

被験者の頭部運動を考慮した頸部シルエットからの嚥下時刻推定 Estimation of swallowing time by using the neck silhouette with cancelling subject head motion

浦西雄大*
Yudai Uranishi

酒井道*
Osamu Sakai

宮城茂幸*
Shigeyuki Miyagi

1. はじめに

近年、日本人の肺炎による死亡率が増加傾向にあり、現在では脳卒中に代わって日本における死因第 3 位となっている [1]. 肺炎の原因の 1 つは高齢者の嚥下機能低下による誤嚥であり、肺炎の約 70% は誤嚥性肺炎であると言われている [2][3]. したがって嚥下機能を定量的に評価し、自身の嚥下状態を把握することが求められている。

病院で用いられている検査手法として、嚥下内視鏡検査 (VE: Videoendoscopic examination of swallowing) や嚥下造影検査 (VF: Videofluoroscopic examination of swallowing) がある。これらの手法は高価な医療機器を必要とし、検査を行える場所が限られている。また VF は X 線照射による被曝を伴うため侵襲性がある。

非侵襲な検査手法としては、嚥下時の喉頭挙上運動を触診により判定する方法や、頸部聴診法を用いた嚥下音による評価手法が使われている。しかし、これらの手法は評価が定性的であり、評価者の熟練度によって結果が左右される。嚥下音の解析による評価手法の研究 [4][5] も行われているが、嚥下音の発生メカニズムや、嚥下障害診断との対象関係など不明な点もある。

非侵襲、非接触かつ手軽に行える手法として、ビデオカメラで嚥下時の様子を外部から撮影し、嚥下に伴う喉頭運動を検出し、その挙上量と挙上時間によって嚥下評価を行った研究 [6][7][8] がある。しかし、この手法では喉頭隆起の不明瞭な被験者では喉頭運動が検出できず、嚥下検出および嚥下評価が行えない場合がある。

そこで本研究では、定量的な嚥下評価機構の構築に必要な嚥下時刻を、喉頭隆起の明瞭さによらず、嚥下時の動画像から推定する手法を提案する。深度カメラによって健常被験者の嚥下時の様子を外部から撮影し、嚥下に伴う頸部運動を検出することで嚥下時刻の推定を行った [9]. また時刻推定を行う際に頭部運動を補正する処理を取り入れ、その効果を検証した。

2. 嚥下時刻推定のアルゴリズム

ここでは、撮影した動画像から嚥下に伴う頸部運動を検出し、嚥下時刻を推定する手順について述べる。

図 1 に、アルゴリズムの概要を示す。今回は嚥下に伴う頸部運動を検出する方法として、フレーム間差分画像による動体検出手法を用いた。被験者が安静であるフレームを基準フレームとして、他のフレームの頭部位置が基準フレームと同位置となるように補正を行うことで、頭部運動の補正を行った。その後、基準フレームとその他のフレーム間で差分画像を取得し、嚥

下時の頸部運動による差分領域の増減変化を観測した。最後に、この差分領域の面積の時系列的变化から嚥下時刻を推定した。

なお輪郭検出が容易であることや特別な撮影環境が不要である点などから、今回は RGB カメラではなく深度カメラで撮影を行っている。

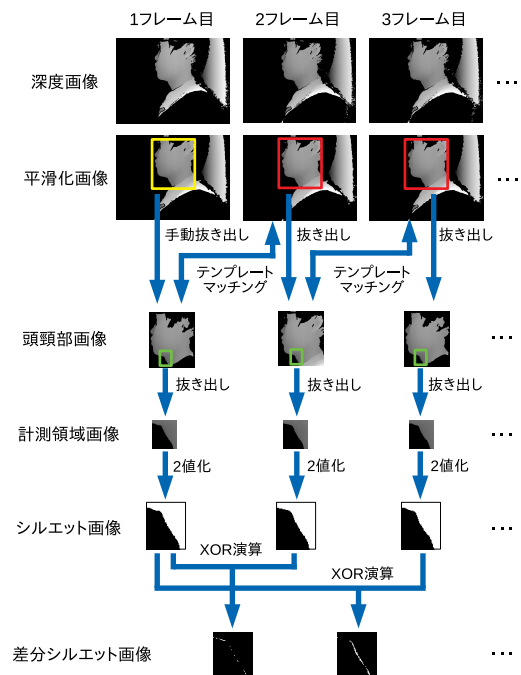


図 1: 嚥下時刻推定アルゴリズムの概要図

2.1. 頭部運動の補正処理

高齢者の場合、嚥下が楽に行えるよう頭部を動かしながら嚥下を行う方が見られる。今回用いた差分画像による動体検出手法では画像中の動体全てが検出されるため、頸部運動のみを検出する場合はその他の運動を補正し打ち消す必要がある。そこで嚥下時刻推定を行う前処理として、この頭部運動の補正を行う。1 フレーム目を基準として 2 フレーム目以降の頭部位置を移動させ、1 フレーム目と同位置とすれば頭部運動の補正が可能である。

1 フレーム目に対する頭部の回転角および並進移動量の推定には、位相限定相関法 [10] を用いた。これは 2 画像間の並進移動量を求めるための手法であり、応用することで回転角の推定も可能である。並進移動量を求めるための手法としてはテンプレートマッチングが一般的であるが、推定精度の高さや推定に必要な処理回数などの点から位相限定相関法を使用している。また今回の撮影では被験者が激しく動いていないため、隣接フレーム間での並進移動量が小さい。そこ

*滋賀県立大学, The University of Shiga Prefecture

で初めに画像の回転角推定を行い、推定した回転角だけ補正した画像を用意し、その後並進移動量の推定と補正を行った。

位相限定相関法の処理手順を次に示す。初めにサイズ $X \times Y$ の入力2画像 $f_1(x, y), f_2(x, y)$ の離散フーリエ変換 $F_1(u, v), F_2(u, v)$ を次式で定義する。

$$F_1(u, v) = \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} f_1(x, y) e^{-j2\pi(\frac{xu}{X} + \frac{yv}{Y})} \quad (1)$$

$$F_2(u, v) = \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} f_2(x, y) e^{-j2\pi(\frac{xu}{X} + \frac{yv}{Y})} \quad (2)$$

$F_1(u, v), F_2(u, v)$ は振幅成分 $A(u, v), B(u, v)$ と位相成分 $F_1'(u, v), F_2'(u, v)$ を用いて次のように表せる。

$$F_1(u, v) = A(u, v) F_1'(u, v) = A(u, v) e^{j\theta(u, v)} \quad (3)$$

$$F_2(u, v) = B(u, v) F_2'(u, v) = B(u, v) e^{j\phi(u, v)} \quad (4)$$

ここで位相成分の合成画像 $H_{12}(u, v)$ を次式で定義する。

$$H_{12}(u, v) = F_1'(u, v) (F_2'(u, v))^* = e^{j(\theta - \phi)} \quad (5)$$

この合成画像を逆フーリエ変換すると、相関強度画像 $G_{12}(x, y)$ が得られる。この画像の輝度値が最大となる座標が2画像間の並進移動量を表している。

$$G_{12}(x, y) = \sum_{u=0}^{X-1} \sum_{v=0}^{Y-1} H_{12}(u, v) e^{j2\pi(\frac{xu}{X} + \frac{yv}{Y})} \quad (6)$$

位相限定相関法の応用として、図2のように極座標形式に変換した画像 $z(\rho, \theta)$ を入力することで回転角を推定する方法がある [11]。中心座標 (x_0, y_0) に対してある座標 $(x_0 + x, y_0 + y)$ の極座標変換は次式のように行った。スケール係数 M は、変換の前後で画像サイズを変化させないために用いている。今回は頭頸部画像の右下を中心座標として変換を行っている。

$$\begin{cases} \rho = M \cdot \log \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \\ \theta = \arctan\left(\frac{y - y_0}{x - x_0}\right) \end{cases}$$

また頭部の回転角および並進移動量を推定する上で、不要な背景等が写っていると正しい推定結果が得られない。そこで被験者頭部を含む範囲の深度値を抽出し、入力画像中の不要背景を除去している。

以上の操作により、頭部運動を補正した。

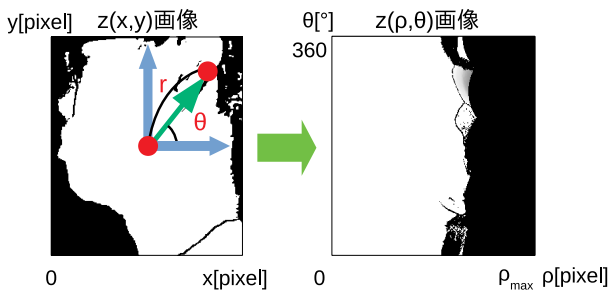


図2: 画像の極座標変換

2.2. フレーム間差分画像による嚥下時刻推定

次に頭部運動補正後の動画から、フレーム間差分画像による動体検出手法を利用して嚥下時刻を推定する。

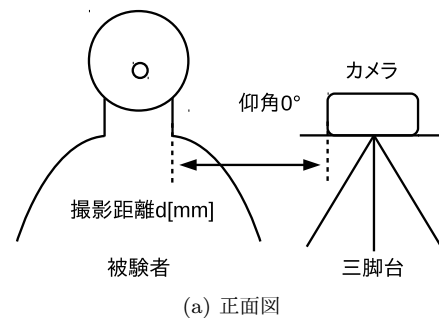
1フレーム目の画像において嚥下による頸部運動が見られる領域を目視で確認し、その領域を短形で指定して切り出した。2フレーム目以降については1フレーム目と同位置かつ同じ大きさの短形画像を取得した。取得した計測領域画像を2値化し、基準フレームとその他のフレーム間で差分画像を取得した。嚥下によって頸部運動が発生した場合、差分領域が増加する変化が見られるはずである。そこで差分領域の画素数を計測し、その時系列的変化を観測することで嚥下時刻を推定した。計測した画素数の最大値に対して90%をしきい値とし、これを越えた区間を推定嚥下区間とした。

3. 実験方法

今回撮影に使用したカメラは Intel 社の Intel RealSense F200 である。認識距離は 200mm-1200mm で、解像度を 640×480 、フレームレートを 30fps と設定した。

図3に撮影環境を示す。今回は嚥下時の頸部運動が認識しやすいよう、撮影は被験者側方から行っている。また被験者は20代の男性健常者5名であり、嚥下食にはスプーン1杯分の水を用意した。

被験者には椅子に座ってもらい、三脚台に取り付けた RealSense を被験者側方から距離 d の位置に配置した。RealSense の仰角は 0° とし、頸部表面の映り方の違いによる結果を比較するために撮影距離 $d=200\text{mm}, 300\text{mm}$ の2通りに設定した。撮影開始前、被験者には水を口に含んだ状態で安静にしてもらうよう指示した。また撮影距離が目的の距離となるように RealSense の位置調整を行った。そして撮影開始後、撮影者の合図によって嚥下を行ってもらい、撮影を終了した。1回の撮影につき嚥下は1回のみとし、前後の嚥下に影響が無いよう適度な時間を空けてから撮影を行った。また被験者が自然な嚥下を行う妨げとならないよう、器具などを使用しての頭部の固定は避けている。得られた深度画像に対して第2章で述べたアルゴリズムを適用し、嚥下時刻を推定した。また推定した時刻と実際の時刻を比較し、その精度を確かめた。



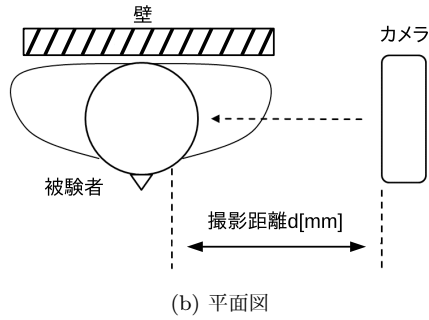


図 3: 撮影環境

4. 嚙下時刻の推定結果

図 4 から図 6 は 5 名の被験者で撮影した深度画像に本手法を適用し、嚙下時刻を推定した結果の一例である。ただしグラフ中の青で示す区間は RealSense で同時に取得された RGB 画像から目視で確認した実際の嚙下区間を表し、その区間数を P とおく。赤で示す区間は推定嚙下区間を表し、その区間数を $(TP+FP)$ とおく。赤の区間が青の区間に含まれているとき正解区間とし、その正解数 TP を求めた。推定した嚙下時刻のデータから再現率、適合率を算出した結果は表 1 と表 2 のようになった。ただし動画像中に空嚙下が含まれていた場合は、これも含めて計算している。

補正前に推定が行えていた被験者については、補正後も同様に推定に成功した。補正前に推定に失敗していた被験者については、補正によって推定に成功した被験者が見られた。以上から頭部運動補正を取り入れたことにより、嚙下時刻の推定精度の向上が見られた。また図 6 の被験者については補正後も正しい推定結果は得られなかった。

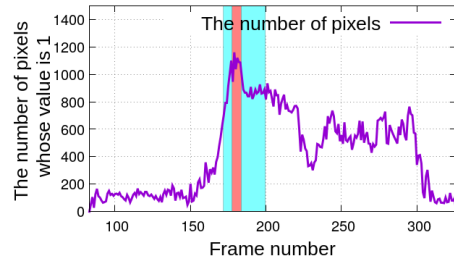
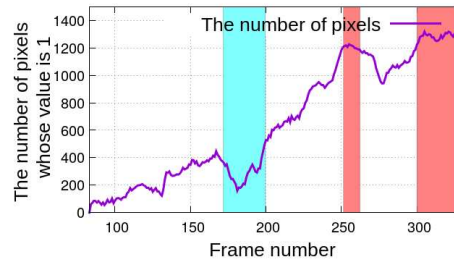


図 5: 被験者 B の推定結果 (撮影距離 300mm)

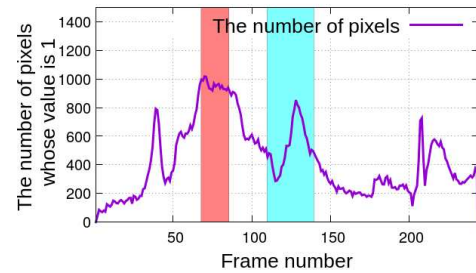


図 6: 被験者 C の推定結果 (撮影距離 200mm)

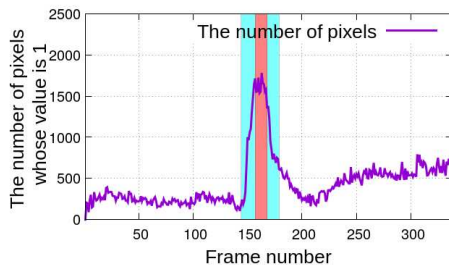
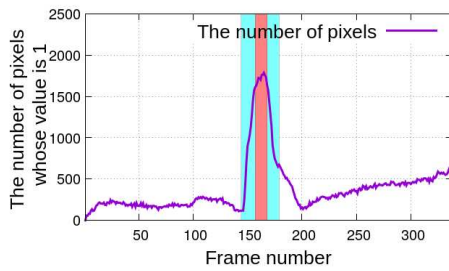


図 4: 被験者 A の推定結果 (撮影距離 300mm)

表 1: 補正適用前の推定結果

撮影距離	再現率 (TP/P)	適合率 (TP/TP+FP)
200mm	0.600(9/15)	0.529(9/17)
300mm	0.818(9/11)	0.500(9/18)

表 2: 補正適用後の推定結果

撮影距離	再現率 (TP/P)	適合率 (TP/TP+FP)
200mm	0.733(11/15)	0.688(11/16)
300mm	0.909(10/11)	0.714(10/14)

5. 考察

5.1. 頭部運動補正による効果について

今回は被験者の頭部運動を補正することにより、嚙下時刻推定への効果を検証した。補正を行う前に推定が行えていた被験者は、補正後も正しく推定が行なえた。また補正前に推定に失敗していた被験者は、補正を取り入れる事で推定に成功した。したがって頭部運動補正処理の有意性が示された。

なお、今回は頭部運動の中でも首や頭を前後に動かす動作を補正対象としている。首を傾げる、または首を横に振るといった左右の動作は補正の対象外となっ

ているため、今後は左右の頭部運動にも対応した補正方法を検討していく必要がある。

5.2. 頭部運動補正における回転角推定について

今回は頭部と頸部は連動して動いているという仮定のもとで頭部運動補正を行っている。そのため頭部運動の補正処理においては、頭部と頸部の回転角は等しいものとして扱っている。しかし実際にはこれらは常に等しいわけではなく、頭部の動かし方次第では頭部と頸部の回転角が一致しないケースが発生すると考えられる。また回転中心をどの位置に設定するかによって回転角の推定結果も変化するため、注意する必要がある。今回は頭部の中心と首の付け根の2通りで回転中心を設定し結果を比較したが、首の付け根を回転中心としたほうが推定精度が高くなったため、この位置を回転中心とした。回転角推定を行う上では、以上の2点を考慮する必要があると考えられる。

5.3. 撮影距離について

撮影の際は、撮影距離の違いによる推定結果の比較のために2通りの撮影距離を設定した。その結果、撮影距離 $d=300\text{mm}$ の方が推定精度が高い結果となった。このようになった理由として、カメラの認識距離が関係していると考えられる。今回使用した深度カメラの認識距離は $200\text{mm}-1200\text{mm}$ であり、撮影距離 $d=200\text{mm}$ とした場合は認識範囲の寸前となる。そのため、被験者が動くことで認識範囲からはみ出ると画像欠損が生じる事がある。今回使用したアルゴリズムでは頭部の位置を基準フレームと同位置とすることで補正を行っているため、頭部の画像欠損が生じると正しく補正が行えなくなり、嚥下時刻推定の失敗に繋がる。このことから、設定する撮影距離は認識範囲に収まるよう余裕を持たせる必要があるといえる。

5.4. 基準フレームの設定について

今回は被験者が椅子に座り安静となった状態から撮影を開始しているため、撮影データの1フレーム目を基準フレームとしている。しかし撮影開始時点で被験者が安静でなかった場合、安静となったフレームを基準フレームに設定する必要がある。今後は被験者の安静/非安静を定義し、安静となったフレームを自動で基準フレームに設定する処理を取り入れる必要がある。

6. 結論

本研究では、深度カメラで撮影した動画像から嚥下による頸部運動を検出することにより、若年被験者での嚥下動作時刻の推定が可能であることが確認できた。今回推定した嚥下時刻を基に、今後は嚥下音解析による嚥下評価へと繋げていく。また高齢被験者での嚥下時刻推定および評価が可能であるか検証していく。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP18K45678 の助成を受け行われた。また、滋賀県立大学工学部の地域ひと・モノ・未来情報研究センターの研究活動として行われ、内閣府の地方創生推進交付金による支援を受けた。

参考文献

- [1] 厚生労働省, "我が国の人口動態統計年報," pp.17-18, ISSN 1345-5222, 2018.
- [2] Teramoto S, Fukuchi Y, Sasaki H, Sato K, Sekizawa K, Matsuse T, "High incidence of aspiration pneumonia in community- and hospital-acquired pneumonia in hospitalized patients: a multicenter, prospective study in Japan," *Journal of the American Geriatrics Society* 56(3), pp.577-579, 2008.
- [3] 大類孝, "超高齢社会における誤嚥性肺炎の現状", *日本老年医学会雑誌* 56(4), pp.458-460, 2013
- [4] 中山裕司, 高橋浩二, 宇山理沙, 平野薫, 深澤美樹, 南雲正男, "嚥下音の産生部位と音響特性の検討 -健康成人を対象として-, " *昭和歯学会雑誌* 26(2), pp.163-174, 2006.
- [5] Miyagi S, Sugiyama S, Kozawa K, Moritani S, Sakamoto S, Sakai O, "Classifying dysphagic swallowing sounds with support vector machines," *Healthcare*, 8(2), 103, 2020.
- [6] 高橋明子, 清水良昭, 北邦宏, 仲筋宣子, 小野大地, 滝田裕美, 安井利一, "頸部輪郭抽出法による喉頭運動の検出," *明海歯科医学会*, 43(1), pp.34-43, 2014.
- [7] 高橋明子, 清水良昭, 西條光雅, 高野梨沙, 小野大地, 滝田裕美, 安井利一, "頸部輪郭抽出法による喉頭運動の検出 -食物物性の違いによる差の検出-, " *明海歯科医学会*, 43(1), pp.92-97, 2015.
- [8] Yoshida J, Kozawa K, Moritani S, Sakamoto S, Sakai O, Miyagi S, "Detection of swallowing times using a commercial RGB-D camera," *Proceedings of 2019 IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics(GCCE)*, pp.1178-1179, 2019.
- [9] 浦西雄大, 小澤恵子, 酒井道, 宮城茂幸, "深度画像から生成された頸部シルエットの画素数計測を用いた嚥下時刻推定," 第18回情報科学技術フォーラム予稿集, 2, pp.365-368, 2019.
- [10] 小林孝次, 中島寛, 青木孝文, 川又政征, 樋口龍雄, "位相限定相関法の原理とその応用," *ITE Technical Report*, 20(41), pp.1-6, 1996.
- [11] 佐々木宏, 小林孝次, 青木孝文, 川又政征, 樋口龍雄, "回転不変位相限定相関による画像の回転角度計測について," *ITE Technical Report*, 22(45), pp.55-60, 1998.