

124. 嚥下障害者のリハビリテーションのための嚥下音に基づく低コスト・モバイル・バイオフィードバックシステムの開発

徳島大学大学院社会産業理工学研究部理工学域 准教授 榎本 崇宏

概要

社会の高齢化に伴い、今後も摂食嚥下障害患者の増加が予想される中、摂食・嚥下リハビリテーションの手法として表面筋電図（sEMG）を視覚バイオフィードバックとして用いる方法が注目されているものの、前処理の煩雑さや装置のコスト・操作性の面から実用化には至っていない。そこで本研究では、皮膚前処理を必要としないシングルセンサを用い、嚥下音に基づく低コストかつモバイルなバイオフィードバックシステムの開発を目指した。本システムは、医歯工連携の下、嚥下時の筋活動情報を強く反映する嚥下音の音響特徴を詳細に解析することにより、従来のsEMGを用いた手法に代わる新たな評価指標としての可能性を探るものである。実験では、健常者6名を対象に、通常嚥下および意図的な嚥下操作（強く嚥下、（吸気における）息を堪えて嚥下、喉頭挙上を保持し嚥下、オトガイ舌骨筋緊張嚥下）の各条件下で嚥下音と7領域（RUSHR(Right Upper Suprahyoid Muscle Region), LUSHR(Left Upper Suprahyoid Muscle Region), RLSHR(Right Lower Suprahyoid Muscle Region), LLSHR(Left Lower Suprahyoid Muscle Region), GM(Geniohyoid Muscle), RIHR(Right Infrahyoid Muscle Region), LIHR(Left Infrahyoid Muscle Region)）から得られた各sEMG信号の持続時間との関連性を評価した。特に、通常嚥下においては嚥下音に筋活動の情報が十分に反映されず、逆に意図的な操作条件では、嚥下音が各筋群の活動をより明確に反映することが示唆された。本報告は予備的な結果を示すものであるが、本手法の更なる発展により、低侵襲かつ迅速な嚥下評価が可能となり、リハビリテーションの質の向上が期待される。

背景および目的

高齢化社会の進展に伴い、摂食嚥下障害は今後ますます临床上重要な課題となる。特に、誤嚥性肺炎などの合併症リスクを背景に、早期診断と効果的なリハビリテーションが求められている。近年、sEMGを用いた視覚バイオフィードバック療法がリハビリテーションの一手法として注目されているが、導電性ゲルなどの前処理が必要なため、その実用性や普及には課題が残る[1,2]。そこで本研究は、前処理不要なシングルセンサを利用して嚥下音を取得し、嚥下時の筋活動情報が如何に音響的特徴に反映されるかを明らかにすることを目的とする。医歯工連携のもと、嚥下音とsEMGとの関連性を解析することで、従来の手法に代わる低コスト・モバイルなバイオフィードバックシステムの構築を目指し、臨床現場での迅速かつ非侵襲的な摂食・嚥下評価への応用可能性を検討する。

方法

本研究は、平均年齢 22 ± 0.90 歳の健常な男性6名を対象に実施された。被験者は椅座位にて正面を向いた状態で実験に参加し、図1に示すような、RUSHR、LUSHR、RLSHR、LLSHR、オトガイ舌骨筋（GM）、RIHR、および、LIHRの計7領域に対して各sEMG電極を配置し、基準電極は耳朶に設置した上で、双極誘導法により各領域におけるsEMG信号を取得した。同時に、咽喉マイクロフォンを用いて嚥下音を記録し、記録開始前に電極

と咽喉マイクロフォンを叩くことで同期信号を生成し、その信号を用いて各データの同期を確立した。各被験者には、常温水 3 ml を用いて、記録開始 2 秒後に嚥下動作を行わせた上で、通常嚥下（タスク A）、強く嚥下（タスク B）、息を堪えて嚥下（タスク C）、喉頭挙上を保持し嚥下（タスク D）、オトガイ舌骨筋緊張嚥下（タスク E）の 5 条件をランダムな順序で各 3 回実施させた。

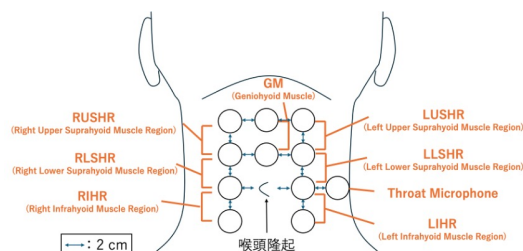


図 1. sEMG 電極並びに咽喉マイクロフォンの配置位置

記録された嚥下音信号は、反復スペクトル減算法を用いてノイズ除去を行い、200 ms の短時間エネルギー (STE) 波形およびエネルギー閾値に基づいて嚥下区間、すなわち嚥下音の持続時間を抽出した。一方、sEMG 信号は、30～500 Hz の帯域におけるパワーを算出し、200 ms のメディアンフィルタによる平滑化処理を施した上で、同様に持続時間を抽出した。各嚥下タスクにおいて、嚥下音の持続時間と各領域の sEMG 信号の持続時間との関連性は、Pearson の相関係数により評価され、0.40 未満を「弱い相関」、0.40 以上 0.60 未満を「中程度の相関」、0.60 以上を「強い相関」と分類した[3,4]。

結果および考察

実験結果において、通常嚥下（タスク A）では、RUSHR (0.084)、LUSHR (0.183)、RLSHR (0.397)、LLSHR (0.242)、GM (0.252)、RIHR (0.207)、LIHR (0.378) と、全筋群において相関係数が非常に低い値を示した。これは、自然な嚥下がエネルギー効率を最適化した最小限の筋活動で行われるため、筋電図上での活動変動が微細となり、また嚥下音自体も非常に弱いため、背景ノイズや他の生体内要因の影響を強く受け、筋活動の情報が嚥下音に十分に反映されない結果と解釈できる。この現象は、通常嚥下における「自動制御型」動作の特性を反映していると考えられる。

表 1. 嚥下音の持続時間と sEMG 信号の持続時間との相関係数

	タスクA	タスクB	タスクC	タスクD	タスクE
RUSHR	0.084	0.816	0.152	-0.253	0.372
LUSHR	0.183	0.711	0.530	-0.339	0.489
RLSHR	0.397	0.844	0.720	0.224	0.217
LLSHR	0.242	0.833	0.611	0.049	0.688
GM	0.252	0.686	0.556	-0.302	0.324
RIHR	0.207	0.842	0.699	-0.011	0.655
LIHR	0.378	0.721	0.791	0.022	0.613

一方、強く嚥下（タスク B）においては、RUSHR (0.816)、LUSHR (0.711)、RLSHR (0.844)、LLSHR (0.833)、GM (0.686)、RIHR (0.842)、LIHR (0.721) と、全筋群で一貫して高い正の相関が示された。強い嚥下動作は、喉頭および舌骨の動きが増大し、筋活動の持続時間が明確に延長されるため、嚥下音の持続時間との連動性が高まることが反映されている[5]。

息を堪えて嚥下（タスク C）では、RLSHR (0.720)、LLSHR (0.611)、RIHR (0.699)、LIHR (0.791) は強い相関を示す一方、LUSHR (0.530) および GM (0.556) は中程度、RUSHR (0.152) は弱い相関であった。この結

果は、息を堪えるという操作が筋群ごとに異なる影響を及ぼし、呼吸の影響や意識的な筋制御が部分的に嚥下音に反映される一方で、特定の筋群（例：RUSHR）ではその影響が限定的であることを示している。

喉頭挙上を保持し嚥下（タスク D）においては、RUSHR（-0.253）、LUSHR（-0.339）、GM（-0.302）で負の相関が観察され、他の筋群（RLSHR：0.224、LLSHR：0.049、RIHR：-0.011、LIHR：0.022）は非常に弱い正またはほぼ無相関となった。意図的な喉頭挙上は、自然な嚥下パターンを乱し、一部の筋群では逆の動作パターンを誘発する可能性があり、これが嚥下音と筋活動の連動性に逆相関をもたらす要因と考えられる。

さらに、オトガイ舌骨筋緊張嚥下（タスク E）では、LLSHR（0.688）、RIHR（0.655）、LIHR（0.613）は強い正の相関を示す一方、RUSHR（0.372）、RLSHR（0.217）、GM（0.324）は弱い相関、LUSHR（0.489）は中程度の相関に留まった。オトガイ舌骨筋の緊張操作は、嚥下動作時の筋活動に対して領域ごとに異なる影響を及ぼすため、嚥下音に反映される筋活動情報の度合いも筋群間でばらつきを呈する結果となった。

総合すると、通常嚥下においては、嚥下音に筋活動の情報がほとんど反映されず、むしろ背景ノイズ等の複合的要因が影響していることが明らかとなった。一方、意図的な操作条件（強く嚥下、息を堪える、喉頭挙上を保持、オトガイ舌骨筋緊張）では、特に強く嚥下した場合に、嚥下音と各筋群の活動との連動性が顕著に表れた。これらの知見から、意識的な嚥下操作（例えば、強く嚥下や息を堪える動作）の場合、嚥下音の音響解析が筋活動の変動を十分に反映し、実用的な評価指標として機能し得ることが示された。一方、自然な通常嚥下は無意識下で行われ、筋活動が必要最小限に留まるため、嚥下音が極めて微弱となり、背景雑音との区別が困難となる。その結果、通常嚥下においては筋活動情報の正確な抽出が困難であることが示唆される。本研究の成果は、予備的な結果であるが、低コストかつモバイルな嚥下バイオフィードバックシステムの基盤技術としての可能性を示すとともに、今後の臨床応用に向けたさらなる検証の必要性を明確にするものである。

謝辞

この報告書の作成にあたり、徳島大学理工学部理工学科(電気電子システムコース)の長田健太郎氏より、データ解析結果ならびに原稿ドラフトをご提供いただきました。また、徳島大学大学院創成科学研究科の橋本峻亮氏より、実験プロトコルの作成やデータ解析に関するご協力いただきました。ここに感謝申し上げます。

(完)

引用文献

- 1) Nordio, S., Arcara, G., Berta, G., Dellai, A., Brisotto, C., Koch, I., ... & Battel, I. (2022). Biofeedback as an adjunctive treatment for post-stroke dysphagia: a pilot-randomized controlled trial. *Dysphagia*, 1-10.
- 2) Stepp, C. E. (2012). Surface electromyography for speech and swallowing systems: measurement, analysis, and interpretation. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 55(4)1232-46
- 3) Hedström, J., Tuomi, L., Finizia, C., & Olsson, C. (2018). Correlations between patient-reported dysphagia screening and penetration-aspiration scores in head and neck cancer patients post-oncological treatment. *Dysphagia*, 33, 206-215.
- 4) Albinsson, S., Tuomi, L., Wennerås, C., & Larsson, H. (2022). Patient-reported dysphagia in adults with eosinophilic esophagitis: translation and validation of the Swedish eosinophilic esophagitis activity index. *Dysphagia*, 1-11.
- 5) Jang, H. J., Leigh, J. H., Seo, H. G., Han, T. R., & Oh, B. M. (2015). Effortful swallow enhances vertical hyolaryngeal movement and prolongs duration after maximal excursion. *Journal of Oral Rehabilitation*, 42(10), 765-773.