

咽喉マイクを用いた嚥下機能検査システムの開発

山下 大貴^{*1} 綱川 隆司^{*1} 西田 昌史^{*1} 西村 雅史^{*1}
古川 大輔^{*2} 村西 幸代^{*2} 森野 智子^{*3} 黒岩 眞吾^{*4}

^{*1} 静岡大学 情報学部 ^{*2} 君津中央病院 リハビリテーション科

^{*3} 静岡県立大学短期大学部 歯科衛生学科 ^{*4} 千葉大学 大学院融合科学研究科

1 はじめに

近年、高齢者を中心に肺炎に罹る人が増加している。平成27年において、肺炎は日本人の死亡原因の3位で、その大半が高齢者となっている。そして、高齢者の肺炎の主な原因として誤嚥が挙げられる[1]。誤嚥とは、気管内に固形物や流動物など異物を誤って飲み込む、または吸い込むことであり、嚥下機能が低下するほど誤嚥の可能性が高まる。また、嚥下機能は年齢と共に低下していく傾向にある[2]。

嚥下機能の検査方法としては、オーラルディアドコキネシスや最大発声持続時間(MPT)、反復唾液嚥下テスト(RSST)など、様々な方法が提案されている。これらのうち、オーラルディアドコキネシスでは、被験者に「/pa/」「/ta/」「/ka/」の単音節をそれぞれ10秒間にできるだけ早く繰り返し発声させて、1秒あたりの発声回数を測定する。回数の計測方法としては、主に、ICレコーダーで録音し後で回数を数える方法(IC法)、電卓のメモリ機能を用いる方法(電卓法)、ペンで点を打ち、点の個数を数える方法(ペン打ち法)などが用いられる[3]。IC法は正確にカウントすることが可能であるが、波形を表示するためパソコンが必要である。また、波形を確認しての計測には時間がかかり、簡易な方法ではない。一方、電卓法、ペン打ち法については、計測者の聞き取り能力に依存するところが大きく、IC法に比べて精度が落ちる。実際に、ペン打ち法の測定精度には限界があるとの報告がある[4]。

これらの問題から、オーラルディアドコキネシスの回数を自動で測定するシステムがいくつか開発されている[5][6]。しかし、いずれも騒音環境では正確に測定できないという問題があった。

今回、咽喉マイクロフォンとスマートフォンからなる簡単な装置で、騒音下における安定したオーラルディアドコキネシスの測定に加え、MPT及びRSSTの自動測定機能も実現した。また、実際の嚥下機能検査にも適用したので、それぞれの機能の実現方法と、性能評価結果について報告する。

2 従来方法とその課題

嚥下機能の検査は近年、地域や病院で定期的に開かれている。実際行われた検査の様子を図1に示す。一般的に1つの部屋で机を並べ各スペースに言語聴覚士を1人ずつ配置して各種検査を実施するのが一般的である。しかし、オーラルディアドコキネシスやMPTの測定では検査受診者自身が大きな声を発するため、必然的に周囲の測定にも影響を与え、これが自動計測誤りの大きな原因となっていた。

一方、RSSTの計測については完全自動化ではなく、触診で得た嚥下回数の記録を補助する形式のものが実用化されている[7]。



図1 嚥下機能検査の様子

3 提案手法とシステム構成

今回、オーラルディアドコキネシス、MPT、RSSTの3つの測定を自動化する、嚥下機能検査システムをスマートフォン上に開発した。MPTは最大吸気後、できるだけ長く「/a/」の発声を持続させ、長さを測定する検査方法である。RSSTは30秒間にできるだけ多く唾液を飲み込み、飲み込んだ回数を測定する検査方法である。

ここでは従来問題となっていた、騒音の影響を低減し、また、唾液嚥下回数の自動測定のため、咽喉マイクと呼ばれるマイクを利用する。咽喉マイクとは、首元に装着し、喉仏付近の振動を拾う特殊マイクである。利点として、騒音をほぼ拾わないため、騒音環境下でも装着者の音声のみを収録できる。これにより、騒音に頑健なシステムを開発することが可能となる。一方、欠点として、衣擦れ音という咽喉マイク特有の雑音が発生することがある。これは髪や衣服等と咽喉マイクがこすれた際に発生し、何らかの動作をする際に発生する機会が多い。ただし、今回は静止状態で音声データを取得するため、あまり影響がないと考えられる。

3.1 機器構成

検査会場において簡便に利用できるよう、本システムはAndroid OSを搭載した一般的なスマートフォン上に開発した。Android端末はマイク端子の規格が統一されていないため、図2に示すように、USBオーディオアダプタ経由で咽喉マイクを接続している。なお、イヤホンはRSST実行時に嚥下音をモニターする目的で使用される。

3.2 システム構成

本システムは開発環境としてAndroid Studioを使用しJava言語で実装した。まず、システム全体のフローチャートを図3に示す。

以下、図3のフローチャートに沿って本システムの詳細を説明する。



図2 機器構成の全体図

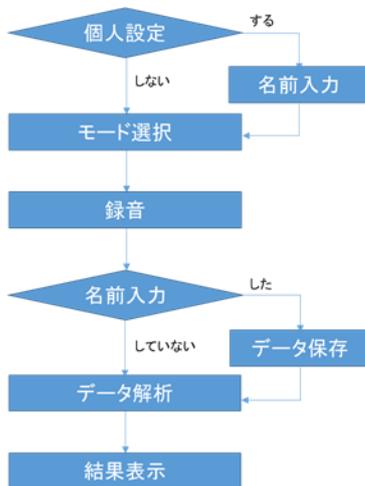


図3 本システムのフローチャート

3.2.1 個人設定

個人設定では、名前の登録を行う。名前を登録した場合、その名前のフォルダが生成され、登録されている間、音声データは無圧縮 wave ファイルとして保存される。これは、言語聴覚士が検査後にもう 1 度聞き直す場合が考えられるためである。名前の登録がない場合は、メモリの無駄な使用を避けるため、検査結果は表示されるが音声データは保存しない。

3.2.2 モード選択

モード選択では、オーラルディアドコキネシス回数の測定、MPT の測定、RSST の測定の 3 種類から行う検査方法を選択する。オーラルディアドコキネシス回数の測定では、タイマーを 5 秒または 10 秒に切り替えることができる。オーラルディアドコキネシス回数は 10 秒間の測定が一般的だが、評価値は 1 秒当たりの回数であるため、体力があまりない人のために 5 秒間でも測定できる設計にした。

3.2.3 録音

測定ボタンを押すと録音を開始する。録音のサンプリングレートは 16000Hz とした。測定時間があらかじめ決められて

いるオーラルディアドコキネシス回数の測定、RSST の測定は測定時間に合わせてタイマーをセットし、自動で録音を終了する。ただし、MPT の測定は、被験者によって録音する時間が変化するため、このモードでは手動で録音を停止してもらおう。RSST の測定の際は、検査担当者が嚙下音を聞けるよう、収録音をほぼリアルタイムでイヤホンに出力する。

3.2.4 データ解析

録音が終了した後、データ解析を自動的に開始する。咽喉マイクから得られた音声データ (RSST においては嚙下音データ) に対し、VAD (Voice Activity Detection) を用いて音声区間を検出する。VAD を用いる前処理としてプリエンファシスフィルタを用いる。また、バンドパスフィルタを使用することによって咽喉マイクの VAD の性能が向上することが報告されている [8]。ここでは、250kHz 以下と 4800kHz 以上をカットする。この 2 つの前処理を行った後、パワーベースの VAD を用いて音のパワーが閾値を超えた部分やその長さを調べ、音の区間を決定する。

3.2.5 結果表示

データ解析終了後、結果表示で測定値を表示する。オーラルディアドコキネシスの回数 (=「/pa/」,「/ta/」もしくは「/ka/」という音節の発声回数) の測定、RSST の測定は音声区間、または嚙下音区間を検出した数、MPT の測定は、検出した音声区間の長さが結果となる。また、オーラルディアドコキネシス回数の測定では、合計回数と共に 1 秒間当たりの回数を表示する。

3.3 ユーザーインターフェース

本システムの操作画面を図 4 に示す。図 4 の①はタイマー表示である。測定を開始するとタイマーが減少し、丸枠もタイマーの残り時間に合わせて減少する。②は結果表示部分となっている。③はオーラルディアドコキネシス回数の測定におけるタイマーの切り替えスイッチであり、オーラルディアドコキネシス回数の測定時のみ変更可能となっている。④はモード選択部分である。「count」がオーラルディアドコキネ



図4 本システムの操作画面

シス回数の測定, 「length」が MPT の測定, 「swallow」が RSST の測定にあたる。⑤は測定ボタンである。測定時は測定ボタン以外操作不可となっている。⑥は名前入力ボタンとなっている。このボタンを押すと名前入力画面に遷移し、登録すると⑥のボタンの右に名前が表示され、測定終了時に音声ファイルが保存される。

4 予備実験

4.1 実験条件

男女各 5 名(22 歳～50 歳)を対象に簡易防音室内で、オーラルディアドコキネシス回数, MPT, RSST の測定性能を評価するための予備実験を行った。また、オーラルディアドコキネシス回数の測定では「/pa/」, 「/ta/」, 「/ka/」のそれぞれについて性能評価を行った。

実験では、咽喉マイクを接続した Android 端末を用いて、各モードの測定をそれぞれ 5 セット行う(計 50 データ)。測定を行う際、体はできるだけ動かさないよう意識してもらった。また、RSST の測定では被験者に嚥下した回数を数えてもらい、測定終了後に報告するようにした。

ここでは、測定したデータをすべて音声データとして保存し、後に IC 法を用いてオーラルディアドコキネシス回数の測定, MPT の測定を行った。オーラルディアドコキネシス回数の測定の際、図 5 や図 6 の枠で囲ったような波形がいくつか見られた。図 5 の枠で囲った波形は空気を漏らしたように聞こえ、母音が発声できていなく子音だけの発声になっている。これは正しい発声とは言えないため回数にカウントしない。図 6 の枠で囲った波形は、発声が連なっているように見える。本来、「/pa/」, 「/ta/」, 「/ka/」といった無声破裂音では、子音の前に必ず無音区間が存在する。そのような無音区間が消失しているということは、正しい調音が行われていないことを示唆していること。よって、これも正しい発声とは言えないため回数にカウントしない。検出結果に対して相対誤差, 適合率, 再現率, F 値(MPT は相対誤差のみ)を算出し本システムの性能評価を行った。相対誤差は測定値と正解値の差から二乗平均平方根(RMS)を求め、その値を平均値で割り算出した。

4.2 実験結果

実験の結果得られた各項目の相対誤差, 適合率, 再現率, F 値の結果を表 1 に示す。まずオーラルディアドコキネシス回数の測定について、「/pa/」は相対誤差が 1.4%と小さく、適合率, 再現率が 99%台であり、F 値が 0.997 と検出精度が高いことが分かる。次に、「/ta/」は相対誤差が 2.1%であり、適合率, 再現率が 99%台, F 値が 0.994 と「/pa/」に比べると若干劣るが、「/ta/」も検出精度が高いことが言える。次に「/ka/」であるが、こちらは相対誤差が 4.0%とやや多く、適合率が他の 2 つに比べて低い数値となっている。理由としては、図 5 や図 6 のような波形がほかの 2 つに比べ多く見受けられたため、うまく検出できなかったのではないかと考えられる。次に MPT の測定は、相対誤差が 2.9%で、検出精度が高いことが言える。最後に RSST の測定は、相対誤差が 21.4%と大きく、F 値も 0.934 と他の項目よりも少し劣っており、特に適合率が 89.0%と低い数値となってしまった。理由としては、嚥下音だけでなく、嚥下をしようとして口の中を動かしているときに発生する音を嚥下音としてカウントする機会がいくつか見受けられたため、適合率が下がったと考えられる。

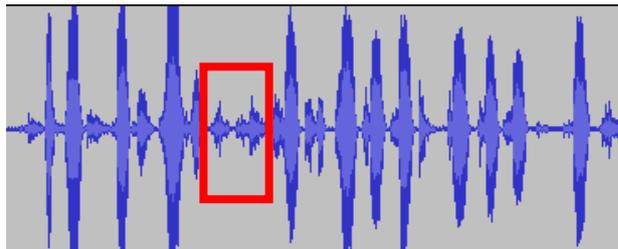


図 5 母音が欠落した例

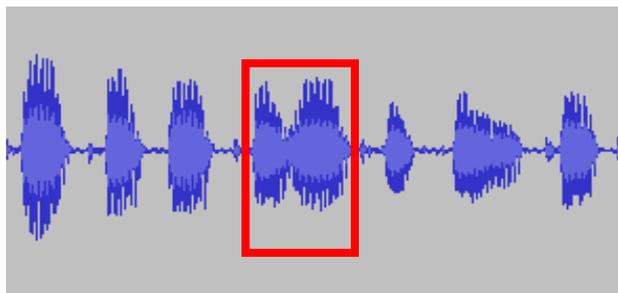


図 6 発話が連結してしまった例

表 1 予備実験の結果

評価項目	相対誤差	適合率	再現率	F値
/pa/	1.4%	99.7%	99.6%	0.997
/ta/	2.1%	99.2%	99.6%	0.994
/ka/	4.0%	98.1%	99.4%	0.988
MPT	2.9%			
RSST	21.4%	89.0%	98.2%	0.934

5 実使用環境下での性能評価実験

2016 年の 9 月に開催された市民公開フォーラムで、「飲み込みチェック」と題して病院の講堂にブースを設置し、訪れた市民にこのシステムを使用してもらった。図 1 に示すような環境下であり、かなり騒がしい状況である。

5.1 実験条件

訪れた男女 29 人(61 歳～86 歳)を対象に、騒音環境下(62～81db)で、オーラルディアドコキネシス回数, MPT, RSST の測定を行った(内 1 人は MPT, RSST の測定のみ)。測定回数はそれぞれ 1 回ずつとし、測定には言語聴覚士が補助に付く。正解値としては、オーラルディアドコキネシス回数の測定と MPT の測定では IC 法の測定値, RSST の測定では嚥下運動時に起こる喉頭挙上→下降運動を言語聴覚士が触診で確認し、30 秒間に起こる嚥下回数の測定値を用いた。これらを用いて 4 章と同様の流れで処理を行い、本システムの性能評価を行った。

5.2 実験結果

実験の結果得られた各項目の相対誤差, 適合率, 再現率, F 値の結果を表 2 に示す。まずオーラルディアドコキネシス回数の測定について、「/pa/」については相対誤差 3.6%と予備実験時に比べやや大きくなってしまった。ただ、F 値が 0.991 と高く、実環境下でも検出精度が高いことが分かる。「/ta/」については、相対誤差, 適合率, 再現率, F 値も予備実験の結果とほぼ変わらず、実環境下でも検出精度が高いことが分かる。

表2 実環境下実験の結果

評価項目	相対誤差	適合率	再現率	F値
/pa/	3.6%	99.3%	98.9%	0.991
/ta/	2.3%	99.3%	99.5%	0.994
/ka/	5.5%	97.3%	99.8%	0.985
MPT	7.9%			
RSST	96.7%	53.7%	95.9%	0.689

「/ka/」については相対誤差が5.5%で、F値が0.985と予備実験の結果と比べて若干精度が下がっているが、実環境下でも問題なく動作していることが分かる。次にMPTの測定について、相対誤差が7.9%と予備実験に比べて5ポイントも低くなってしまった。理由として録音中に「/a/」を発声し終えた後すぐ測定と関係ない発声をする被験者が何名も見られ、その発声もシステムがMPT測定の発声と認識してしまったと考えられる。最後にRSSTの測定について、相対誤差が96.7%と予備実験に比べ約75ポイントも大きくなっており、適合率は53.7%と約35ポイントも低くなっている。理由としては、RSSTの測定と同じように測定中に測定とは関係ない発声や、嚥下がうまくできず咳をする被験者が何名も見られた。また、実環境下実験では被験者の多くが嚥下機能の低下傾向にある高齢者であるため嚥下がスムーズに行えず、嚥下をしようと口の中を動かしている行為が嚥下として測定される回数が予備実験の被験者に比べかなり多かったためだと考えられる。

6 考察

今回、予備実験と実環境下実験の2種類の実験を行った。予備実験では、オーラルディアドコキネシス回数の測定ではF値が1.0に近い結果が得られ、MPTの測定も相対誤差が小さく、非常に高い検出精度であることが分かった。RSSTの測定においてもF値が0.9を超えており、高い検出精度であるといえる。

実環境下実験ではオーラルディアドコキネシス回数の測定は高い精度を保った。この結果から騒音環境下でもこのシステムが有用であることが分かった。一方MPTの測定とRSSTの測定に関しては、予備実験に比べ精度が下がってしまった。

MPTの測定やRSSTの測定は、オーラルディアドコキネシス回数の測定に比べ測定時間が長く、被験者が測定と関係ない発声をする場合が見られ、RSSTの測定では特にその影響が目立った。さらにRSSTの測定では、嚥下をしようと口の中を動かしている音も誤計測の大きな原因となっており、パワーベースのVADでこれらを区別するのは難しいため、音の特徴量を考慮したVADを検討する必要があると考えている。

7 おわりに

本研究では、咽喉マイクとスマートフォンからなる簡単な装置を用いた嚥下機能検査システムの開発を行い、今まで手動で行うことが多かった嚥下機能検査において、本システムを用いることでオーラルディアドコキネシス回数、MPTの測定を高い精度で実施できることを示した。また、従来問題となっていた、騒音の大きい環境下でも頑健な嚥下機能検査が可能であることを示した。

今後、あまり精度の良くなかったRSSTの測定を中心に検出手法を変えて精度の向上を行い、騒音以外の雑音にも対応

できるよう改善していく予定である。

謝辞

本研究の一部はJSPS科研費(16K13028)の助成を受けた。また、電気通信普及財団の研究調査助成を受けた。

参考文献

- [1] 大類孝, 海老原孝枝, 荒井啓行: 高齢者肺炎・誤嚥性肺炎, 日本内科学会 第99巻 第11号 pp 2746-2751, (2010)
- [2] 飴矢美里, 西窪加緒里, 三瀬和代, 本吉和美, 兵頭政光: 加齢による嚥下機能の変化, 耳鼻と臨床, Vol. 52, No. 6 Supplement4 pp. 249-255, (2006)
- [3] 伊藤加代子, 葭原明弘, 高野尚子, 石原和男, 清田義和, 井上誠, 北原稔, 宮崎秀夫: オーラルディアドコキネシスの測定に関する検討, 老年歯学 第24巻 第1号 pp. 48-54, (2009)
- [4] 小島 成実, 関口 晴子, 大淵 修一: オーラルディアドコキネシスのペン打ち法検査の限界, 応用老年学 6, pp16-20, (2012)
- [5] 伊藤加代子: 新しい口腔機能測定器を用いたオーラルディアドコキネシスの測定, 新潟歯学 第39巻 第1号 pp61-63, (2009)
- [6] パタカウンター:<<https://itunes.apple.com/jp/app/patakaunta/id492166806?mt=8>>(2016年10月16日取得)
- [7] 竹井機器工業株式会社 | 高齢者健康増進・介護予防関連 | 口腔機能:<<http://www.takei-si.co.jp/productinfo/detail/61.html>>(2016年10月16日取得)
- [8] Tomas Dekens, Werner Verhelst, Francois Capman, Frederic Beaugendre, "IMPROVED SPEECH RECOGNITION IN NOISY ENVIRONMENTS BY USING A THROAT MICROPHONE FOR ACCURATE VOICING DETECTION", 18th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), pp. 1978-1982, (2010)