光センサを用いた嚥下時における先行時間、頤舌骨筋筋力、甲状舌骨筋筋力の推定による嚥下能力評価法*

栗原陽介**, 渡辺嘉二郎***, 小林一行***, 田中 博****

In the rehabilitation of dysphagia patients, judging the swallow ability and understanding its process are essential. Appropriate rehabilitation policies and dietary menus can then be selected to prevent aspirations. Currently, however, the swallow ability is mainly judged using large-scale and expensive methods such as video fluoroscopic examination of swallowing, Mesopharynx Fiber, Palatal Pressure Measurements, CT, and Cine MRI, which are difficult to be used in the houses of the patients. This paper proposes a swallow ability judgment system that applies photo sensors, which is handily used at home. As parameters to judge the swallow ability, the lead time, geniohyoid muscle, and thyrohyoid muscle are estimated using photo sensors with a little invasiveness. The results of estimation were obtained with the errors of only 12.5%, 19.2%, and 11.6%, for the lead time, the muscle strength of geniohyoid muscle, and the muscle strength of thyrohyoid muscle respectively. Then, we define a estimation equation to calculate the swallow age, which stands for the standard swallow ability corresponding to the age of the patient, to be used as an index to summarize estimate the swallow ability. The result of the estimation of swallow age showed the root mean square error between the calculated values and the actual ages of the patients was 6.89 years.

嚥下障害を持つ患者に対するリハビリテーションにおいて、看護師は日々嚥下能力を評価し、その経過を把握することが重要である。これにより、各患者に合わせたリハビリテーションの方針や食事のメニューを選択することができ、誤嚥を防止することができる。しかし、嚥下能力を評価する方法としては、嚥下造影(VF検査)、超音波診断法、咽頭ファイバー、嚥下圧計測、CT、シネMRIなど大規模かつ高価な方法が主として使用されており、在宅環境において使用するのには難しい。本論では、在宅環境においても簡易に使用できる光センサを用いた嚥下能力評価システムを提案する。嚥下能力の評価用パラメータとして嚥下時の先行時間、頤舌骨筋、甲状舌骨筋を、拘束性の低い光センサを用いて推定する。その結果、先行時間は12.5%、頤舌骨筋筋力は19.2%、甲状舌骨筋は11.6%の誤差で推定された。また、嚥下能力を総合的に評価するための指標として、被験者の年齢に対して、標準的な嚥下能力を表す嚥下年齢を推定する。その結果、患者の実年齢との二乗平均平方誤差は6.89歳であった。

(キーワード：嚥下、光センサ、先行時間、頤舌骨筋、甲状舌骨筋)

1. はじめに

食事は栄養摂取という目的というだけでなく、味を楽しんだり、家族や友人とのコミュニケーションの場であったりと、人間にとって重要なADL (Activities of Daily

Living) の一つである。しかし、脳血管疾患の後遺症や加齢に伴う筋力・神経系の機能低下の影響により、正常に飲食物を飲み込めない嚥下障害が発生することがある。嚥下障害が発生すると、口腔内の食物や水分を咽頭部に送り込めず、食塊が気管へ流入するため、誤嚥性肺炎などが起こる¹⁾。高齢社会をむかえた日本において、嚥下能力の低下・障害に対する対策を講じ、患者のQOL (Quality of Life) の向上を図ることは重要な課題であり、行政機関も研究に取り組んできた²⁾。嚥下障害を持つ患者に対するリハビリテーションにおいて、看護師は日々嚥下能力を評価し、その経過を把握することが重要である。これにより、各患者に合わせたリハビリテーションの方針や食事のメニューを選択することができ、誤嚥を防止

*受付：2008年9月25日 受理：2009年1月22日

**法政大学大学院工学研究科システム工学

Graduate School of Engineering, Hosei University

***法政大学工学部システム制御工学科

Faculty of Engineering, Hosei University

****東京医科歯科大学情報医科学センター

Tokyo Medical and Dental University Information Center for Medical Informatics

することができる。日々の嚥下能力を評価するためには、在宅環境において嚥下能力を簡易に計測・評価できるシステムが必要となる。しかし、嚥下能力を評価する方法としては、嚥下造影（VF検査）、超音波診断法、咽頭ファイバー、嚥下圧計測、CT、シネMRIなど³⁻⁸⁾大規模かつ高価な方法が主として使用されており、在宅環境において使用するのには難しい。比較的小規模で簡易に嚥下能力を評価する方法としては、嚥下に関する筋肉の筋電図、インピーダンスを計測する方法や圧力センサ、表面電極、マイクロフォンを同時に使用する方法、表面筋電図から嚥下の年齢を推定する方法⁹⁻¹⁵⁾などがあるが、これらの方法は、嚥下に関する筋電を計測する必要があることから、下顎や喉頭に電極を貼る必要があるため煩わしい。筆者等は、簡易に嚥下能力を評価するため、光センサを使用した嚥下時の喉頭の挙上運動を計測するシステムを提案してきた^{16,17)}。

本論では、表面筋電図から嚥下能力の評価の際に使用される先行時間、頤舌骨筋、甲状舌骨筋を、拘束性の低い光センサを用いて推定する。また、嚥下能力を総合的に評価するため、先行時間、舌骨筋筋力、甲状舌骨筋筋力からどの年齢の健常者嚥下能力に近いかを表す指標として、嚥下年齢を推定する。

2. 嚥下運動

図1に嚥下運動における口腔準備期、口腔期、咽頭期、食道期の4期¹⁸⁾を示す。図1(a)の口腔準備期は、口腔内において食物を咀嚼し、食塊を形成する期である。図1(b)の口腔期は、舌で食物を口峽部、咽頭へ送り込む期である。口腔期が開始すると、頤舌骨筋が収縮を開始し、舌骨が前上方へ移動し始める。同時に、舌根で食塊を口

図1 嚥下の4期

Fig. 1 Four stages in swallowing.

腔から口峽部、咽頭へ流し込もうとし、嚥下誘発が起こる。図1(c)の咽頭期は、食塊が口峽部、咽頭へ至った時点から、食道の入り口を通過するまでの期である。嚥下誘発後、頤舌骨筋の筋力が最大になると、甲状舌骨筋が活動を始め、甲状軟骨が上昇を開始する。頤舌骨筋が活動を始める時刻から、甲状舌骨筋が活動を始める時刻までを先行時間という。甲状軟骨が最上部に到達すると輪状咽頭筋が緩み、食道入り口部が開大し、食塊が流入する。この一連の運動と共に喉頭蓋が翻転することで気管を閉鎖し、食塊の流入を防ぐ。嚥下音は喉頭蓋の閉鎖時に20~100 Hz、食塊の流入時に50~150 Hz、400~750 Hz、喉頭蓋の開放時に20~100 Hzの順で発生する¹⁹⁾。甲状軟骨が下降を始めると、頤舌骨筋の筋活動が終了する。その後、甲状舌骨筋の活動が終了し、甲状軟骨は初期位置に戻る。図1(d)の食道期は、食道の蠕動運動によって食塊を頸部食道、胸部食道、胃へと送り込む期である。実際の嚥下運動は円滑かつ連続的なものである。しかし、単独嚥下（1回嚥下）においては、この4つの期が規則正しい順で起こる²⁰⁾。本論では、4期の中で特に口腔期、咽頭期の一連の嚥下運動に着目する。

3. 嚥下能力評価システム

3-1. 嚥下能力評価用パラメータ

正常な嚥下運動では口腔期、咽頭期において、頤舌骨筋の筋活動による舌骨の前上方への運動と、甲状舌骨筋の筋活動による甲状軟骨の挙上運動が、正しいタイミングで発生することにより行われる。しかし、神経系の機能が低下すると、嚥下反射や甲状舌骨筋の筋収縮活動の開始が遅延し、先行時間が長くなる。先行時間の増加の代償として咽頭期が短縮し、食塊を食道へ送り込む際に嚥下運動を頻繁に行う分割嚥下が発生する。分割嚥下が発生すると、咽頭内に食塊が残留するため、気管流入の可能性が高くなる。また、頤舌骨筋や甲状舌骨筋の筋力が低下すると、食塊を正常に咽頭へ送り込めなかったり、嚥下時の甲状軟骨の挙上が不十分で、気管の閉鎖が不完全となり、食塊が流入してしまう。

以上のように先行時間、頤舌骨筋、甲状舌骨筋が正常に機能しないと誤嚥が発生しやすくなり、これらの機能を評価することは、嚥下能力を評価するためには重要な項目である。以上より、本論では先行時間、頤舌骨筋筋力、甲状舌骨筋筋力を嚥下能力評価用のパラメータとする。

3-2. 光センサによる先行時間、頤舌骨筋筋力、 甲状舌骨筋筋力の推定

先行時間、頤舌骨筋筋力、甲状舌骨筋筋力を直接計測するためには、電極を下顎や喉頭に貼る必要があるため拘束性が高い。そこで、拘束性の低い光センサを使用し、先行時間、頤舌骨筋筋力、甲状舌骨筋筋力を推定する。LEDによって、近赤外領域の光を下顎や喉頭部に照射すると一部は皮膚表面で反射されるが、大部分は皮膚を透過した後、ヘモグロビン、ミオグロビン、チトクロームなどの色素タンパク質によって吸収されたり、細胞や各種小器官によって散乱される²¹⁾。散乱された光の一部は反射光となり照射側に戻ってくる。この反射光を、下顎、喉頭部に設置したフォトダイオードやフォトトランジスタなどの光センサにより計測する。この反射光量の皮膚の厚さなどによる個人差をなくすため、光センサの出力の最大値で正規化する。この正規化した下顎、喉頭の光センサの出力を、それぞれ $p_{gh}(t)$ 、 $p_{th}(t)$ とする。また、リファレンスとして頤舌骨筋、甲状舌骨筋の筋電の出力から先行時間、頤舌骨筋筋力、甲状舌骨筋筋力を求める。健常者では嚥下誘発から食塊が食道入り口を通過するまでの時間は、短い場合では0.35秒(2.85 Hz)程度となる¹⁸⁾。この周波数帯域での、頤舌骨筋筋電と甲状舌骨筋筋電のトレンド成分を抽出するため5 Hzのローパスフィルタで平滑化し、全波整流したものを、それぞれ $m_{gh}(t)$ 、 $m_{th}(t)$ とする。図2に口腔期、咽頭期、食道期における $p_{gh}(t)$ 、 $p_{th}(t)$ 、 $m_{gh}(t)$ 、 $m_{th}(t)$ および嚥下音の状態の遷移を示す。頤舌骨筋の活動が開始されると $m_{gh}(t)$ が変化し始める。頤舌骨筋の収縮により舌骨が動き始めると、周辺の組織や器官も連動して動き、下顎へ照射した赤外線に対する吸収率や散乱率が変わるため、 $p_{gh}(t)$ も変化し始める。

図2 嚥下時における、光センサ、EMG、嚥下音の状態の変化
Fig. 2 State of photo sensor, EMG and swallow sound transition in swallowing.

この時の時刻を t_1 とする。頤舌骨筋の筋力が最大になると、 $m_{gh}(t)$ の出力は最大となり、甲状舌骨筋が活動を始め甲状軟骨が動き始めるため、 $m_{th}(t)$ が変化し始める。これに伴い $p_{th}(t)$ も変化し始める。この時の時刻を t_2 とする。先行時間は頤舌骨筋の筋活動開始時刻から、甲状舌骨筋の筋活動開始時刻までの時間であるので、光センサから求める先行時間を P_{LT} とすると、

$$P_{LT} = t_2 - t_1 \quad (1)$$

となる。

また、 P_{LT} のリファレンスとして、 $m_{gh}(t)$ と $m_{th}(t)$ の筋活動開始時刻の差から求めた先行時間を M_{LT} とする。頤舌骨筋の筋活動が終了すると、 $m_{gh}(t)$ の変化も終了し、舌骨は初期位置に戻る。このとき、 $p_{gh}(t)$ の変化も終了する。この時の時刻を t_3 とする。この後、甲状舌骨筋の筋活動の終了に伴い、 $m_{th}(t)$ の変化も終了し、甲状軟骨は初期位置に戻る。このとき、 $p_{th}(t)$ の変化も終了する。この時の時刻を t_4 とする。

嚥下運動に伴う光センサの出力波形 $p_{gh}(t)$ 、 $p_{th}(t)$ は、舌骨や甲状軟骨の位置の変化に伴い変化する。従って、 $p_{gh}(t)$ 、 $p_{th}(t)$ を2階微分した波形は、舌骨や甲状軟骨の位置変化に対する加速度を示している。実際には舌骨、甲状軟骨およびその周辺組織には質量があるため、筋肉はこの加速度に比例した筋力を発生していると考えられる。従って、光センサから求める頤舌骨筋、甲状舌骨筋のそれぞれの筋活動時間における筋力を P_{GH} 、 P_{TH} とすると、

$$P_{GH} = \int_{t_1}^{t_3} \left| \frac{d^2 \{p_{gh}(t)\}}{dt^2} \right| dt \quad (2)$$

$$P_{TH} = \int_{t_2}^{t_4} \left| \frac{d^2 \{p_{th}(t)\}}{dt^2} \right| dt \quad (3)$$

となる。また、リファレンスとしての頤舌骨筋、甲状舌骨筋の筋力 M_{GH} 、 M_{TH} は、 $m_{gh}(t)$ 、 $m_{th}(t)$ の筋活動時間における積分値とする。下顎、喉頭に設置した光センサの出力波形から求めた P_{LT} 、 P_{GH} 、 P_{TH} と、リファレンスとして筋電から求めた M_{LT} 、 M_{GH} 、 M_{TH} の回帰直線から、先行時間、頤舌骨筋、甲状舌骨筋の推定値 $\hat{M}_{LT}$ 、 $\hat{M}_{GH}$ 、 $\hat{M}_{TH}$ を求める推定式を決定する。

3-3. 嚥下年齢の推定

先行時間、頤舌骨筋筋力、甲状舌骨筋筋力から総合的な嚥下能力を表す指標として、被験者がどの年代の嚥下能力かを表す嚥下年齢の推定式を求める。

頤舌骨筋、甲状舌骨筋から求めた M_{LT} 、 M_{GH} 、 M_{TH} を説明変数、被験者の実年齢 A を目的変数として重回帰分析を行い、次の重回帰式を決定する。

$$\hat{A} = a_1 M_{LT} + a_2 M_{GH} + a_3 M_{TH} + a_4 \quad (4)$$

(a) Photo sensor for geniohyoid and electrodes for geniohyoid muscle

(b) Photo sensor for cartilago thyroidea, electrodes for thyroid muscle and condenser microphone for swallow sound

図3 計測システム

Fig. 3 Measurement system.

重回帰式より求まる $\hat{A}$ を嚥下年齢とする。式(1)を各年代における標準的な嚥下能力を持つ被験者において作製することで、リハビリテーション中などの患者において推定した $\hat{A}$ と、実年齢 A の差から先行時間、頤舌骨筋、甲状舌骨筋を総合した嚥下能力を評価することができる。また、式(4)の M_{LT} , M_{GH} , $M_{TH} \rightarrow P_{LT}$, P_{GH} , P_{TH} から推定した $\hat{M}_{LT}$, $\hat{M}_{GH}$, $\hat{M}_{TH}$ を代入することで、光センサから嚥下年齢を推定する。

4. 検証実験

被験者は、21歳～72歳の32名(20代12名:平均年齢 23 ± 1 歳, 30代3名:平均年齢 35 ± 4 歳, 40代5名:平均年齢 47 ± 3 歳, 50代6名:平均年齢 54 ± 3 歳, 60代4名:平均年齢 64 ± 2 歳, 70代2名:平均年齢 72 ± 1 歳)の嚥下能力に異常のない女性を対象とし、インフォームドコンセントを得たうえで実験を行った。図3に実験装置を示す。また、図4にセンサの設置場所を示す。図3(a)におい

図4 センサの設置場所

Fig. 4 Attachment place of sensors.

(a) Front side

(b) Right side

図5 センサの設置状況

Fig. 5 State of measurement.

て、下顎用の光センサ部は、波長870 nmの近赤外高輝度LED(東芝赤外LED, TLN231)と、フォトランジスタ(三洋電機株式会社, SPS-135C)から構成され、 $5.1 \text{ cm} \times 3.5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ のプラスチック製の直方体の中心部に設置する。この光センサ部が、図4のP1に示す下顎の中心にくるようにする。頤舌骨筋の筋電を計測するため、光センサ部をはさむように皿電極(NECメディカルシステムズ株式会社, SEE101)を2つ設置する。一方の電極を、図4のE1に示すように、下顎の頤突起よりわずかに後方へくるようにする。もう、一方の電極は図4のE2に示す頤と舌骨の中間点にくるようにする。図3(b)において、喉頭用の光センサ部は図3(a)の光センサ部と同様のLEDとフォトランジスタを用いる。この光センサ部が甲状軟骨最上部の右側にくるようにし、甲状軟骨の挙上運動を妨げないようにする。甲状舌骨筋の筋電用の皿電極は、図3(b)に示すように2つ設置し、図4のE3, E4に示すように、前頸部の甲状軟骨の左右を挟むようにする。嚥下音が発生する時間帯をリファレンスとするため、コンデンサマイク(株式会社プリモ, EM160)を、図4のC1に示す輪状軟骨の直下の気管の場所に位置を合わせ、喉頭蓋の閉鎖音と開放音を計測する。光センサ、表面筋電、嚥下音は、デジタル多用途脳波計(NECメ

図6 若年被験者の計測結果
Fig. 6 Result of young subject.

ディカルシステムズ株式会社, EE2514) を用いてA/D変換する。サンプリング周波数は喉頭蓋の閉鎖音, 開放音に含まれる最大の周波数100 Hzを計測するため200 Hzとした。

図5に, 図3を設置した状況を示す。本実験では, リファレンス用の皿電極を4箇所密着させるため, 図3 (b)に示すようなバンドで首に固定した。光センサのみの場合は, 下顎と喉頭の2箇所密着に光センサをあてがえばよく, 皿電極を設置する場合に比べ拘束性が少なくなり, 着脱が容易である。図5の状態では, 被験者には上位90°の椅子座位の姿勢で椅子に座ってもらい, 飲水訓練において用いられる水10 mlを口腔内に保持してもらい, 合図と同時に単独嚥下してもらう。この単独嚥下を各被験者において5回行ってもらう。

5. 結果と考察

5-1. 評価用パラメータの推定結果

図6, 図7に24歳と58歳の被験者の光センサ出力 $p_{gh}(t)$, $p_{th}(t)$, 筋電出力 $m_{gh}(t)$, $m_{th}(t)$ および嚥下音の出力波形を示す。頤舌骨筋の筋活動が始まると図6 (b)に示すように, 筋電波形 $m_{gh}(t)$ が上昇を開始し, これにほぼ同期して図6 (a)の下顎に設置した光センサの出力 $p_{gh}(t)$ も上昇し始める。この時刻が t_1 となる。次に, 甲状舌骨筋

図7 高齢被験者の計測結果
Fig. 7 Result of senior subject.

の筋電波形が筋活動を開始すると, 図6 (d)に示すように筋電波形 $m_{th}(t)$ が上昇を開始し, 図6 (c)の喉頭に設置した光センサの出力 $p_{th}(t)$ も上昇を始める。この時刻が t_2 となる。時刻 t_1 , t_2 から式(1)より, 光センサによる先行時間 P_{LT} が求まる。図6においては, P_{LT} は 9.00×10^{-2} 秒であった。また, $m_{gh}(t)$, $m_{th}(t)$ の開始時刻から求めた M_{LT} は 8.00×10^{-2} 秒となった。図6 (e)に示すように, 嚥下音が発生する時間帯において, 図6 (c)の $m_{th}(t)$ が最大となる。その後, $m_{gh}(t)$ が停止すると, $p_{gh}(t)$ も終了する。この時刻が t_3 となる。最後に, $m_{th}(t)$ が停止すると, $p_{th}(t)$ の変化も終了する。この時刻が t_4 となる。 $p_{gh}(t)$, $p_{th}(t)$ に対し, 式(2), (3)から求めた P_{GH} , P_{TH} はそれぞれ 1.47×10^{-2} , 1.38×10^{-2} となる。また, $m_{gh}(t)$, $m_{th}(t)$ から求めた M_{GH} , M_{TH} はそれぞれ, 1.32×10^2 , 1.51×10^2 となった。図7の被験者においても同様に $t_1 \sim t_4$ を決定し, $P_{LT} = 41.0 \times 10^{-2}$, $P_{GH} = 0.380 \times 10^{-2}$, $P_{TH} = 0.420 \times 10^{-2}$, $M_{LT} = 39.0 \times 10^{-2}$, $M_{GH} = 0.503 \times 10^2$, $M_{TH} = 0.495 \times 10^2$ となった。次に, P_{LT} , P_{GH} , P_{TH} から, M_{LT} , M_{GH} , M_{TH} の推定値 $\hat{M}_{LT}$, $\hat{M}_{GH}$, $\hat{M}_{TH}$ を求める推定式を回帰直線として求める。32名の被験者の中から無作為に選んだ26名のデータにおける M_{LT} と P_{LT} , M_{GH} と P_{GH} , M_{TH} と P_{TH} のそれぞれの散布図を図8に示す。ただし, 各被験者の P_{LT} , P_{GH} , P_{TH} , M_{LT} , M_{GH} , M_{TH} は5回の嚥下の平均値とする。散布図に使用しなかった6名の被験者は, 推定式の汎化性を検証するのに使用する。図8 (a)の M_{LT} と P_{LT} における回帰直線は

表1 式 (5), 式 (6), 式 (7) により推定された先行時間, 頤舌骨筋筋力, 甲状舌骨筋筋力

Tab. 1 Lead time, geniohyoid muscle and thyrohyoid muscle estimated by Eq. (5), Eq. (6) and Eq. (7).

Subject	Eq (5)			Eq (6)			Eq (7)		
	M_{LT} ($\times 10^{-2}$)	$\hat{M}_{LT}$ ($\times 10^{-2}$)	Err ($\times 10^{-2}$)	M_{GH} ($\times 10^2$)	$\hat{M}_{GH}$ ($\times 10^2$)	Err ($\times 10^2$)	M_{TH} ($\times 10^2$)	$\hat{M}_{TH}$ ($\times 10^2$)	Err ($\times 10^2$)
A	13.0	14.0	-1.00	1.09	1.61	-0.520	0.968	1.06	-0.0893
B	15.0	17.0	-2.00	1.55	1.25	0.299	0.924	1.14	-0.219
C	17.0	21.0	-4.00	0.951	0.881	0.0698	0.986	0.820	0.166
D	67.0	71.0	-4.00	0.724	0.739	-0.0148	0.724	0.894	-0.170
E	61.0	65.0	-4.00	0.969	1.04	-0.0713	0.287	0.611	-0.324
F	68.0	51.0	17.0	0.276	0.319	-0.0420	0.264	0.412	-0.148
RMSE (Err rate [%])	—	—	7.52 (12.5)	—	—	0.249 (19.2)	—	—	0.199 (11.6)

(a) Correlation between P_{LT} and M_{LT}

(b) Correlation between P_{GH} and M_{GH}

(c) Correlation between P_{TH} and M_{TH}

図8 光センサとEMGから求めた先行時間, 頤舌骨筋筋力, 甲状舌骨筋の散布図

Fig. 8 Correlations between photo sensor and EMG.

$$\hat{M}_{LT} = 1.04P_{LT} + 6.00 \times 10^{-3} \quad (5)$$

$$(R^2 = 0.935)$$

となり, M_{LT} と P_{LT} はほぼ同じ値となる. 図8 (b) の M_{GH} と P_{GH} における回帰直線は

$$\hat{M}_{GH} = 75.1 \times 10^2 P_{GH} + 25.0 \quad (6)$$

$$(R^2 = 0.748)$$

となる. 式 (6) は決定係数が0.748で M_{GH} と P_{GH} の間に比例関係があることを表しており, M_{GH} の増加に伴い P_{GH} も増加する. 図8 (c) の M_{TH} と P_{TH} における回帰直線は

$$\hat{M}_{TH} = 11.3 \times 10^3 P_{TH} - 2.80 \quad (7)$$

$$(R^2 = 0.695)$$

となり, 式 (7) は決定係数が0.695で M_{TH} と P_{TH} の間に比例関係があることを表しており, M_{TH} の増加に伴い P_{TH} も増加する. 式 (5)~(7) の散布図に使用しなかった6名 (A~F) の被験者における P_{LT} , P_{GH} , P_{TH} を用いて, 式 (5)~(7) から推定した $\hat{M}_{LT}$, $\hat{M}_{GH}$, $\hat{M}_{TH}$ と, 筋電から求めた M_{LT} , M_{GH} , M_{TH} を表1に示す.

式 (5) により推定した $\hat{M}_{LT}$ の二乗平均平方誤差 (RMSE) は 7.52×10^{-2} となった. これは, 図8 (a) の散布図における M_{LT} の範囲に対して12.5%の誤差となる. 式 (6) により推定した $\hat{M}_{GH}$ のRMSEは 0.249×10^2 となり, 図8 (b) の散布図における M_{GH} の範囲に対して19.2%の誤差であった. 式 (7) において推定した M_{TH} のRMSEは 0.199×10^2 となり, 図8 (c) の散布図における M_{TH} の範囲に対して11.6%の誤差となった.

5.2. 嚥下年齢の推定結果

図8の散布図を作成するのに使用した26名の被験者の M_{LT} , M_{GH} , M_{TH} から, 嚥下年齢を推定するため式 (4) の重回帰式を求める.

表2 光センサおよびEMGから求めた先行時間、頤舌骨筋筋力、甲状舌骨筋筋力を式(8)に代入し、嚥下年齢を推定した結果

Tab. 2 Results of estimated ages and each errors using parameters calculated by EMG and photo sensors in Eq.(8).

Subject	A	Eq(8)			
		EMG		Photo sensor	
		$\hat{A}$	Err	$\hat{A}$	Err
A	21	31.2	-10.2	24.3	-3.32
B	24	26.9	-2.89	28.8	-4.84
C	36	34.4	1.64	38.4	-2.41
D	49	58.8	-9.84	58.2	-9.21
E	63	58.2	4.76	55.2	-7.83
F	71	69.6	1.40	61.1	-9.91
RMSE	—	—	6.27	—	6.89

M_{LT} , M_{GH} , M_{TH} を説明変数, A を目的変数として重回帰分析を行った結果, 重回帰式は

$$\hat{A} = 37.5M_{LT} - 0.124M_{GH} - 0.107M_{TH} + 50.4 \quad (8)$$

$$(R^2 = 0.865)$$

となった. 式(8)に, 表1と同じ6名の被験者の M_{LT} , M_{GH} , M_{TH} と, 式(5)~(7)から求めた $\hat{M}_{LT}$, $\hat{M}_{GH}$, $\hat{M}_{TH}$ を入力して嚥下年齢を推定した結果を表2に示す. 式(8)に M_{LT} , M_{GH} , M_{TH} を代入した場合のRMSEは6.27歳となった. また, $\hat{M}_{LT}$, $\hat{M}_{GH}$, $\hat{M}_{TH}$ を代入した場合のRMSEは6.89歳となった.

6. むすび

本論では, 在宅環境などでも簡易に嚥下能力を評価するシステムとして, 光センサを用いた低拘束性の嚥下能力評価システムを提案した. 評価用のパラメータとして, 加齢に伴い機能が低下する先行時間, 頤舌骨筋筋力, 甲状舌骨筋筋力とし, 下顎および喉頭に設置した光センサを用いて推定した. 光センサと筋電を同時に計測し, それぞれ先行時間, 頤舌骨筋筋力, 甲状舌骨筋筋力を求めた. 光センサにおいて, 先行時間は2つの光センサの変化開始時間の差から求め, 頤舌骨筋筋力と甲状舌骨筋筋力はそれぞれの光センサを2階微分した波形の絶対値における筋活動時間の積分値として求めた. 筋電においては, 先行時間は頤舌骨筋の筋電と甲状舌骨筋の筋電の筋力の開始時間の差から求め, 頤舌骨筋筋力と甲状舌骨筋筋力はそれぞれの筋電図の絶対値における筋活動時間の積分値として求めた. 光センサと筋電から求めた26名の先行

時間, 頤舌骨筋筋力, 甲状舌骨筋筋力における回帰直線をそれぞれの推定式とし, 別の被験者6名に対して推定した結果, 先行時間は12.5%, 頤舌骨筋筋力は19.2%, 甲状舌骨筋筋力は11.6%の誤差で推定された. また, 先行時間, 頤舌骨筋筋力, 甲状舌骨筋筋力から総合的な嚥下能力を表す嚥下年齢を推定する推定式を重回帰式として求めた. 求めた重回帰式において, 光センサ, 筋電から求めた先行時間, 頤舌骨筋筋力, 甲状舌骨筋筋力を用いて嚥下年齢を推定した結果, それぞれRMSEは6.89歳, 6.27歳と同程度の誤差であった. 嚥下年齢は, 先行時間, 頤舌骨筋筋力, 甲状舌骨筋筋力の機能を総合的に評価するものであり, リハビリテーションにおいて, 患者の実年齢と比較することで嚥下能力評価の一指標となる.

参考文献

- 1) 丘村熙: 嚥下の仕組みと臨床, 金原出版, 1993.
- 2) 才藤栄一: 摂食機能減退の診断法の開発. 平成8年度厚生省・健康政策調査研究事業分担研究報告書, 厚生省, 37-58, 1997.
- 3) S. B. Leder: Videofluoroscopic evaluation of aspiration with visual examination of the gag reflex and velar movement, *Dysphagia*, 12, 21-23, 1997.
- 4) V. Kuhl, B. M. Eicke, M. Dieterich and P. P. Urban: Sonographic analysis of laryngeal elevation during swallowing, *Journal of Neurology*, 250 (3), 333-337, 2003.
- 5) S. B. Leder, L. M. Acton, H. L. Lisitano and J. T. Murray: Fiberoptic endoscopic evaluation of swallowing (FEES) with and without blue-dyed food, *Dysphagia*, 20, 157-162, 2005.
- 6) G. Ergun, P. Kahrilas and J. Logemann: Interpretation of pharyngeal manometric recordings: limitations and variability, *Diseases of the Esophagus*, 6, 11-16, 1993.
- 7) 武原格, 猪飼哲夫, 杉本淳: ヘリカルCTによる嚥下時の咽頭・食道評価, *リハビリテーション医学*, 40 (2), 121-126, 2003.
- 8) 高井優子, 前山啓充, 大久保美紀, 宇野敦彦, 福田慎治, 田代達也, 小川真: シネMRIを用いた嚥下画像診断の試み, *日本摂食・嚥下リハビリテーション学会雑誌*, 11 (3), 273, 2007.
- 9) 関根紀夫, 伊藤彰義: 摂食嚥下障害の診断評価支援システムの構築, *電子情報通信学会論文誌*, 84-D-II (6), 1231-1239, 2001.
- 10) 鈴木崇之, 五十嵐清治, 島弘之, 向井美恵: 筋電図と超音波診断装置の同調による嚥下運動解析方法の検討, *日本摂食・嚥下リハビリテーション学会雑誌*, 2 (1), 94, 1998.
- 11) 興津太郎, 有田元英, 園田茂, 大田哲生, 堀田富士子, 本田哲三, 千野直一: 舌骨上筋群における嚥下表面筋電図の電極位置の検討, *リハビリテーション医学*, 35 (4), 241-244, 1998.
- 12) 佐藤敏夫, 駒居鑑, 川島徳道, 加藤清, 阿岸鉄三, 東間紘: 嚥下音信号のウェーブレット変換による新しい波形

- 診断, 医学情報学, 25, 721-723, 2005.
- 13) 村山愛, 林豊彦, 中村康雄, 道見登: 反射型フォトセンサを用いた喉頭運動測定システムSFN/2Aの改良, MEとバイオサイバネティックス研究会 信学技報, 104 (755), 61-64, 2005.
 - 14) 村山愛, 林豊彦, 中村康雄, 道見登: 嚥下時における前頸部の皮膚面形状変化を利用した喉頭挙上運動の分析, 電子情報通信学会技術研究報告, 105 (456), 41-44, 2005.
 - 15) 古閑公治, 村山伸樹, 中原智喜, 中西亮二: 表面筋電図によるヒト嚥下運動の加齢による影響の定量的評価, 臨床神経生理学, 34 (5), 511-520, 2006.
 - 16) 大村林太郎, 安藤久範, 渡辺嘉二郎: 光センサを用いた嚥下機能評価システム, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 講演論文集, 299-302, 2004.
 - 17) Y. Kurihara, R. Omura and K. Watanabe: Evaluation system of swallowing function by using optical sensor in-home nursing, SICE-ICASE International Joint Conference Final Program & Digest Book, 137, 2006.
 - 18) J. A. Logemann: Logemann摂食・嚥下障害, 医歯薬出版株式会社, 19-28, 2002.
 - 19) 佐藤敏夫, 駒居鑑, 辻毅一, 川島徳道, 加藤清, 東間紘, 安藤哲郎, 阿岸鉄三: ウェーブレット変換を用いた嚥下音の時間一周波数解析による嚥下機能評価の試み, 医工学治療, 17 (4), 181-187, 2005.
 - 20) 金子芳洋: 摂食・嚥下メカニズムUPDATE構造・機能から見る新たな臨床への展開, 医歯薬出版株式会社, 44-45, 2006.
 - 21) 山越憲一, 戸川達男: 日本エム・イー学会編A-1生体用センサと計測装置, コロナ社, 206-209, 2000.