

多重解像度画像間拘束を導入したアクティブメッシュによる 低テクスチャ画像からのオプティカルフローの算出 —顎関節症の検出—

篠田 武志 松尾 啓志 岩田 彰
名古屋工業大学
〒466-8555

竹内 秀行
竹内歯科医院

名古屋市昭和区御器所町名古屋工業大学電気情報工学科岩田研究室
takeshi@mars.elcom.nitech.ac.jp

あらまし 顎関節症とは、顎関節部を中心として顎関節周辺や筋の何らかの異状により、顎関節部およびその近辺の疼痛、開閉口運動異常、関節雑音などの症状を引き起こす病気である。本研究の目的は、顎関節症である人物の顎の動きの動画像より各フレーム間のオプティカルフローを求め、開閉口運動異常を検出することである。オプティカルフローを求めるには様々な手法があるが、本研究では、人間の皮膚のような低テクスチャ画像において有効なアクティブメッシュを採用した。さらに本研究では、アクティブメッシュに多重解像度画像間拘束を導入することにより耐ノイズ性を高める手法を提案する。本研究の手法により顎関節症である人物の顎の動きの動画像からオプティカルフローを求めた結果、開閉口運動異常を検出することが可能であることを確認した。

キーワード 顎関節症 オプティカルフロー アクティブメッシュ 多重解像度

Calculation of optical flow by multi-resolutional Active Mesh —Detection of Temporomandibular Disorders(TMD)—

Takeshi SHINODA Hiroshi MATSUO Akira IWATA

Nagoya Institute of Technology

IWATA Lab.Department of Electrical & Computer Engineering

Nagoya Institute of Technology Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi 466-8555, Japan

takeshi@mars.elcom.nitech.ac.jp

Hideyuki TAKEUCHI

Takeuchi dental clinic

Abstract Temporomandibular Disorders (TMD) is disease which courses pain, abnormal motion of opening or closing mouth, joint sound by some disorders around temporomandibular joint or muscle. This paper proposed an algorithm to detect the abnormal mouth motion by optical flow from captured images of open-shut mouth. Although there are various methods to calculate optical flow, the active mesh which is effective to low texture image like humans skin is used. Further, the multi resolutional active mesh is also proposed to improve the accuracy of detected open-shut locus. Abnormal motion of mouth (three TMD cases and one normal case) can be detected by the proposed method.

key words Temporomandibular Disorders(TMD) Optical flow Active mesh Multi-resolution

1 はじめに

動画の動き検出、ステレオマッチング、画像合成、画像モーフィング、画像認識などにおいては、よく似た二画像間の対応点を自動的に決定することは根本的な問題である。明るさパターンの見かけの動き、つまりよく似た二画像において片方の画像のある点が他方の画像のどの点に対応するか（どの点に移動したか）を表すベクトル場を画像の輝度値より求めたものを、オプティカルフローという [1]。

オプティカルフローを求める方法として、ブロックマッチング、勾配法 [1]、アクティブメッシュ [2] 等がある。人間の顔の皮膚の表面など、輝度勾配がほとんど無く局所的に低テクスチャである所では、ブロックマッチングや勾配法ではうまく物体表面の動きを検出することができない。しかしアクティブメッシュを用いることにより、テクスチャの無い所は周辺から補間的に物体表面の動きを求められると考える。さらに本研究では、アクティブメッシュに多重解像度間拘束を導入することにより耐ノイズ性を高めた。

顎関節症とは、顎関節部を中心として顎関節周辺や筋の何らかの異常により、顎関節部及びその近辺の疼痛、開閉口運動異常、関節雑音などの症状を引き起こす病気である。本研究の目的は、顎関節症である人物の顎の動きの動画像より各フレーム間のオプティカルフローを求め、開閉口運動異常を検出することである。

本論文では、まず仮想的に動きを加えた顔画像を用いてシミュレーションを行い、アルゴリズムの検討を行う。次に顎関節症例の顎の動きの動画像のオプティカルフローと、健常例の動画像のオプティカルフローを算出することにより、動画像からの顎関節症の診断可能性について検討する。

2 顎関節症 (TMD)

顎関節症とは、顎関節部を中心として顎関節周辺や筋に何らかの異常を示すことによる、周りの筋肉や靱帯も含めた病気である [3]。顎関節症の主症状として、顎関節部及びその近辺の疼痛、開閉口運動異常（制限、偏位、蛇行）、関節雑音などの症状が現れる。本研究の目的は、前記症状の中で開閉口運動異常を動画像より検出することである。

2.1 顎関節症の検査法

顎関節症の検査において、顎の動きを読みとって検査する場合、下顎切歯前庭部に磁石を取り付け、顎を動かしたときに起こる磁場の変化を、メガネフレームで頭部に固定されたセンサーにより感知し、下顎運動を計測す

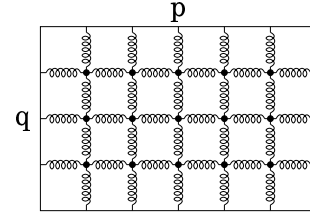


図 1: アクティブメッシュの概念モデル図

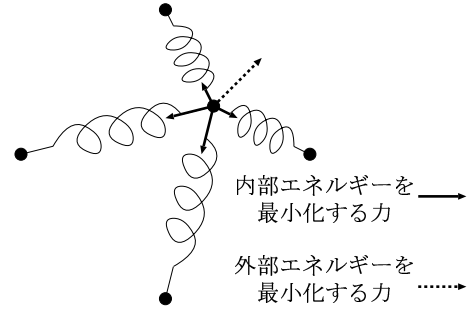


図 2: 内部エネルギー最小化の力と外部エネルギー最小化の力のつりあい

る方法がある [4]。しかしこの方法の場合、装置を頭部と口に装着する必要がある。

本論文のように動画像から下顎運動を計測する手法の場合、そのような装置を装着する必要はない。また、鼻や目などの部分の運動を同時に計測することにより頭全体の動きを補正し、下顎運動のみを計測することが可能となる。

3 アクティブメッシュ

アクティブメッシュ [2] は、エネルギー最小化原理に基づいた網のモデルである。画像上に格子状に配置された対応付けをする点が、画像の x, y 座標上下四近傍の格子点とバネで互いに繋がれ網を形成しているようなモデルである。その概念モデルを図 1 に示す。対応点計算においては、図 2 に示すように網の各格子点に対して定義された網自身の形状の歪みを表す内部エネルギーと、対応付けをする二画像間の差異を表す外部エネルギーとの和が最小となるように網の各格子点は移動を繰り返し、網は変形を繰り返す。各格子点 (x, y) での内部歪みエネルギーは、各フレーム間で変形後のメッシュの形状の歪みを表すものである。点 (x, y) におけるオプティカルフローベクトルを $(u(x, y), v(x, y))$ とすると、内部歪みエネルギーを表す式は式 (1) となる。

$$E_{internal} = \left| \frac{\delta^2}{\delta x^2} (x + u(x, y), y + v(x, y)) \right|^2$$

$$+2 \left| \frac{\delta^2}{\delta x \delta y} (x + u(x, y), y + v(x, y)) \right|^2 + \left| \frac{\delta^2}{\delta y^2} (x + u(x, y), y + v(x, y)) \right|^2 \quad (1)$$

ここで、 $\frac{\delta^2}{\delta x^2} (x + u(x, y)) = \frac{\delta^2}{\delta x^2} u(x, y)$ であるから、実際の内部歪みエネルギーを表す式は式 (2) となる。

$$E_{internal} = \left| \frac{\delta^2}{\delta x^2} (u(x, y), v(x, y)) \right|^2 + 2 \left| \frac{\delta^2}{\delta x \delta y} (u(x, y), v(x, y)) \right|^2 + \left| \frac{\delta^2}{\delta y^2} (u(x, y), v(x, y)) \right|^2 \quad (2)$$

外部適合エネルギーは、対応点の間での輝度値の差を表すもので、式 (3) の値 $E_{external}$ となる。

$$E_{external} = |I(t + 1, x + u, y + v) - I(t, x, y)|^2 \quad (3)$$

これら二つのエネルギー関数の和

$$E_{external} + \alpha E_{internal} \quad (4)$$

が最小となるようにメッシュの各格子点は移動する。全ての格子点について移動を何回も繰り返すことにより、アクティブメッシュの形状を求める。

α は両エネルギー関数間の重みを表す定数係数である。定数係数 α が小さい場合、より外部エネルギーつまり対応する画素の動き情報がアクティブメッシュの変形に影響を及ぼす。また α が小さい場合は近傍の変形情報の影響を強く受けることになる。したがって低テクスチャ画像においては α を大きく設定することにより局所的にテクスチャのほとんど無い所においても、内部エネルギーの拘束により周辺から補間的にアクティブメッシュの形状を求めることが可能となり、安定したオブティカルフローを算出することが可能となる。

4 多重解像度間拘束

低テクスチャ画像から式 (3) で示す外部エネルギーを求めるため、本来の動き情報以外のノイズ成分も多く混入し、結果として正確なオブティカルフローの算出が困難となる。そこで耐ノイズ性を高めるために、本論文ではアクティブメッシュに多重解像度間拘束を導入する。原動画像から低解像度動画像を生成し、それら低解像度画像についてもアクティブメッシュを計算する。そして多重解像度メッシュ間にも拘束を設け、それぞれの解像度で、互いにメッシュ間拘束により計算結果に影響させ合いながら、同時にアクティブメッシュの計算を繰り返す。モデルの概念図を図 3 に示す。

まず、原画像から多重低解像度画像を生成する。原画像を $I^{(1)}$ とし、多重解像度のレベルを m とする。 m 番

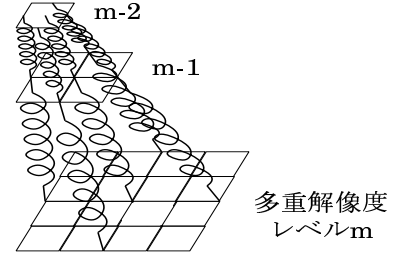


図 3: アクティブメッシュの多重解像度間拘束の概念モデル図

目のレベルの画像を

$$I^{(m)}(i, j) = \frac{1}{4} \{ I^{(m-1)}(2i, 2j) + I^{(m-1)}(2i + 1, 2j) + I^{(m-1)}(2i, 2j + 1) + I^{(m-1)}(2i + 1, 2j + 1) \} \quad (5)$$

のように生成する [5]。

そして、 m 番目のレベルの画像の点 (x, y) でのアクティブメッシュの内部歪みエネルギーについて、新たに式 (6) のように定義する。 m 番目のレベルの点 (x, y) に n おける、画像の大きさについて正規化したオブティカルフローベクトルを $(u(m, x, y), v(m, x, y))$ とする。

$$E_{internal} = \alpha \left\{ \left| \frac{\delta^2}{\delta x^2} (u(m, x, y), v(m, x, y)) \right|^2 + 2 \left| \frac{\delta^2}{\delta x \delta y} (u(m, x, y), v(m, x, y)) \right|^2 + \left| \frac{\delta^2}{\delta y^2} (u(m, x, y), v(m, x, y)) \right|^2 \right\} + \beta \left| \frac{\delta^2}{\delta m^2} (u(m, x, y), v(m, x, y)) \right|^2 \quad (6)$$

α, β は各拘束の重みを表す係数である。新たに定義した内部エネルギーの式の値と、外部エネルギーの式 (3) の値の和を最小化するように、それぞれの解像度についてアクティブメッシュの計算を行う。

ノイズの影響の少ない低解像度動画像についてアクティブメッシュを同時に計算し、その低解像度での計算を、多重解像度間拘束によって高解像度のアクティブメッシュの計算に反映させることで、アクティブメッシュの計算の耐ノイズ性を上げることが期待できる。

5 実験

まず、多重解像度間拘束を導入したアクティブメッシュによる低テクスチャ画像におけるオブティカルフローの精度および耐ノイズ性を検討するために、人工的に変形し、さらにガウスノイズ付加した顔画像を用いた計算を行った。

次に、顎関節症である人物3人と正常例1人の口を閉じる動きの動画像についてそれぞれオプティカルフローを算出し、下顎の移動（軌跡）を求めた。

動画の撮影にはSONY製デジタルビデオカメラレコーダーDCR-TRV900を使用した。撮影は室内にて行った。シャッタースピード125、30フレーム/秒、プログレッシブスキャン無しで撮影し、フレーム間補間をした画像を使って計算をした。画像の解像度は400×480ピクセルで各ピクセルは256階調である。また、入力画像に対する前処理として、ヒストグラム平坦化を行った。

これらの画像のアクティブメッシュの計算に対して、アクティブメッシュの滑らかさ拘束のエネルギー重み係数 $\alpha = 20$ 、多重解像度間拘束の重み係数 $\beta = 4$ 、対応点の輝度値を比較するときの取得ピクセル数を3×3ピクセル、アクティブメッシュの格子点間の幅（網の目の大きさ）を3ピクセル、計算繰り返し回数は600回、多重解像度レベルを5レベルとし、計算を行った。

6 実験結果

6.1 人工変形画像によるシミュレーション

まず、人工変形画像のオプティカルフローの算出結果を示す。計算に用いた、算出に用いた2枚の原画像を図4に示す。左の画像の口から下を、左右と下方向に押し広げた画像が中央の画像で、2枚の画像には分散値 $\sigma = 10$ の正規分布ノイズをそれぞれ付加した。右の画像の線は二つの画像の対応点を結んだもの、つまりオプティカルフローを表す。

これら2枚の画像のオプティカルフローを、多重解像度間拘束無し（ $\alpha = 20, \beta = 0$ ）と多重解像度間拘束有り（ $\alpha = 20, \beta = 4$ ）の二通りのアクティブメッシュを用いて算出した。また、比較参考のためブロックマッチングによるオプティカルフロー計算も行った。ブロックマッチングに関しては、各フレーム間でのブロック（の中心）を動かす範囲を、動く前の点を中心として半径20ピクセルの正方形の範囲とし、ブロックのサイズを15×15ピクセルとした。その計算結果を図5に示す。また、下顎先端周辺120×120ピクセルの範囲（図5左の白い四角）で9ピクセルおきの点について、実際のオプティカルフローベクトルと算出したオプティカルフローベクトルとの、差のベクトルのノルムを横軸、ベクトルの角度差を縦軸にとったグラフを図6にそれぞれ示す。これら人工変形ノイズ付加画像におけるオプティカルフロー計算結果より、多重解像度間拘束をアクティブメッシュに導入することで、その耐ノイズ性が向上したことが確認できた。

6.2 実際の動画像における計算

本論文の手法により、実際の閉口運動動画像の各フレーム間のオプティカルフローを算出し、下顎付近の軌跡を求める。顎関節症である人物Aの計算に用いた口を閉じる動きの動画像の一部（最初のフレーム、途中のフレーム、最後のフレーム）を図7に示す。

動画像の最初のフレームで下顎の点の軌跡の、本手法による計算結果を図8左に示す。また実際の顎の軌跡（顎のほくろの軌跡を、目視により追跡して求めたもの）と、本手法により求めた顎の軌跡を図8右に示す。鼻の点での動きを引くことにより、頭全体の動きを補正している。図8から、本手法によって実際の動画像の顎の動きの軌跡を求められたことが確認できる。

人物Aを含めた顎関節症である人物3人と健常者1人の軌跡の、多重解像度間拘束を導入したアクティブメッシュによる計算結果を図9に示す。図8、図9より、顎関節症である人物の下顎の動きの軌跡は途中で折れ曲がっていることが確認でき、本手法により閉口運動の動画像から顎関節症の検出ができたことが確認できる。

7 まとめ

アクティブメッシュに多重解像度間拘束を導入し、顎関節症例と健常例の顎の動きの動画像のオプティカルフローを求めた結果、閉口運動異常の検出が可能であることを確認した。

参考文献

- [1] Horn 著 NTTヒューマンインタフェース研究所プロジェクト RVT 訳：ロボットビジョン ―機械は世界をどう見るか―
- [2] 坂上 勝彦：遺伝的アルゴリズムとアクティブネットの組合せによるステレオマッチング
電子情報通信学会論文誌 D-II Vol.J77-D-II No.11 pp.2239-2246 1994 年 11 月
- [3] 遠藤 憲史：遠藤顎機能研究所（T E I M F）The ENDO Institute for Mandibular Function
<http://www.tobi.com/fw/endo/>
- [4] マイオトロニクス社 K6 ダイアグノスティックシステム EX 使用説明書
- [5] ズデネク プロハースカ 伊藤 崇之 岡本 敏雄：変形関数による画像間対応関係の決定とその応用
電子情報通信学会論文誌 D-II Vol.J82-D-II No.9 pp.1374-1382 1999 年 9 月

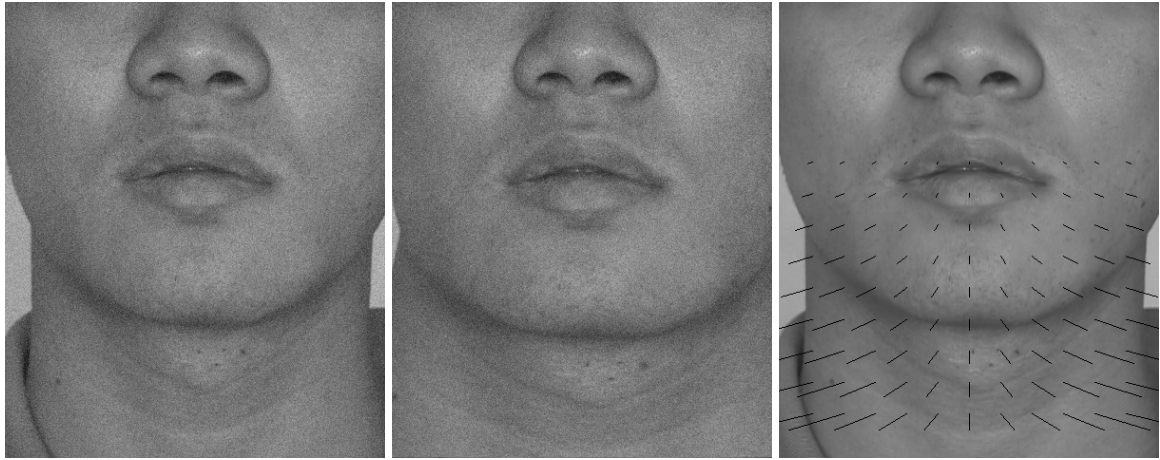


図 4: 人工変形・正規分布ノイズ付加画像
左、中：人工変形ノイズ付加画像 右：混入させたオプティカルフロー

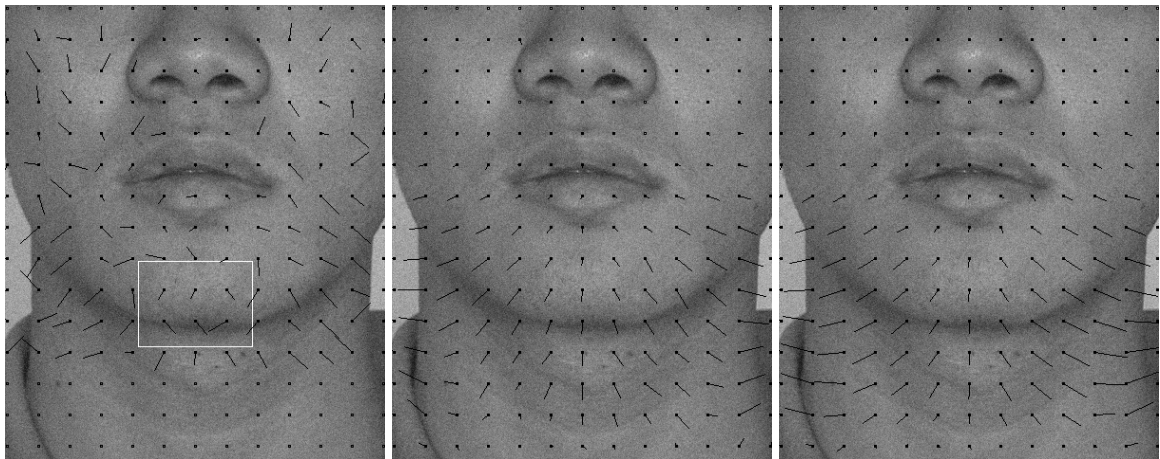


図 5: 人工変形およびノイズ付加画像のオプティカルフロー算出結果
左：ブロックマッチング
中：多重解像度間拘束無しアクティブメッシュ
右：多重解像度間拘束有りアクティブメッシュ

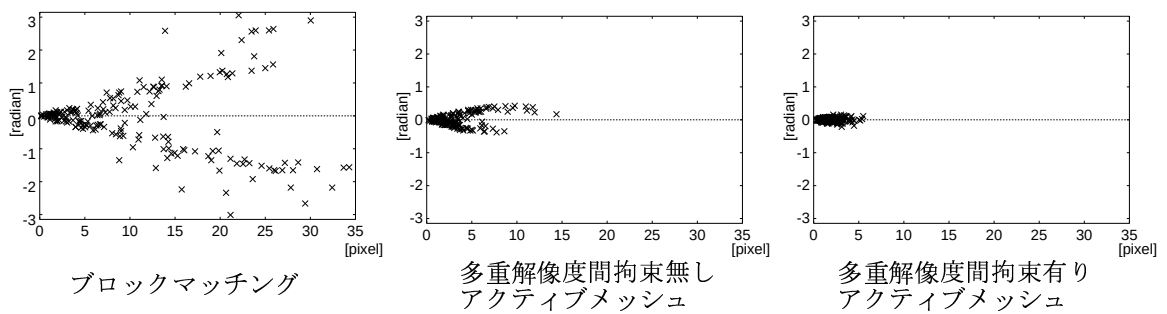


図 6: 実際のオプティカルフローベクトルと算出したオプティカルフローベクトルの差



図 7: 顎関節症である人物 A の計算に用いた閉口運動の動画像（一部）

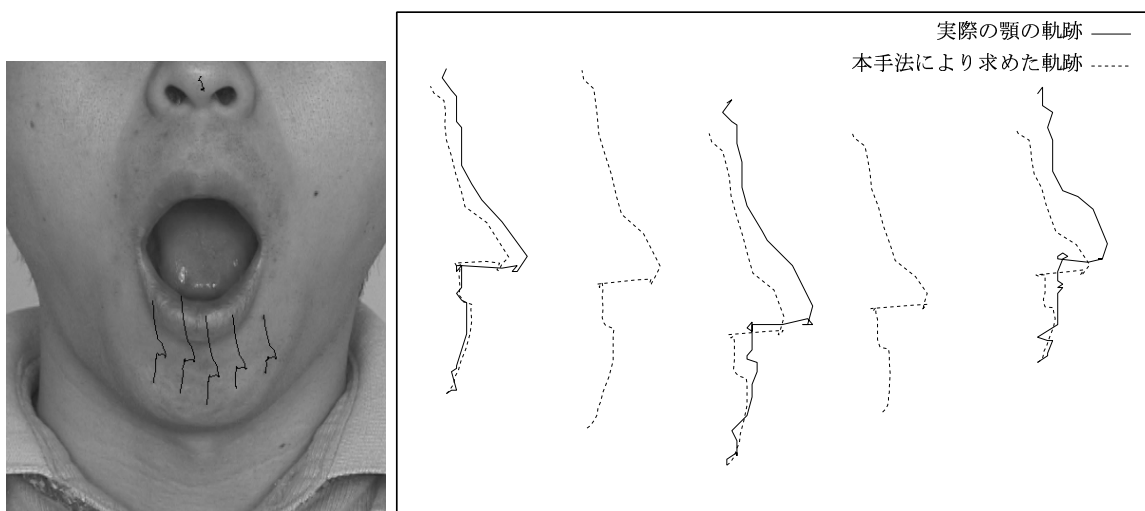


図 8: 顎関節症である人物 A の閉口運動の軌跡の計算結果
左：軌跡の計算結果をオプティカルフロー算出開始画像に重ねた画像 右：実際の軌跡と本手法により求めた軌跡

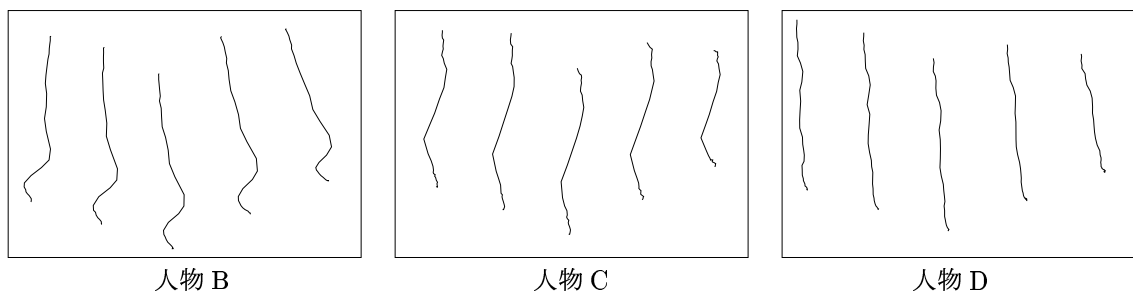


図 9: 顎関節症である人物 2 人 (B,C) と健常者 1 人 (D) の顎の動きの軌跡の本手法による計算結果