

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26893125

研究課題名(和文)嚥下機能評価アルゴリズムの検討

研究課題名(英文)Evaluation Algorithm of Swallowing Function

研究代表者

八木 直美(Yagi, Naomi)

京都大学・医学(系)研究科(研究院)・研究員

研究者番号：40731708

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、人間の生存に関わる基本活動である「モノを飲み込み胃に送り込む」という嚥下機能を、ファジィ理論を用いて音や呼吸に関する情報を解析し、非侵襲かつ身体的・心理的ストレスフリーな方法でセンシングして、嚥下障害の簡易診断システムを開発した。現状の嚥下機能検査は、X線造影検査が一般的であるが、本システムでは、計測精度を従来と同程度に維持することを目的とした上で場所、時間、体位・動作等の制限や拘束が少なく、さらにX線取り扱い技術が不要な、安価で簡便な検査を実現した。解析結果を被験者にフィードバックすることにより健康維持のため、健康管理にも役立てた。

研究成果の概要(英文)：This study developed a simple diagnostic system of dysphagia for the basic activities related to human survival swallowing feature by analyzing the sound and breathe information with a fuzzy theory, and using non-invasive and physical and psychological stress-free sensing system. In recent years, the swallowing function tests is commonly X-ray contrast examination, however this system had achieved an inexpensive and simple test which does not limit place, time, position, movement and not need further X-ray handling techniques, for the purpose of maintaining the measurement accuracy in the conventional level. It served also to health care management by feeding back the analysis results to the subject.

研究分野：工学

キーワード：嚥下 ソフトコンピューティング ファジィ 誤嚥性肺炎 機能評価

1. 研究開始当初の背景

現在、肺炎は日本人の死因第3位である。平成22年まで肺炎は悪性新生物、心疾患、脳血管疾患に次いで第4位であったが、現在では、脳血管疾患に代わって死因の第3位となっている。また、肺炎の割合は死亡原因の約10%を占める。飲食物を口の中に取り込んで、咽頭から食道・胃へと送り込むという一連の動作である「嚥下」が正しく働かないことを「嚥下障害」、飲食物が咽頭、気管に入り込むことを「誤嚥」と定義される。日本の65歳以上の高齢者は、高齢者の総人口に占める割合24.1%で過去最高3,074万人(平成24年9月15日総務省)である。また、聞き取り調査によると、65歳以上の約1/3が嚥下障害であると答えている。すなわち、我が国では約1,000万人の高齢者が嚥下障害であると推定される。肺炎による死者の約90%以上は65歳以上の高齢者である(図4)。男性においては既に平成20年に脳血管疾患に代わって肺炎が死因3位となっており、一過性の結果とは考え難い。人口の高齢化に伴って、誤嚥性肺炎による死者は増え続けている。

2. 研究の目的

誤嚥性肺炎は咽頭、副鼻腔、歯周、口腔に常在する病原体が、嚥下障害のために唾液などの分泌物とともに気管に入り込んで、気道内に感染し、引き起こされる。実際、食事の誤嚥よりは、細菌を含む唾液などの分泌物が夜間知らず知らずのうちに気道に入り込む不顕性誤嚥が原因になることも多い。故に、1,000万人の日本人嚥下障害者の誤嚥リスクを診断する支援システムの開発は急務となっている。本システムの開発により、同時に日本に300万人以上いる睡眠時無呼吸症候群患者も拾い出せる。

現在、嚥下機能の評価は、嚥下造影検査が一般的であり、信頼性の高い検査であるが、X線被曝の観点から長時間の撮影や繰り返しの評価を行うことは困難である。また、レントゲン検査室でしか実施できず、検査者は解剖学的構造と嚥下障害の機序に関する知識が必要であり、被験者は、坐位で食べ物を飲み込んで行う検査であるので体位も限定され、就寝時などの仰臥位での検査も不可能である。

臥位状態の嚥下信号は非常に弱く、嚥下検出できないという課題が生じている。現状、ベッド上に座位の状態ですべての水を口に含み再び臥位になって飲み込んだ場合、嚥下識別率(=陽性的中度: TP/(FP+TP))は、約67%である。そこで、本研究において、さらに高精度(同条件下で識別率90%以上)を目標としたシステムを開発する。嚥下活動の長時間無拘束モニタリング装置(特許5353479号 嚥下活動モニタリング装置、嚥下活動モニタリングシステム、生体情報記録装置および嚥下活動モニタリングプログラム)を開発したが、さらに精度を向上させた嚥下検出ア

ルゴリズム開発が必要であることが判明した。本研究では、より高精度な嚥下検出アルゴリズム構築を目的とし、嚥下障害のための診断・評価支援システムの開発を行う。計測信号情報である音情報、呼吸情報についての個別の解析を実施し、これらの情報を組み合わせファジィ推論におけるシステム構築を行うと同時に嚥下音抽出アルゴリズムの解明を行う。

また、嚥下後の呼気音のウェーブレット解析で、およそ350Hz以上の帯域における「ゆらぎ」を確認することによって、不顕性誤嚥が検出できると報告している。本研究では、呼気音の信号解析など、個々の信号解析アルゴリズムに引き続き、改善実施する。

本研究では非拘束かつ非侵襲な検査機器を用いた嚥下障害のための診断・評価支援システムを開発する。音情報を用いて周波数解析し、呼吸情報をファジィ論理によって組み合わせアルゴリズムを構築することは生体情報を処理する上では学術的に新規性が高い。日本に1000万人以上いる嚥下障害者のなかで、誤嚥性肺炎になる危険性が高く、治療が必要な人を選別する。同時に日本に300万人以上いる睡眠時無呼吸症候群患者も拾い出す。また、スーパーコンピュータでの研究開発において、大規模データの転送、解析等の方法と計算科学的方法との融合の方法について研究を行い、「ハイパフォーマンス・コンピューティング」分野での研究成果を社会還元への促進に繋げる。

3. 研究の方法

平成26年度

嚥下障害を抽出するために音情報と呼吸情報を取得する。音情報を用いて、正常な嚥下と比較して嚥下後の低周波数帯パワーの増加によって誤嚥を判断する。また、呼吸情報を用いて、誤嚥のリスクが高いとされる「吸息中の嚥下時」、「嚥下から次の吸息までの潜時」を抽出する。高齢者では臥位において平均40%の嚥下が吸息中に起きている。本研究では、精度向上のために、従来研究には例がない音情報と呼吸情報との組み合わせによるファジィ論理を用いた嚥下抽出アルゴリズムを構築する。

呼吸の状態は、酸素療法時に用いられるような「鼻腔カニューラ」(鼻チューブ、図1)を用いて計測する。また音の情報は、のど仏上に張り付ける「センサ」(約3×1cm大)と「咽喉マイク」(図2)を用いて音波形信号を取得する。センサとマイクの両方から音情報を計測し、それらと比較することによって音解析およびセンサの精度向上を目指す。被験者には図3のように装置を装着する。

嚥下状態を比較解析するために、物性(固さ)をコントロールした3種類の検査食(L0ゼリー、L2ゼリー、L3ペースト、図4)、水3ml

を使用する。姿勢条件は通常、椅子座位で行い、夜間モニタリング時は仰臥位とする。



図1 鼻腔カニューラ
(呼吸情報取得用)



図2 咽喉マイク
(音情報取得)

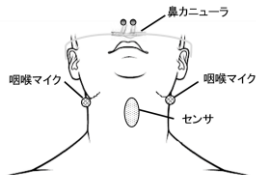


図3 装置の装着位置



左:L0 ゼリー
中央:L2 ゼリー
右:L3 ペースト
図4 検査食

計測されたデータはSDカードに保存される。計測データは、匿名化されたものを処理することとし、被験者のデータベース登録を行う。データサイズは約1分計測で約2Mbである。被験者一人当たりのデータサイズは、通常計測時=約15Mb、睡眠時(8時間)=約1Gbである。第1ステップとしては、SDカードの受け渡しにてデータ転送、管理する。これらの処理は京都大学にて行う。

平成27年度

平成26年度における試験を継続的に行う。嚥下呼吸状態および嚥下の回数、吸息相で起こる嚥下の割合、嚥下後吸息相が再開するまでの潜時の情報から誤嚥のリスク評価と睡眠時無呼吸の評価を同時に行う。さらに、被験者の背景や嚥下状態の関係を検討することにより、どういった場合に誤嚥が起こる可能性が高くなるのかを明らかにする。いびき、発声、首振りなどのアーチファクトと嚥下を区別する。それによって、夜間の呼吸状態および嚥下の回数、吸息相で起こる嚥下の割合、嚥下後吸息相が再開するまでの潜時を検出できる。嚥下に伴う動きといびき、発声、首振りなどの信号を分離するために、平成26年度で得た技術、知識をもとにアルゴリズムを開発する。また、音の指向性についても検討する。主要なデータ管理においては京都大学医学部本研究室にて行うが、アルゴリズム解析においては大规模データ処理の速度向上を目的とし、スーパーコンピュータ上で実装する。データ転送システムの第2ステップとしてクラウドシステムの構築を検討する。

4. 研究成果

本研究では非拘束かつ非侵襲な検査機器を用いた嚥下障害のためのファジィ評価支援システムを開発した。

音についての詳細実験は1名の健常な被験者に対して実施した。12分間の計測時間のうち、実嚥下27回、いびき、深呼吸、発声などの非嚥下動作60回を含む。嚥下音と「いびき」音に対して周波数解析した結果の一例をFig. 5, 6に示す。嚥下音であるFig. 5において、4,000-5,000Hzの高周波数領域にて著しいピークが見られた。非嚥下音(いびき)を周波数解析したFig. 6においては3,000Hz以下の帯域にて高い分布がみられた。また、計測時間全体では、159回の音発生に対して本システムを適用した結果と特異度を表1に示す。

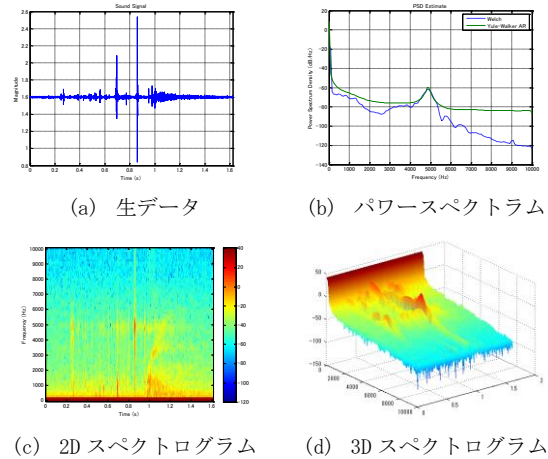


図5 嚥下音周波数解析結果

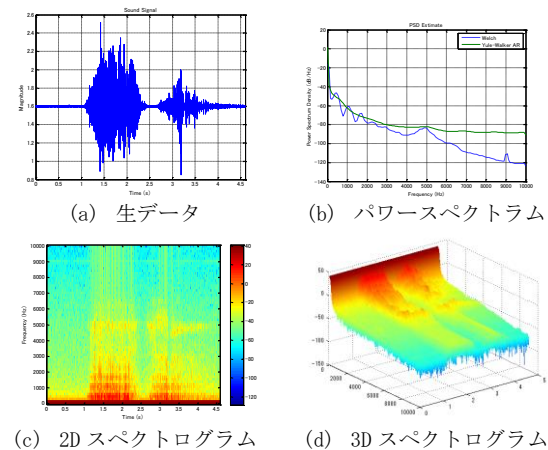


図6 非嚥下音(いびき)周波数解析結果

音情報のみ(方法1)、呼吸情報のみ(方法2)、音情報と呼吸情報(方法3)を用いた3種類の方法を適用した結果、方法3にて特異度86.4%の最も良い評価が得られた。呼吸情報を用いない解析手法の場合、特異度28.0%の結果であったことより嚥下抽出時には、呼吸情報が非常に有用であることも確認できた。

表 1 嚥下音解析結果

	音のみ	呼吸のみ	音+呼吸	
実嚥下の抽出回数	TP	27	27	27
実嚥下の未抽出回数	FN	0	0	0
非嚥下の過抽出回数	FP	95	20	18
非嚥下の未抽出回数	TN	37	112	114
総回数		159	159	159
特異度		28.0%	84.9%	86.4%

さらに音情報、呼吸情報をファジィ論理によって組み合わせアルゴリズムを構築した。被験者 5 名（男性 4 名、女性 1 名）に対して実験を行った結果、84.85%の精度で嚥下を自動判定することができた。

本研究では、嚥下を自動判定するためにファジィ推論を用いてシステムを構築した。呼吸停止している区間において嚥下活動が見られる。また、音強度が大きいときに嚥下活動がみられる。これらの特徴より、以下に示す 2 つの知識が得られる。

知識 1： 嚥下活動は、呼吸停止時間に発生する。

知識 2： 嚥下活動は、音強度が大きいときに発生する。

これらの知識より以下に示すファジィ IF-THEN ルールが導出される。

ルール 1： IF 呼吸停止時間情報が低度である THEN 嚥下活動レベルが低度である

ルール 2： IF 呼吸停止時間情報が中度である THEN 嚥下活動レベルが中度である

ルール 3： IF 呼吸停止時間情報が高度である THEN 嚥下活動レベルが高度である

ルール 4： IF 音強度情報が低度である THEN 嚥下活動レベルが低度である

ルール 5： IF 音強度情報が中度である THEN 嚥下活動レベルが中度である

ルール 6： IF 音強度情報が高度である THEN 嚥下活動レベルが高度である

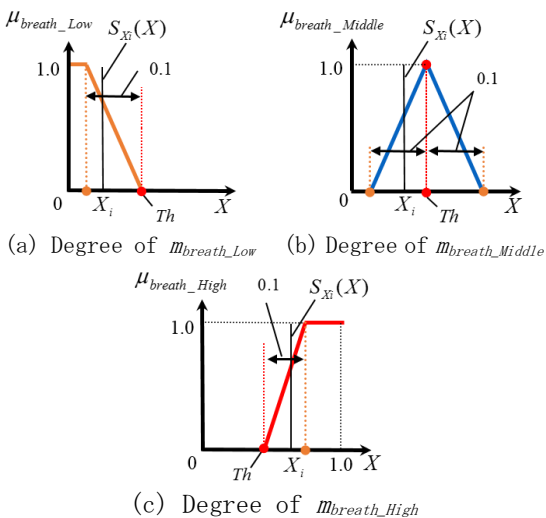


図 7 ファジィメンバーシップ関数 (呼吸停止時間情報)

これらのファジィ IF-THEN ルールに基づいて構築される入力メンバーシップ関数につ

いて、呼吸停止時間情報に関する関数を図 7、音強度情報に関する関数を図 8 に示す。

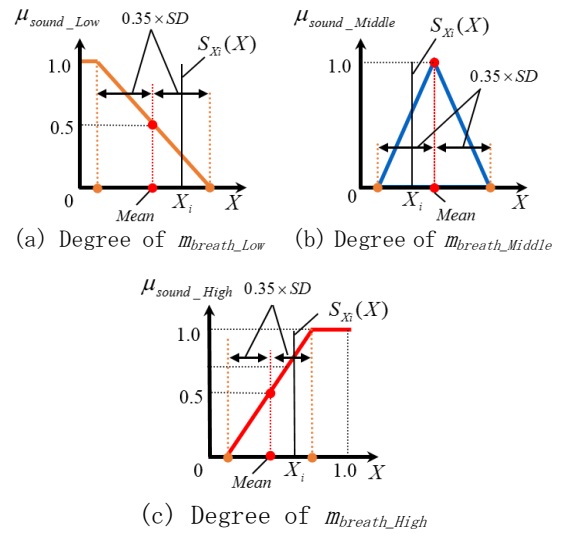


図 8 ファジィメンバーシップ関数 (音強度情報)

ファジィ所属度 $m(\text{breath, sound})_{(Low, Middle, High)}$ は、以下の式 (1)-(6) にて示される。

$$\mu_{\text{breath_Low}}(X) = \min\{\text{Low}_{\text{breath}}, S_{X_{\text{breath}}}(X_{\text{breath}})\} \quad (1)$$

$$\mu_{\text{breath_Middle}}(X) = \min\{\text{Middle}_{\text{breath}}, S_{X_{\text{breath}}}(X_{\text{breath}})\} \quad (2)$$

$$\mu_{\text{breath_High}}(X) = \min\{\text{High}_{\text{breath}}, S_{X_{\text{breath}}}(X_{\text{breath}})\} \quad (3)$$

$$\mu_{\text{sound_Low}}(X) = \min\{\text{Low}_{\text{sound}}, S_{X_{\text{sound}}}(X_{\text{sound}})\} \quad (4)$$

$$\mu_{\text{sound_Middle}}(X) = \min\{\text{Middle}_{\text{sound}}, S_{X_{\text{sound}}}(X_{\text{sound}})\} \quad (5)$$

$$\mu_{\text{sound_High}}(X) = \min\{\text{High}_{\text{sound}}, S_{X_{\text{sound}}}(X_{\text{sound}})\} \quad (6)$$

ここでのシングルトン関数は式 (7) にて定義される。

$$S_{X_i}(X) = \begin{cases} 1 & \text{if } X = X_i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

また、出力メンバーシップ関数を図 9 に示す。

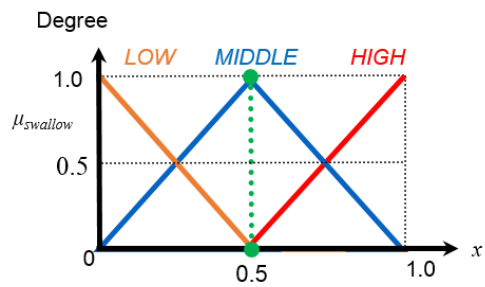


図 9 出力メンバーシップ関数

ファジィ集合の積集合、和集合を定義し、それぞれのファジィメンバーシップ値は式 (8)-(10) にて定義される。

$$w_{Low} = \mu_{breath_Low}(X_{breath}) \wedge \mu_{sound_Low}(X_{sound}) \quad (8)$$

$$w_{Middle} \quad (9)$$

$$= \mu_{breath_Middle}(X_{breath}) \wedge \mu_{sound_Middle}(X_{sound}).$$

$$w_{High} \quad (10)$$

$$= \mu_{breath_High}(X_{breath}) \wedge \mu_{sound_High}(X_{sound}).$$

式(11)を用いてMIN-MAX重心法から嚥下である度合いを式(12)にて算出する。詳細は図10に示す。

$$M(X_{swallow}) = (w_{Low} \wedge M_{Low}(X_{swallow})) \vee (w_{Middle} \wedge M_{Middle}(X_{swallow})) \vee (w_{High} \wedge M_{High}(X_{swallow})) \quad (11)$$

$$\hat{X}_{swallow} = \frac{\int M(X_{swallow}) X_{swallow} dX_{swallow}}{\int M(X_{swallow}) dX_{swallow}} \quad (12)$$

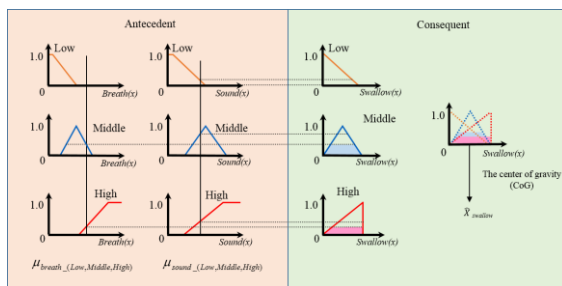


図10 ファジィMIN-MAX重心法

3種類の検査食、水を用いて5名の被験者に対して3回の実験(全12回)を行った。その結果、84.85%の抽出率を嚥下自動抽出することができた。過抽出率は22.03%であったが、これには唾液嚥下も含まれるので、実際にはより高精度の結果が得られると考えられる。

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)

- ① N. Yagi, R. Takahashi, H. Ueno, T. Yabe, Y. Oke and Y. Oku, "Swallow-Monitoring System with Acoustic Analysis for Dysphagia," Proc. of 2014 IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, pp. 3717-3722, 2014.

[学会発表] (計 6 件)

- ① 八木直美, 永見慎輔, 上野博, 家邊徹, 尾家慶彦, 越久仁敬, "音声信号解析を用いた嚥下抽出システムの開発," 第57回自動制御連合講演会, 2014. 11. 10-12, ホテル天坊.
- ② N. Yagi, S. Nagami, H. Ueno, T. Yabe, J. Kayashita, Meng-Kuan Lin, Y. Oke and

Y. Oku, "Noninvasive Assessments of Swallowing Function by Sound Frequency Analysis," the 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, no. 3758, 2015. 08. 26-30, Mico Milano Congressi.

- ③ 永見慎輔, 八木直美, 魚住龍史, 山縣誉志江, 延原浩, 平位知久, 伊藤圭子, 田中信吾, 森田智視, 高橋良輔, 栢下淳, 越久仁敬, "物性調整した食品別の嚥下動態の相違と適切な嚥下調整食選択への応用," 第39回日本嚥下医学会学術講演会, 2016. 02. 11-12, 大阪国際交流センター.
- ④ 永見慎輔, 室繁郎, 佐藤篤靖, 佐藤晋, 八木直美, 越久仁敬, "呼吸と嚥下の整合性から見た COPD 患者の嚥下機能異常," 第24回バイオフィジオリジー研究会, 2016. 03. 04-05, ホテル京阪京都.

<招待講演>

- ⑤ 八木直美, "嚥下障害のための生体データ計測," 医療と健康のシンポジウム, 2015. 3. 16, 兵庫県立大学.
- ⑥ N. Yagi, "Healthcare Monitoring System for Swallowing by Wearable Sensors," 4th International Conference on Informatics, Electronics & Vision, 2015. 6. 16, Kitakyushu International Conference Center, Japan.
- ⑦ N. Yagi, "Bioinformation Measurement for Dysphagia," 2015 International Conference on Machine Learning and Cybernetics and 2015 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, 2015. 7. 14, Holiday Inn Guangzhou Shifu, China

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:

種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

八木 直美 (YAGI, Naomi)
京都大学・医学（系）研究科（研究院）・
研究員
研究者番号：40731708

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし