

一般口演 | 画像情報・生体信号処理

一般口演11

画像情報・生体信号処理

2019年11月23日(土) 09:00 ~ 11:00 E会場 (国際会議場 3階中会議室301)

[3-E-1-02] 下顎運動測定のための顔抽出アプリケーションの拡張

○木戸 善之^{1,2}、姫野 佑哉²、野崎 一徳³、十河 基文⁴、西願 雅也⁵、下條 真司^{1,2}、池邊 一典⁴（1. 大阪大学サイバーメディアセンター, 2. 大阪大学工学部電子情報工学科, 3. 大阪大学歯学部附属病院, 4. 大阪大学大学院歯学研究科, 5. (株) アイキャット）

キーワード：Mandibular Movement, Marker Tracking, Face Detection

歯科における口腔機能検査の1つとして、咀嚼運動を見るための「顎運動装置」がある。技術進歩に伴い大型装置が改良され、頭から伸びた小型で軽いセンサーが下あごに付いたマーカをトラッキングするシステムが最新の装置である。しかし顎運動装置は専用装置のために、在宅高齢者の咀嚼検査の場合、患者は歯科医院に出向くか、また小型になったといえども歯科医師が装置を持参する必要がある。さらに検査を開始するまでは煩雑なセッティングを要するため、なかなか普及していない。そこで著者らは、歯科医師はもちろん介護支援者でも簡易的に使え、さらに専門医による遠隔診断もできるようにスマートフォンを活用した顎運動測定アプリケーションを開発した。具体的には、下顎にシールをつけ動画を撮影し、動画からシールを検出することで下顎運動測定を実現する。

実装には顔認識アプリケーション OpenFaceを用いた。OpenFaceは、単眼レンズカメラで撮影された動画から顔の立体的な情報を推定し、顔輪郭を抽出することができる。しかし OpenFaceは、顔輪郭の抽出をしているため、顎運動装置と同等の測定、つまりシールの検出など特定位置の抽出できない。そこで OpenFaceにシール検出機能と座標変換機能を拡張実装した。シール検出機能では、シールと肌の境界線をフレームごとに抽出する機能を実装し、シールの2次元座標を割り出した。また OpenFaceによる顔輪郭抽出点の深度情報からシールの深度を推定し、トラッキングする3次元座標とした。それらの機能にてシールのトラッキング座標をプロットすることで下顎運動測定図を作成した。

評価では、顎運動装置と提案手法の出力を比較した。具体的には、プロットした計測したマーカの座標群の等分散性の検定を行った。この結果、2つの座標分散に有意差がないことから、提案手法と顎運動装置の出力の類似性を示すことができた。

下顎運動測定のための顔抽出アプリケーションの拡張

木戸善之^{*1,*2}、姫野佑哉^{*2}、野崎一徳^{*3}、十河基文^{*4}、西願雅也^{*4,*5}、下條真司^{*1,*2}、池邊一典^{*4}

*1 大阪大学サイバーメディアセンター、*2 大阪大学工学部電子情報工学科、

*3 大阪大学歯学部付属病院、*4 大阪大学大学院歯学研究科、*5 株式会社アイキャット

Development and Modification of Face Detection Application for Mandibular Movement Measurement

Yoshiyuki Kido^{*1,*2}, Yuya Himeno^{*2}, Kazunori Nozaki^{*3}, Motofumi Sogo^{*4},

Masaya Saigan^{*4,*5}, Shimojo Shinji^{*1,*2}, Kazunori Ikebe^{*4}

*1 Cybermedia Center, Osaka University, *2 School of Engineering, Osaka University,

*3 Osaka University Dental Hospital, *4 Graduate School of Dentistry, Osaka University, *5 iLAND solutions Co. Ltd.

By using the application OpenFace, it is possible to detect 3D facial data and feature values from images and videos taken with a monocular camera built into a smartphone. However, since OpenFace only supports facial contour extraction, it cannot perform the same measurement as a mandibular movement measuring instrument with a tracking marker. In this research, in order to examine the feasibility of a system that can measure a remote mandibular movement without a special medical equipment, we have been developed a prototype of measuring application a mandibular movement during mastication using OpenFace. In the evaluation of this research, we compared the mandibular movement measurement diagrams created by the proposed method and the mandibular movement measuring instrument. Specifically, the accuracy was evaluated by performing homogeneity of variance tests from the coordinates of the mandibular measurement points composing the measurement diagram. As a result of the comparison, it was confirmed that the proposed method outputs a measurement figure similar to the measurement result of the mandibular movement measuring instrument. For the equal variance test, Bartlett's test and Levene's test were used. As a result of both tests, the Bartlett's test was $p=0.092$, and the Levene's test was $p=0.45$. These results show that there are no significant differences between the proposed method and the mandibular movement measuring instrument.

Keywords: Mandibular Movement Measurement, OpenFace

1. はじめに

口腔機能における咀嚼は、摂食の際、食べ物を噛み砕く行為を指し、嚥下は、咀嚼により細かく砕いた食べ物を飲み込む行為を指す。咀嚼機能が低下すると、嚥下機能も同時に低下する傾向が見られ、いわゆる摂食障害の一因となり、特に高齢者の低栄養状態を引き起こす^{1),2)}。そのため、高齢者においては、定期的な口腔機能の検査を行い、歯科治療、口腔機能訓および健康指導が必要となる。口腔機能の検査は、まず咀嚼時における下顎運動を計測ことである。咀嚼運動の測定では、患者にガムやグミなどを一定時間噛むことで、下顎に取り付けたセンサーマーカー（以下、マーカー）をトラッキングして、マーカーの軌道を得る。咀嚼運動の測定によって、被験者の下顎運動、速度、咬合の安定性などから、口腔機能障害の初期症状を推測するための必要不可欠な測定である。現在、咀嚼時における下顎運動測定は、下顎運動測定器と言われる専用の医療器具を用いて行われる。下顎運動測定器の中でも最新の小型装置では、赤外線センサーの固定具を頭部に取り付け、顔前面に取り付けた赤外線センサーが、下顎のマーカーをセンシング、トラッキングすることで測定する^{3),4)}。下顎運動測定器は、下顎運動を測定するためのだけの専用器具であるが、医療器具でもあるため、歯科医師が装着、操作をする必要がある。つまり、口腔機能の検査には、歯科医院への通院が必要である。しかし高齢者、特に要介護高齢者は、通院が困難な場合が多い。また、歯科医院を受診する必要性の認識が低く、通院しない高齢者が少なくない。500人の高齢者に対して過去1年間の歯科受診状況を調査し、受診しなかった理由で「交通手段がない（12.4%）」、「身体調子が悪かった（12.1%）」、「歯科医院が嫌い（7.5%）」、「症状はあるがどうでもいい（5.8%）」という結果が報告されている⁵⁾。このような背景から、患者すなわち高齢者が歯科医院

を受診しなくても、遠隔で口腔機能を検査できるシステムが必要である。

一方、近年における情報処理技術の進歩により、顔認識、顔抽出アプリケーションが開発されている。OpenFace⁶⁾は、フリーソフトウェアの顔認識アプリケーションであり、単眼レンズカメラで撮影された画像や動画から、顔の立体的な情報を出力できる。通常、2次元への写像でしかない画像では、奥行き情報は欠落しているため、立体的な情報を得ることはできない。しかし、OpenFaceでは、予めRGB-Dカメラで撮影した顔から3次元顔形状データベースを作成して教師データとして使用し、カメラから被写体までの距離を推定することで、奥行き情報、立体的な顔の位置をトラッキングすることができる。著者らは、このOpenFaceの機能と、近年のスマートフォンの普及に着目し、スマートフォンにて下顎運動測定が可能ではないかという着想を得た。本研究では、高齢者や歯科医療の背景を踏まえ、遠隔で口腔機能を検査するシステムの実現可能性を検討するため、小型カメラとしてのスマートフォンにて撮影した動画から、咀嚼時における下顎運動測定アプリケーションの開発を行った。

本論文では、2章で、下顎運動測定器と顔抽出アプリケーションOpenFaceについて概要と問題点を述べる。3章では、下顎運動測定アプリケーションの実装について述べる。4章で、評価を、5章で、本論文の結論について述べる。

2. 技術的課題

OpenFaceでは、撮影した動画、静止画の顔を抽出し、顔の特徴点を検出する。OpenFaceの顔特徴点検出機能は、CLNF (Conditional Local Neural Fields)⁷⁾を用いる。CLNFでは、PDM (Point Distribution Model) と呼ばれる、頭部姿勢、頭部位置、スケール、表情による顔形状変化を一般化したモデルと、特徴点を検出するフィルタを用いる。CLNFでは、

PDM を生成するために RGB-D カメラで撮影した深度情報を持った顔形状の教師データを用いる。実際の特徴点検出には、画像の一部を切り出し、切り出した画像中のピクセル情報から特徴点の存在確率をヒートマップとして出力し、最尤度の高い箇所を特徴点とする。予め特徴点として検出する点群をフィルタに登録し、OpenFace では顔の眉、目、鼻、口、顔輪郭の 68 点を特徴点として検出する。

OpenFace の顔特徴点検出機能を利用すると、顎の輪郭形状を検出することができるが、下顎運動測定で重要となる顎周囲の任意の一点を追従することが難しい。それは CLNF の設計において、顎輪郭上の特徴点検出は他部位の特徴点検出と比べてある程度大きな誤差を伴うことが許容されていると言える。事実、予備実験において、OpenFace が出力する顎周囲の特徴点位置が、口の開閉のような他特徴点位置の変動に伴って顎輪郭をなぞるように変動することが確認されている。既存の下顎運動測定器を用いた場合、下顎にマーカー 1 点を取り付け、それをセンサーで読み取ることで、下顎の特定位置がトラッキングされる。下顎運動測定器と同等の測定をするためには、動画の各フレームに同一の下顎の 1 点を抽出することで、下顎の特定位置をトラッキングすることが求められる。OpenFace は、顔抽出点 68 点の中で、顔輪郭上に下顎を抽出する点を持つ。しかし、上述したように OpenFace は、あくまでも顔輪郭上をトラッキングするものであり、同一点を抽出する機能を持っていない。具体的には、顔とカメラの中心軸との角度がずれた場合、OpenFace での顔輪郭抽出点は、ずれた角度の分だけ抽出点がずれる事となる。図 1 は、顔の向きを左右方向に動かした場合の動画での 2 フレームを比較したものである。図中の左右のフレームにて、下顎の点と鼻筋の延長線になるように引いた補助線との距離が異なることから、下顎の特定位置をトラッキングできていないことが確認できる。

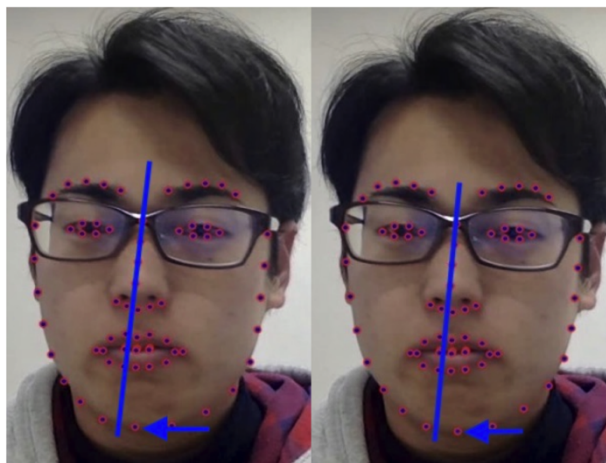


図 1 OpenFace での顔輪郭特徴点のずれ

3. 提案手法

OpenFace は顔輪郭抽出が可能なアプリケーションであり、本研究で利用できる機能が多いことから OpenFace を利用する。その上で、2 章で述べた技術的課題を解決する機能を実装することで、本研究の目的である下顎運動測定の実現を目指した。図 2 に本研究の概要を示す。また本来の OpenFace の上へ新たに実装した 3 機能について以下に示す。

1) 下顎につけたシールの検出と二次元座標の算出

OpenFace の顔特徴点トラッキング手法では、下顎の特定位置を検出できない。そこで下顎運動測定器が下顎

に取り付けたマーカーの経路をトラッキングしていたように、下顎にシールを貼り付け、そのシールをフレームごとに検出する拡張を行う。シールの検出はエッジ検出で行う。具体的には、画像を平滑化することによりノイズを削減したのち、エッジ検出にてシールの輪郭を認識し、画像内でシール中心部 1 点の二次元座標を得る。

2) シールの深度推定

目や顔輪郭など特徴点 68 点の深度は、OpenFace が持つ顔抽出機能によって得られる。後述する座標修正機能によって下顎運動の測定精度を向上させるためには、この 68 点とは別に新たに下顎に貼り付けたシールの深度を得る必要がある。そのため、シールの深度を OpenFace によって得られるシール周辺の顔特徴点の深度より推定する。

3) カメラ座標系の変換と角度による座標修正

カメラと被測定者の顔の相対的な位置関係は、カメラを持つ手のブレや、顔の動きなどにより容易に変化し、下顎運動測定に誤差が生じる原因となりうる。そこで本研究では、画像内での座標系、いわゆるカメラ座標系を被測定者の顔を基準とした座標系（以下、顔中心座標系と呼ぶ）に変換することで、カメラと顔の相対的な位置関係の変動によって生じる測定値の誤差を除去する。具体的には、目の位置を基準とし、両目の中心点（瞳孔）を結ぶ線の中点を顔中心座標系の原点とし、顔中心座標系におけるシール中心の座標を割り出す。またカメラレンズの法線ベクトルと顔向きのベクトルが常に平行であるとはかぎらないため、カメラレンズ、カメラ画素センサーの法線ベクトルと、顔向きのベクトルが平行になるよう、画像の平面角度を求め、アフィン変換によりシール中心点の相対座標の回転を行う。

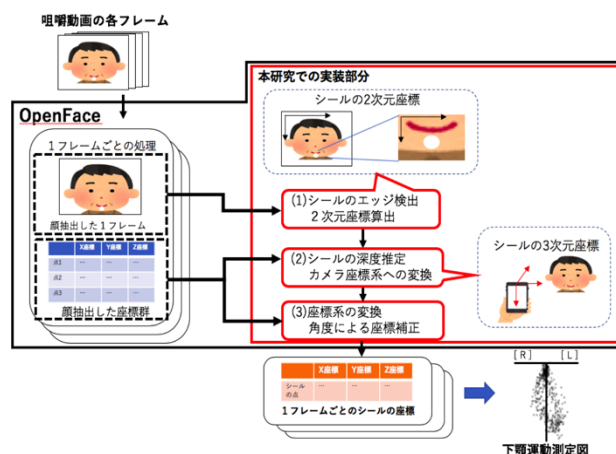


図 2 OpenFace と提案手法の概要

4. 評価

本研究で開発した下顎運動測定アプリケーションは、将来的には医療機器として検出精度ならびに寸法精度を求める。そのため、比較対象としては現在、市販されている下顎運動測定器「モーションビジュレーナー (GC 社製、東京)」⁸⁾による出力との比較を行った (表 1)。しかし現在の段階で、本研究は実現可能性を探る検証の段階であるため厳密な軌道形状の類似性ではなく、出力した軌道のプロットに対し、x 軸と y 軸における最大値、最小値の限定的な比較、および計測座標群の等分散性の検定を行い、同程度の分散性を検証した。

評価に用いる動画は、表1上段に示したスマートフォンにて撮影した。下顎運動測定アプリケーションは、OpenFace をベースに開発しているため、用いる計算機(パソコン)の条件として OpenFace が動作する環境が必要となる(表2)。また OpenFace については、バージョン 2.0.5 を用いた。

表 1 実験に用いたハードウェア環境

対象	ハードウェア	名称	会社
開発対象	スマートフォン	iPhone6	Apple 社
比較対象	下顎運動測定器	モーションビ ジトレナー	GC 社

表 2 動画を取り込む計算機(パソコン)の環境

構成	仕様
OS	macOS High Sierra
CPU	Intel Core i5 (1.8 GHz)
Memory	8GB

4. 1 評価方法

口腔機能検査ではグミもしくはガムを咀嚼し、その時の下顎運動を計測する。グミやガムは比肩食品として咀嚼による物性変化が少なく、実際の臨床現場でも使用されている。そこで本研究での評価もタブレットガム(キシリトールガム、ロッテ社)3 粒で測定を行った。一定の粘度を示すまで約 3 分間ガムを噛んだ後被験者の噛み癖の例(習慣的咀嚼側)で咀嚼運動をスマートフォンならびに既存顎運動測定装置で計測した。次に、下顎運動測定アプリケーションの深度推定の誤差を検証するため、スマートフォンと被験者の距離を 1m, 1.5m, 2m と変更して測定を行った。これによりアプリケーション内での深度推定の値、つまりz 軸の値の検証を行うことができる。それぞれの距離での計測した座標および下顎運動測

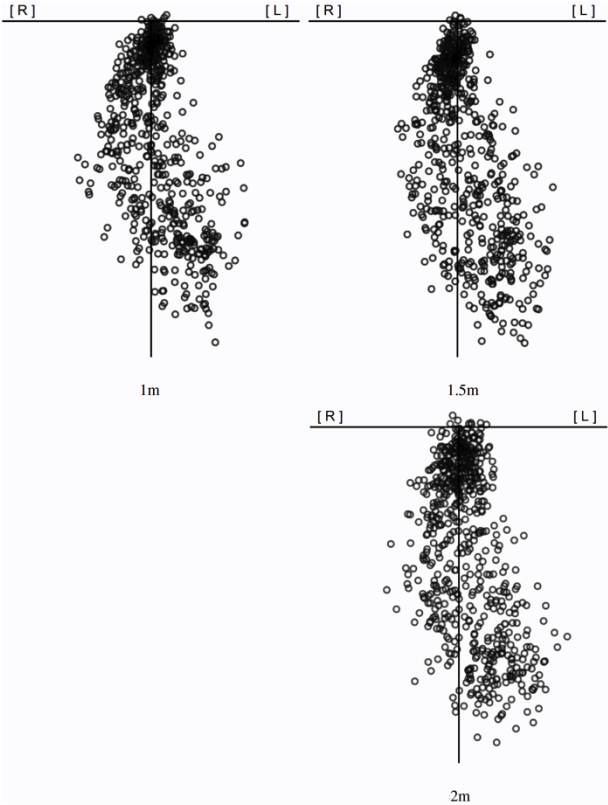


図 3 スマートフォン-被験者間距離変化

定器での座標の比較を行った。

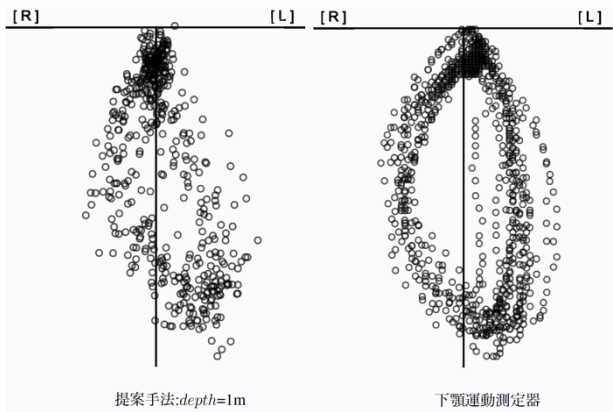


図 4 提案手法の下顎運動測定器の比較

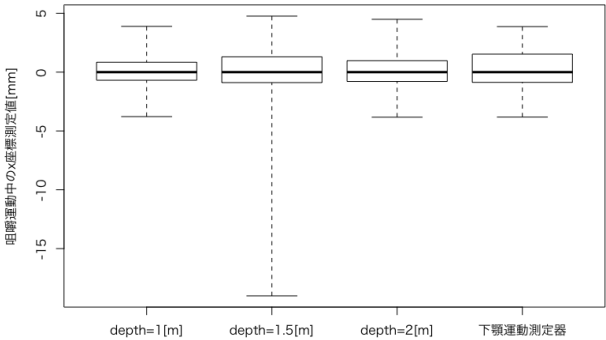


図 5 x 座標分布の比較

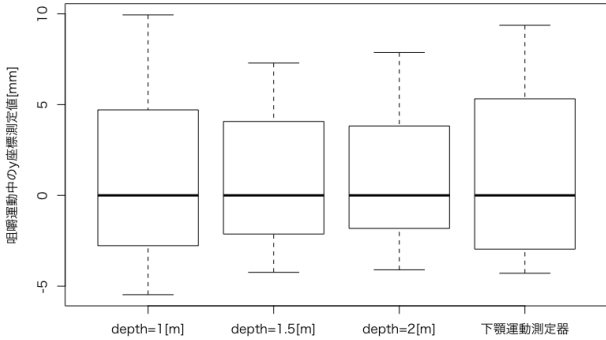


図 6 y 座標分布の比較

4. 2 評価結果

4. 2. 1 下顎運動測定図

まず下顎運動測定図を示す。図3は、スマートフォンと被験者の距離を変化させて計測したプロット図である。下顎運動時において噛み込んだタイミング(咀嚼終末位)すなわち図の上部では、下顎運動の速度が遅くなり、カメラの 1 フレームあたりに計測するプロットの点数が増加することを意味している。そして、スマートフォンと被験者の距離を変化させ、下顎運動の軌道パターンの明らかな相違は見られず、類似しており、また 1~2m の範囲でスマートフォンを離しても同じサイズで出力されることが確認できた。OpenFace では、カメラ座標系における x 軸、y 軸の計算に推定した深度を用いている。カメラからの距離にかかわらず顔を基準とした座標系において、同サイズの出力を行えていることから、シールの深度推定がある程度正しいと言える。

次に、下顎運動測定アプリケーションと既存の下顎運動測定器との比較を図 4 に示す。既存の下顎運動測定器の方が楕円を描き、一方で下顎運動測定アプリケーションはある程度の類似性は見られるものの、図中の中間部分において、ばらつきが多く見受けられる。この差は、プロット点数の違いも影響があると考えられる。どちらも 10 秒間咀嚼時における下顎運動を測定しているが、一定時間内での座標のプロット数が大きく異なる。スマートフォンによるプロット数は、617 点、一方既存の下顎運動測定器は 1161 点である。すなわち、顎運動の軌道パターンの上下に示す閉口時ならびに最大開口時の顎の移動速度は早く、プロットの点数は少なくなり、誤差も大きくなる。また、手ブレによる補正の精度も影響している。提案手法では、 z 軸の推定によってレンズ中心線と、両目の中心点を結んだ線が平行になるように角度を補正しているが、補正は z 軸の数値に依存しており、この精度によっては補正の誤差が大きくなる。

4.2.2 統計的解析と検定

下顎運動は周期運動であるため、中央値付近での計測座標が多くなる。つまりばらつきの指標としては、最大値、最小値の範囲、および中心点の相違の比較により、測定精度の議論は可能となると考えた。そこで統計解析ソフトウェア R⁹⁾を用い、箱ひげ図での比較および等分散性の検定を行い、類似性を検証した。

提案手法でのスマートフォンとの距離を 1m, 1.5m, 2m と変更させ x 軸, y 軸の値を測定し、下顎運動測定器と比較した箱ひげ図を、それぞれ図 5 および図 6 に示す。箱ひげ図は、最小値、第 1 四分位数、中央値、第 3 四分位数、最大値を用いて作図することから、視覚的な分散の検証が可能となる。箱ひげ図の形状から、 x 軸, y 軸方向それぞれについて、測定値の分散がおおむね類似していることを確認できた。図 5 中に示すように、被測定者までの距離が 1.5m の時の x 軸方向の測定結果のみ最小値が著しく低いが、これは偶発的な外れ値の影響によって生じたものであり、第 1 四分位数、中央値、第 3 四分位数、最大値などを見ると他の実験条件時と比較して分散が著しく異なっていないと言える。

次に、等分散性についてバートレット検定¹⁰⁾とルビーン検定¹¹⁾を用いて評価する。バートレット検定とルビーン検定は、どちらもサンプルサイズ、つまり下顎運動測定図のプロット数をあわせる必要がないことから検定に用いる。統計解析における検定は、帰無仮説を棄却するかを判定するものであり、有意水準(本研究では 0.05 と設定)を p 値が上回った場合、仮説を棄却できないという意味を持つ。等分散性の検定の場合、帰無仮説は「等分散である」となり、 p 値が有意水準を上回ったとしても「等分散である」を棄却できないという結果にすぎない。言い換えると、「等分散でないとは言えない」と言うことであり、等分散性を証明できるものではない。医療機器として審査を行う場合においても、厳密な同一性を求めるものではなく、統計的に有意な差がないことが求められるため、等分散性の有意差を判別するために、バートレット検定とルビーン検定の二種類の検定を行った。具体的には、 x 座標と y 座標について等分散性を評価した。これら座標の等分散性は、軌道の誤差を示す指標となる。またこれらの検定は、バートレット検定は比較的、正規分布に従う母分散であることが期待されている分散について敏感に判定することができ、ルビーン検定では、非正規分布の分散において高精度な判定を行うことができる。

まず、スマートフォンとの距離が 1m と 2m の x 座標, y 座標

について検定を行った結果、 x 座標のバートレット検定が $p=0.25$ 、ルビーン検定が $p=0.85$ 、 y 座標のバートレット検定が $p=0.58$ 、ルビーン検定が $p=0.72$ となった。次に、スマートフォンとの距離が 1m での提案手法と下顎運動測定器との等分散の比較は、 x 座標のみについて検定を行った。その結果、バートレット検定が $p=0.092$ 、ルビーン検定が $p=0.45$ であり、いずれの結果も有意水準である 0.05 を上回る結果となり、有意差がないことを示せた。

5. まとめ

被写体の顔抽出ができるアプリケーション OpenFace を用いることで、スマートフォンに内蔵されている単眼レンズカメラで撮影した画像、動画から 3次元で顔抽出をすることが可能となっている。しかし、OpenFace は、顔輪郭の抽出およびトラッキングのみに対応しているため、下顎運動測定器と同等の測定、マーカーなど特定位置のトラッキングはできない。本研究では、遠隔で口腔機能を検査できるシステムの実現可能性を検討する上で、動画から OpenFace を用いて咀嚼時における下顎運動測定をすることを目指し、OpenFace を拡張して下顎運動測定器と同等の測定を行うための手法を提案した。本研究の評価では、提案手法および下顎運動測定器により作成した下顎運動測定図を比較した。具体的には、測定図を構成する下顎測定点の座標から等分散性の検定を行い、精度を評価した。比較の結果、提案手法は下顎運動測定器の測定結果と類似した測定図を出力するが、単位時間あたりの測定点のプロット数は下顎運動測定図よりも少なくなるということが確認できた。等分散性検定には、バートレット検定とルビーン検定を用いた。両検定の結果、バートレット検定およびルビーン検定では、有意差はないことを示せた。

参考文献

- 1) 菊谷武, 児玉実穂, 西脇恵子, 福井智子, 稲葉繁, 米山武義, “要介護高齢者の栄養状態と口腔機能, 身体・精神機能との関連について,” 老年歯科医学, vol.18, no.1, pp.10-16, 2003.
- 2) 池邊一典, “高齢者の口腔機能が, 栄養摂取に与える影響,” 日本静脈経腸栄養学会雑誌, vol.31, no.2, pp.681-686, 2016.
- 3) 藤村哲也, 坂東永一, “ディジタル方式顎運動測定器の開発,” 日本補綴歯科学会雑誌, vol.35, no.4, pp.830-842, 1991.
- 4) 坂口究, 知野圭佑, 横山敦郎, “咬合および咀嚼機能の臨床検査の今,” 北海道歯学雑誌, vol.37, no.2, pp.177-180, 2017.
- 5) 藤中高子, 戸床しおり, 福本久美子, “要介護高齢者のための口腔ケアネットワークの構築 歯科に関する保健・医療・福祉の連携,” 日本公衆衛生雑誌, vol.53, no.4, pp.277-284, 2006.
- 6) T. Baltrušaitis, P. Robinson, and L.P. Morency, “OpenFace: An open source facial behavior analysis toolkit,” Proceedings of the 2016 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, pp.1-10, 2016.
- 7) T. Baltrušaitis, P. Robinson, and L.P. Morency, “Constrained local neural fields for robust facial landmark detection in the wild,” Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, pp.354-361, 2013.
- 8) GC, “モーションビジュアライナーV-1 有床義歯咀嚼機能検査システム” [https://www.gcdental.co.jp/sys/data/item/1496/ (cited 2019-Aug-29)].
- 9) The R Foundation, “The R project for statistical computing” [https://www.r-project.org (cited 2019-Aug-29)].
- 10) M.S. Bartlett, and R.H. Fowler, “Properties of su vol.160, pp.268-282, 1937.
- 11) M.B. Brown, and A.B. Forsythe, “Robust tests for equality of variances,” Journal of the American Statistical Association, vol.69, no.346, pp.364-367, 1974.