) (40157540) | 昭和大学・歯学部・兼任講師 (32622) | |

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 |
|---------|---------|