

AR マーカを装着した歯ブラシによる 歯磨き位置測定手法の検討

早川修平¹ Ghassan Al-Falouji² Gerald Schickhuber² Roland Mandl²
吉田孝博¹ 半谷精一郎¹

概要: 虫歯、歯周病などの口腔疾患の予防には、日々適切な歯磨きを行うことが重要であり、歯磨きに対する定量的な評価を簡便に行うことができれば口腔疾患の減少に寄与することができる。

本研究では、ユーザの日々の歯磨きに対して適切な助言を自動で教示するシステムを構築するための要素技術として、歯ブラシ後端に AR マーカを複数貼付した正 12 面体を装着し、スマートフォン内蔵カメラで撮影した動画画像から歯ブラシの 3 次元座標位置を推定する手法を開発した。本報告では、歯ブラシの静止状態における歯磨き位置推定精度、歯磨き位置推定に適したマーカ数の検討結果について述べる。

キーワード: 歯磨き、位置推定、AR マーカ

A Study on Measurement of Brushing Position using a Toothbrush with AR Markers

SHUHEI HAYAKAWA^{†1} GHASSAN AL-FALOUJI^{†2}
GERALD SCHICKHUBER^{†2} ROLAND MANDL^{†2}
TAKAHIRO YOSHIDA^{†1} SEIICHIRO HANGAI^{†1}

Abstract: To prevent oral diseases such as tooth decay and periodontal disease, it is important to perform appropriate tooth brushing every day. If quantitative evaluation of tooth brushing can be performed simply, it can contribute to the reduction of oral diseases.

In this study, we propose a 3-D position estimation method of brushing video taken by a smart phone camera with a regular dodecahedron pasted multiple AR markers attached to the rear end of the toothbrush. This report describes the results of toothbrush position estimation accuracy in static, and the optimal number of markers for estimating the toothbrush position.

Keywords: Tooth brushing, Position estimation, Augmented reality marker

1. はじめに

口腔疾患は、世界の 60% 以上の子供とほぼすべての大人が持つ疾患である[1]。口腔疾患の予防には、日々適切な歯磨きを行うことが重要であり、歯磨きに対する定量的な評価とフィードバックを簡便に行うことができれば口腔疾患の減少に寄与することができる。

歯磨きの評価に関する先行研究には、加速度やジャイロセンサが搭載された歯ブラシを用いる研究[2]や、複数台のカメラによるモーションキャプチャを用いる研究[3]がある。しかし、前者のセンサを用いる手法では、センサ情報から歯ブラシの 3 次元角度及び座標を算出する場合、加速度センサの重力加速度成分、ジャイロセンサのドリフトに起因する誤差が生じることが指摘されている。

一方、後者のモーションキャプチャを用いる手法では、被験者を囲むように設置された複数のカメラを用いるため

に大掛かりな設備が必要となり、ユーザが日々の歯磨きを簡便に測定するには向かない。

そこで本研究では、ユーザの日々の歯磨きに対して適切な助言を自動で教示するシステムのための要素技術として、歯ブラシ後端に AR(Augmented reality)マーカを複数貼付した正 12 面体を装着し、スマートフォン内蔵カメラで撮影した動画画像から歯ブラシの 3 次元座標位置を推定する手法を開発した。本報告では、歯ブラシの 3 次元位置測定精度、歯磨き位置推定に適したマーカ数の検討結果について述べる。

2. 歯ブラシ位置測定手法（提案手法）

2.1 特徴点の対応関係を用いた 3 次元位置測定

本研究の目標は、図 1 のように口腔内を 6 つの領域（以下、Sextant と記す）に分割し、さらに各 Sextant を、歯の外側、内側、噛み合わせ部の 3 領域に分割したモデルに基づき、磨いている 16 エリアの特定及び、そのエリアでの磨き動作を検出することである。そこで、この 16 エリアに対して歯磨き位置推定を行うために、本研究では、図 2 のように歯ブラシ後端に ArUco[4]と呼ばれる AR マーカを複数

¹ 東京理科大学
Tokyo University of Science

² オストバイエルン・レーゲンスブルク工科大学
OTH Regensburg

貼付した正 12 面体を装着した歯ブラシを用いて、スマートフォン内蔵カメラで撮影された歯ブラシの動画像から複数のマーカー端点を抽出し、歯ブラシの 3 次元位置測定を行う手法を開発した。

正 12 面体各面にはそれぞれ異なる形状のマーカーが貼付されており、歯ブラシとの結合面以外の計 11 面にマーカーが貼付されている。マーカー貼付物体に正 12 面体を用いた理由は、この正 12 面体ではどの方向から見ても 3 つ以上のマーカーが視認できることで、スマートフォンの位置（カメラの位置）や歯ブラシの向きに対してロバストな検出法を実現できるためである。

複数の AR マーカーからの 3 次元位置測定に用いたカメラモデルにおける座標変換式は、ワールド座標系の 3 次元座標を (X, Y, Z) 、カメラ座標系の 3 次元座標を (x, y, z) 、画像平面に投影された点の座標を (u, v) 、回転行列を R 、並進行列を t 、半径方向の歪み係数 k_1, k_2, k_3 、円周方向の歪み係数 p_1, p_2 、光学中心を (c_x, c_y) 、焦点距離を (f_x, f_y) とすると以下のよう表される。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + t \quad (1)$$

$$x' = x/z \quad (2)$$

$$y' = y/z \quad (3)$$

$$x'' = x'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 x' y' + p_2 (r^2 + 2x'^2) \quad (4)$$

$$y'' = y'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1 (r^2 + 2y'^2) + 2p_2 x' y' \quad (5)$$

ここで、 $r^2 = x'^2 + y'^2$ とすると、

$$u = f_x * x'' + c_x \quad (6)$$

$$v = f_y * y'' + c_y \quad (7)$$

このときの R, t を推定する問題が PnP 問題であり、この推定には OpenCV のソルバを用いた。

2.2 位置測定に用いるマーカーの選択

通常、検出するマーカーの検出数が多いほど姿勢推定が安定して行える傾向にある。しかし一方で、マーカーの動き、あるいはカメラとマーカー間の距離や相対角度により、マーカー検出点の誤差が大きくなるマーカーが存在する。そこで本提案手法では、カメラに正対するマーカーほど検出点の精度が高いと仮定し、位置測定に用いるマーカーの選択として、撮影されたマーカーの面積が大きいものから順に用いた。マーカー ID を i 、マーカー投影面積を S_i 、マーカーの画像上の投影座標を $X=(X_{(i,1)}, X_{(i,2)}, \dots, X_{(i,n)})$ 、 $Y=(Y_{(i,1)}, Y_{(i,2)}, \dots, Y_{(i,n)})$ とすると、面積 S_i は次式で表される。

$$S_i = \frac{1}{2} |\sum X_{i,n} (Y_{i,n+1} - Y_{i,n-1})| \quad (8)$$

3. 歯ブラシ位置測定精度の検証実験

3.1 静的精度と動的性能の検証方法

提案手法による歯ブラシ位置測定精度の検証には、前章で述べた AR マーカーを複数貼付した正 12 面体を歯ブラシ後

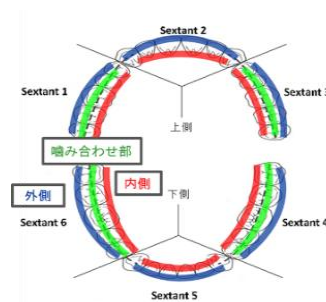


図 1 口腔内 16 分割モデル

Figure 1 16 division model for tooth areas.



図 2 作製した歯ブラシ

Figure 2 Prototyped toothbrush with AR markers.

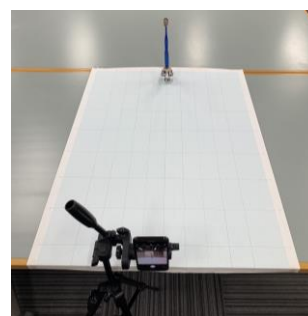


図 3 実験環境と座標設定

Figure 3 Experimental environment and coordinate settings.

端に装着した歯ブラシとスマートフォン（apple 社製 iPhone 7）を用いた。

スマートフォンに搭載されているカメラの内部パラメータ算出のため、カメラキャリブレーションは Zhang の手法[5]により事前に行った。撮影時は図 3 のようにスマートフォンを水平に固定し以下の 2 種類の実験を行った。

・実験(i) 静的精度検証

歯ブラシの停止状態での 3 次元位置測定精度を検証するため、3 次元座標が既知の座標上に歯ブラシを置いた際の位置測定を行い、測定精度を検証する。

なお、測定範囲は、x 方向に $-0.20\text{m} \sim +0.20\text{m}$ まで 0.05m 刻みの 9 箇所、y 方向は -0.13m で固定、z 方向は $+0.70\text{m}$ 、 $+0.75\text{m}$ 、 $+0.80\text{m}$ の 3 箇所の、計 27 箇所の位置で検証を行った。

・実験(ii) 動的性能検証

次に、歯磨きを行っている状況を想定し、歯ブラシを x 軸、y 軸、z 軸方向それぞれについて水平動作を行った場合と、x-z 平面方向に回転動作を行った際の動作について測

定ができるのかを検証する。なお、x 座標 0.00m, y 座標 -0.13m, z 座標 0.80m の位置を基準とし、動作させる各軸方向に対し ± 0.05 m の範囲を、10 秒間往復動作させた。歯ブラシ動作は最も早い動作で 5Hz 程度であるので、60fps で撮影された動画を 12fps へ間引いた後の約 10 秒分（約 120 フレーム）の画像を利用して動作検証を行った。その際、推定された測定位置が動作範囲から 0.05m 以上外れた値を外れ値として評価を行った。

なお、マーカ数の違いによる 3 次元位置測定精度への影響や、歯磨き動作の測定安定性を比較するため、位置測定に使用するマーカを、マーカ面積上位 1 つ、マーカ面積上位 2 つ、マーカ面積上位 3 つ、検出マーカすべて、の計 4 パターンで検証を行った。

3.2 測定位置精度の評価基準

前章で述べた静的精度検証（実験 (i)）の結果を評価するために、実際の日本人の口腔内の大きさを基に測定位置の誤差の許容値を表 1 の様に設定した。図 4 に示すように、瀧上らの報告[6]において、奥歯と前歯の奥行き（z 軸）方向の距離に近い歯列弓長径の距離は 38.21mm であり、Sextant1,2,3 および Sextant4,5,6 の境界に近い歯列弓幅径は日本人成人男性で 44.77mm と報告されている。従って、ユーザが正面を向いており、歯ブラシ角度誤差による位置ズレを考慮しない場合、位置測定誤差が横（x 軸）方向に 20mm、奥行き（z 軸）方向に 18mm 以内の誤差であれば、歯ブラシ位置のみを用いて、前歯（Sextant2, 5）とそれ以外の歯磨き位置を区別すること、前歯以外を磨いている場合に口腔内の左右どちらを磨いているか識別可能であるといえる。

また、舟津らの報告[7]では中切歯の歯冠長は平均 11.30mm であることから、各歯の中央部を磨く場合、y 方向の誤差が 10mm 以内であれば上下 Sextant の識別が可能といえる。歯の外側、内側、噛み合わせ部の 3 領域は歯ブラシ角度を用いて識別可能と考えられるため、精度は考慮しない。以上の考えを基に、x, y, z 各軸における歯ブラシの 3 次元位置測定に求められる精度を策定した。

一方、動的性能検証（実験 (ii)）では、歯磨き中に歯ブラシが動いている場合でも歯ブラシの 3 次元位置が安定して測定可能かという点に着目し、各軸方向における周期的動作について、外れ値を生じることなく動きに追従できた割合（動作追従率）を評価基準とした。

4. 測定精度の検証結果

静的精度検証（実験 (i)）の結果を、計 27 カ所の測定位置の中で誤差 $\leq$ 許容値となる測定位置の比率を図 5 に、全測定位置の平均絶対値誤差 (MAE) と許容値を図 6 に示す。

図 5 より、誤差 $\leq$ 許容値となる比率は、x 座標、y 座標、z 座標ともに、マーカ面積が上位 2 つのマーカを測定に用いた場合が最も精度が高くなることが確認できた。この時、x 座標は全ての測定位置において、y 座標は全測定位置の

表 1 歯列弓の大きさと位置測定誤差の許容値

Table 1 Size of dental arches and baseline of position estimation accuracy.

歯並びの正常な成人男性平均[mm]		目標とする位置測定誤差の許容値[mm]	
歯列弓幅径	44.77	x(横)方向	20
歯列弓長径	38.21	z(奥行き)方向	18
中切歯歯冠長	11.30	y(上下)方向	10

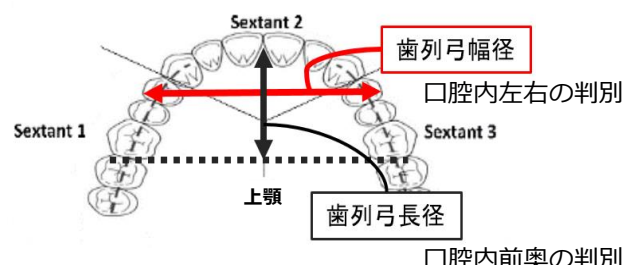


図 4 歯列弓幅径と歯列弓長径

Figure 4 Dental arch width and dental arch length.

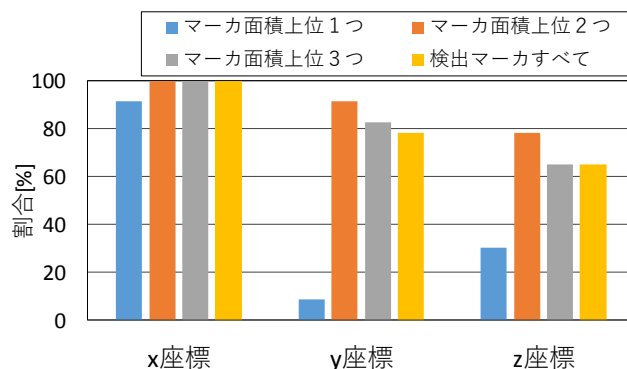


図 5 誤差 $\leq$ 許容値となる測定位置の比率

Figure 5 Ratio of the case when measurement error is less than allowable error.

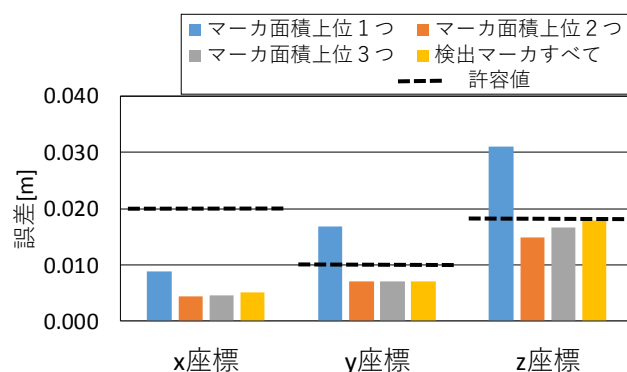


図 6 測定位置の平均絶対値誤差 (MAE) と許容値

Figure 6 Mean absolute error (MAE) of measured position and their allowable value.

91%の測定位置で、z 座標は 78%において許容誤差以下で位置測定ができることが確認できた。

また、図 6 より、マーカ面積上位 2 つのマーカを位置測定に用いる場合に、測定位置の座標との平均絶対値誤差 (MAE) も最も小さくなることが確認できた。この時、測定位置の MAE は x 座標が 0.004m, y 座標が 0.007m, z 座標が 0.015m となり、x 座標, y 座標, z 座標ともに、許容値を下回り、実用的な精度が得られた。

なお、図 5, 図 6 のように、マーカ面積上位 2 つのマーカを用いる場合が最良となった要因としては、歯ブラシとマーカ間の相対角度が大きいマーカまでも位置の算出に用いてしまうことによる精度低下と、検出点の増加による精度改善のバランスがとれた最適なマーカ数であったためと考えられる。

次に、動的性能検証 (実験(ii)) の結果を表 2 に示す。なお、動作追従率が 99.0% を超えた箇所を黄色で色付けして示した。表 2 より、本提案手法の動作追従率は、マーカ面積上位 3 つのマーカを位置測定に用いることで、歯ブラシの x 方向, y 方向, z 方向全ての水平動作と回転動作において、全フレームの位置測定が外れ値なく安定して行っており、追従率 100% を実現した。また、上位 2 位のマーカを用いた場合にも、99.5~100% の高い動作追従率が得られた。

次に、マーカ数に対する静的精度と動的性能の検証結果を併せて図 7 に示す。図 7 より、歯ブラシ位置測定には、静的精度の MAE が最も小さく、誤差 ≤ 許容値となる測定位置の比率が最も高く、動的性能の動作追従率が高くなる、マーカ面積上位 2 つのマーカを用いることが最適であるといえる。

5. まとめと課題

本研究では、歯ブラシ後端に AR マーカを複数貼付した正 12 面体を装着し、スマートフォン内蔵カメラで撮影した動画像から歯ブラシの 3 次元座標位置を測定する手法を開発した。そして、歯ブラシの位置測定精度を、静的実験、動的実験により検証し有効性を確認するとともに、歯ブラシ位置測定に適したマーカの最適数を検討した。その結果、静的精度検証結果より、マーカ面積上位 2 つを測定に用いたとき、許容値を満たす測定箇所が、x 座標は全ての測定位置, y 座標は全測定位置の 91% の測定位置, z 座標は全測定位置の 78% の測定位置と最も多くなり、平均絶対値誤差も、マーカ面積上位 2 つを測定に用いた場合に x 座標が 0.004m, y 座標が 0.007m, z 座標が 0.015m と最小となった。また、動的実験結果より、2 つ, ないし 3 つのマーカを用いることで、いずれの軸方向への動作においても、動作追従率 99% 以上を達成することができ、歯ブラシの動きに対しても安定して位置測定ができることも確認できた。

そして、これらの結果を総合して、2 つのマーカを用いることが最適であることも判明した。

表 2 動的性能評価における動作追従率

Table 2 Motion detection rate in motion experiment.

位置測定に用いた マーカ	動作追従率[%]				平均
	x方向水平動作	y方向水平動作	z方向水平動作	x-z平面回転動作	
マーカ面積上位1つ	96.9	94.8	96.4	98.6	96.7
マーカ面積上位2つ	99.5	100	100	99.5	99.8
マーカ面積上位3つ	100	100	100	100	100
検出マーカすべて	98.1	98.1	100	100	99.0

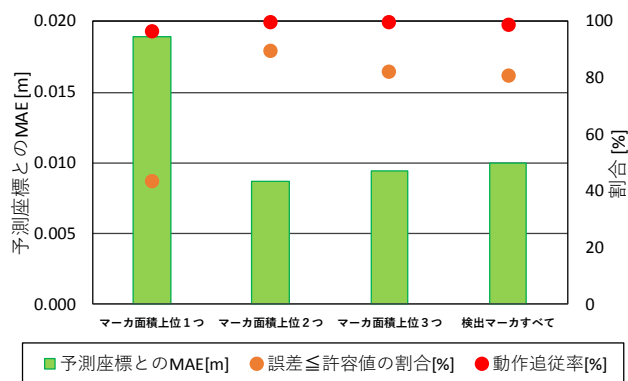


図 7 マーカ数に対する静的精度と動的性能

Figure 7 Relationship between the static accuracy / motion tracking performance and the number of AR markers used for the position measurement.

今後は、実際に歯磨きを行った際の複合的な動作における歯ブラシ位置、歯ブラシの 3 次元角度の推定精度を検証することで、実際の歯磨き位置推定にも発展させてゆく予定である。

参考文献

- [1] Petersen, PE., Bourgeois, D., Ogawa, H., Estupinan-Day, S. and Ndiaye, C.: The global burden of oral diseases and risks to oral health, Bulletin of the World Health Organization, vol. 83, no. 9, p. 661-669 (2005).
- [2] 星野慶, 増田恵子, 半谷精一郎: 歯ブラシに実装されたセンサ群とニューラルネットワークを用いた歯磨き動作識別に関する研究, 映像学技報, vol.40, no.18, p. 45-50 (2016).
- [3] 余永, 有村栄次郎, 稲田絵見, 齊藤一誠, 武元嘉彦, 村上大輔, 下田平貴子, 福重雅美, 北上真由美, 山崎要一: 高精度モーションキャプチャシステムを用いた刷牙動作の解析—第 1 報: 歯ブラシの動きを定量的に評価する方法の考案—, 小児歯科学雑誌, vol. 49, no.5, p. 452-458 (2011).
- [4] Garrido-Jurado, S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. and Marn-Jimenez, M.: Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion, Pattern Recognition, vol. 47, no. 6, p. 2280-2292 (2014).
- [5] Zhang, Z.: A flexible new technique for camera calibration, IEEE TPAMI, vol. 22, no.11, p. 1330-1334 (2000).
- [6] 瀧上啓志, 山口芳功, 吉武一貞: 成人正常咬合者の歯, 歯列, 顎骨の形態変化, 日本口腔科学会雑誌, vol. 50, no. 5, p. 293-298 (2001).
- [7] 舟津聡, 恩田千爾, 坂口賢司, 谷内秀寿, 宮川崇: 歯と人工歯の大きさの比較 1. 上顎前歯, 松本歯学, vol. 23, no.3, p.161-171 (1997).