



高速指先姿勢推定に向けたネイルマーカの試作

Prototype of Nail Markers for High-speed Fingertip Pose Estimation

末石智大¹⁾, 石川正俊¹⁾

Tomohiro SUEISHI and Masatoshi ISHIKAWA

1) 東京大学 情報理工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, Tomohiro_Sueishi@ipc.i.u-tokyo.ac.jp)

概要: ダイナミックプロジェクションマッピングや滑らかな人間機械協調動作に向けて高速な手指姿勢認識が必要だが, 主に低遅延性に大きな課題があった. 本研究では特に指先の高速姿勢推定に着目し, 装着時の拘束性の低いネイルマーカを提案する. 高速光軸制御による高解像度撮影を想定し, 爪という微小剛体曲面上の点群を利用して指先姿勢推定を行う. 本稿では試作したネイルマーカの非平面性による姿勢推定精度の向上を確認した.

キーワード: 爪, マーカ, 高速画像処理, ハンドトラッキング

1. はじめに

ディスプレイやロボットなど情報を扱う装置を利用するとき, 我々は何らかの入力インターフェースを必要とする. 入力インターフェースに用いられる代表的な人間の部位は手や指であり, キーボードへのタイピングやタッチパネルへのフリック動作などの接触式だけでなく, Leap Motion[1, 2]のような非接触式のジェスチャー認識も利用される.

一方で, 高速プロジェクション技術を利用した動く物体へびたりと貼り付いたような投影型拡張現実感 (ダイナミックプロジェクションマッピング) [3, 4] や, 高速ロボットを利用した人間機械協調システム [5] といった, 実世界に対して即時に応答するディスプレイ技術やアクチュエータ技術が登場してきている. これらの技術を人間の手指に対して応用することを考えたとき, 手指の姿勢計測において低遅延性が大きな課題となる.

OptiTrack に代表されるモーションキャプチャシステムは再帰性反射マーカを付与することで人間の動作を高い時間分解能で計測することが可能であるが, 凸状のマーカが高い拘束性を有する [6]. 高い拘束性は長時間の装着に向かないため, 計測の長時間化に向けたマーカの拘束性の低下も同時に達成されることが望ましい.

本研究では計測対象として特に指先の爪に着目し, 爪という微小剛体曲面上にドットを用いたテクスチャを付与した拘束性の低いネイルマーカを提案する. 手指は広範囲の移動を伴うが, 回転鏡を用いた高速光軸制御系による光学的な追従撮影 [7] によって, 比較的高解像度な手指付近の画像が得られると仮定するため, モーションキャプチャシステムで用いられるマーカよりも高い解像度で設計する. 本稿ではネイルチップを利用して作成したネイルマーカの姿勢推定精度について検証する.

2. 関連研究

一般に拡張現実感において, 対象のトラッキングやカメラの自己位置推定に平面マーカがよく用いられる. 代表的な平面マーカとしては矩形白黒の AR マーカが挙げられるが, 近年では ArUco マーカ [8] といった画像処理ライブラリである OpenCV 上で利用しやすいものも登場している. 平面マーカの大きな欠点として, 真正面からの観測時に回転の推定精度が大きく低下することが報告されており, レンチキュラーレンズとモアレを利用して正面からの推定精度を向上させるようなマーカも開発されている [9].

一方で棒状の物体の先端に姿勢推定用のマーカを取り付ける例も存在する. Wu らはペンの先端に 12 面体を取り付け, 各面に AR マーカを貼り合わせて, ペンの高精度な姿勢推定を実現している [10]. Gupta らは指先に立方体に構成した AR マーカを取り付け, Web カメラを利用した安価な五指ジェスチャー認識を実現している [11]. このように平面マーカを利用した姿勢推定技術を様々な角度から利用できるように, 剛体の正多面体を用いたマーカが用いられるが, 特に指先に装着する場合はタイピングやタッチ操作が難しくなるなど, 拘束性が高いと考えられる.

平面以外のトラッキング用マーカとしては, 多点のドットを分布させる方式が多く報告されている. 例えば OptiTrack では再帰性反射のドットを身体のような位置に付着させることでトラッキングを実現している [6]. Uchiyama らはランダムに分布させたドットを利用して非剛体曲面へのトラッキング [12] を, 更に Narita らはドットクラスターマーカを利用して高速な非剛体曲面のトラッキングを実現している [3]. これらのドットに基づくマーカは画像処理の並列化が可能で, 高速低遅延な姿勢推定が期待しやすい.

そして剛体曲面に向けたマーカとして円筒の曲率も計

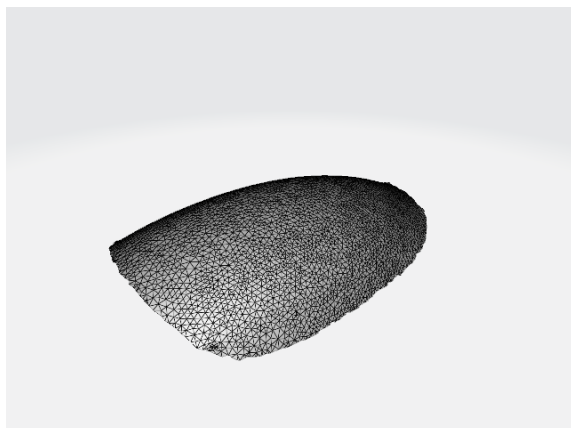


図 1: ネイルチップの三次元スキャンデータの例。画面右奥が指先の方向，画面左手前が爪の付け根の部分を指す。

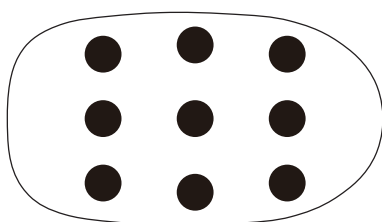


図 2: ネイル表面のマルチドット配置（上面図）。図右側が指先方向を指す。

算可能な AR マーカーも提案されている [13]。しかしながら爪という剛体曲面は円筒とはやや形状が異なり球面的な丸みを帯びており，更に爪表面も楕円形に近く矩形マーカーの十分な配置が難しいため，そのままの利用は困難と考えられる。本稿では高速画像処理を意図したドットに基づき，爪という微小剛体曲面へのマーカー設計について議論する。

3. 提案手法：ネイル上多点マーカー

3.1 爪の三次元形状およびドット配置

図 1 にネイルチップの三次元スキャンデータの例を示す。爪表面は平面でも円筒でもない形状を有しており，指先方向および指の幅方向両方において丸みを帯びた形状をもつ。また，爪は十分に剛性が高く剛体と仮定してよい。この剛体曲面という特徴から平面マーカーのような真正面からの観測による回転推定精度低下 [9] が起きにくいと予想される。そのため，単純な AR マーカーを指先に貼り付けるよりも，推定精度が低下しやすい苦手な観察角度を含まない，高い姿勢推定精度が期待できる。

また，今回は高速画像処理に向けてマルチドットを爪表面上に配置する。上記の回転推定精度低下の回避には，各ドットが同一平面上に存在しないことが必要となる。今回は図 2 に示すように，S/N 比の向上を意図して白色ネイル上に 9 点の黒ドットを配置してネイルマーカーを作成する。

3.2 ネイルマーカー製作手順

ネイルマーカーを用いた指先姿勢推定において必要な物および情報は，ネイルマーカーの実物とその表面テクスチャの 3 次元位置情報である。それらを揃えるためのネイルマ

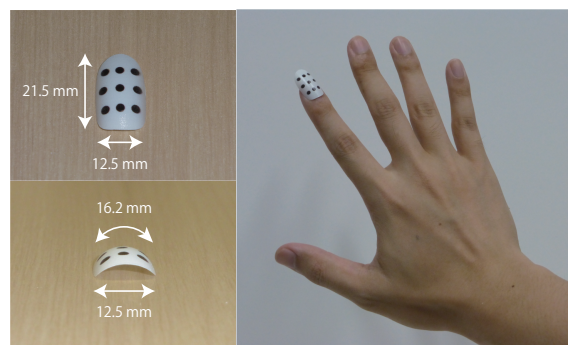


図 3: 試作したネイルチップ。

カーの製作方針は，主に下記の 2 通り考えられる。

1. 精緻なネイルマーカーの 3D モデルを先に作成し，3D プリントにより精緻な三次元形状物体を製作する。
2. おおよその 3D モデルおよびネイルプリントによって三次元形状物体を製作した後，3D スキャナによって精緻な 3D モデルを取得する。

前者の製作方法は，近年盛んとなっている 3D プリント技術によるマーカー造形 [14] が利用できそうではあるが，ネイルチップのような薄い形状の造形には不向きである。後者はネイルアート用のプリンタが近年登場しているように，微小剛体曲面上に高い解像度の印刷が可能であるため，本稿では後者の方針を採用する。特に，ネイルチップではなく人体の爪そのものをネイルマーカーにする場合は，後者の場合のみ適用可能となる点も重要である。

3.3 ドット三次元位置取得

ネイルチップ等に印刷したマルチドットの三次元位置を取得する手順を説明する。まず，造形したネイルマーカーの 3D スキャンによって，3D ポリゴンの各頂点の三次元位置情報と色情報を計測する。ここで図 2 に示すように，ネイル曲面上のテクスチャは特定の平面に射影して表現が可能であると仮定する。ネイルマーカーの 3 次元データを上面図のような平面に射影した画像を生成し，2 次元画像における簡単な画像処理（輪郭抽出を利用したラベリング）によってドット領域を特定する。各ドットの 2 次元重心位置に対応する直線とポリゴンが交差する三次元点を，ドットの三次元中心位置とする。

ドットの三次元位置情報が既知であれば，校正済のカメラを用いたネイルマーカーの撮影画像から姿勢推定が可能となる。具体的には輪郭検出やラベリングなどの画像処理によってマルチドットを検出し [3, 4]，PnP 問題を解くことで回転・並進 6 自由度が計算できる [14]。

4. 評価実験

4.1 実験環境

本稿ではネイルプリントサービスで試作したネイルチップの 3D モデルにおける姿勢推定精度を評価した。ネイルチップは長さ 21.5 [mm]，幅 12.5 [mm]，カーブ幅 16.2 [mm] のものを使用した。図 3 に試作したネイルチップを示す。ネイ

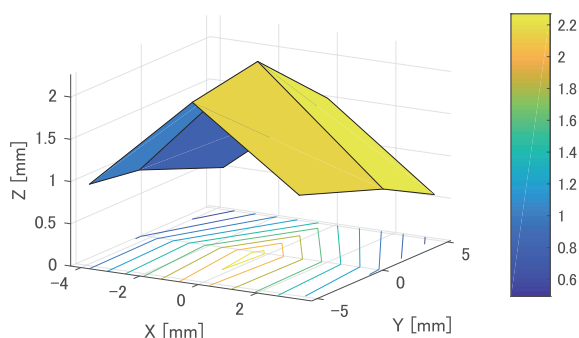


図 4: 計算したドットの三次元位置.

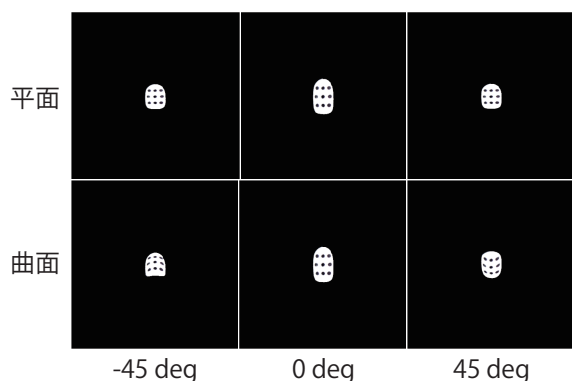


図 5: シミュレーション画像.

ルチップの 3D スキャンには、Open Technologies 社 SCAN in a BOX (2 カメラ 1 プロジェクタから構成される) を使用した。なお、3D モデルの整形は手動で行った。

本稿では姿勢推定精度評価において OpenGL によるシミュレーションを用いた。シミュレーション条件として、画像サイズ 512×512 [px]、カメラレンズ焦点距離 $f_x = f_y = 2500$ [px]、レンズ主点位置 $c_x = c_y = 256$ [px] とし、ネイルマーカーをカメラの 500 [mm] 前方に設置した。なお、今回は形状のみの特徴比較を目的としたため、陰影や光源の設定は行っていない。

4.2 ドット三次元位置計測精度評価

試作したネイルマーカーから作成した 3D モデルに対しドットの三次元位置取得の処理を行ったところ、9 個のドットが同一平面上には存在せず、ネイルマーカーの厚み方向にばらつきのあるデータが復元できた。図 4 に 3D モデルから計算したドットの三次元位置を示す。

また、この 9 個の三次元点に対し、最小二乗法を用いてフィッティングした平面と各点との距離を計算すると、平均 0.50 [mm]、最大 1.06 [mm] の距離があることが確認できた。すなわち微小剛体曲面上のドットによって、最大で 1 [mm] 程度の非平面状のマーカーが形成できていることが確認できた。

4.3 姿勢推定評価実験

次に、X 軸方向 (指幅方向) を軸としてネイルマーカーを回転 ($-45 \sim 45$ [deg]) させたときの姿勢推定精度を評価した。また、復元した 3D モデルの頂点データを $Z = 0$

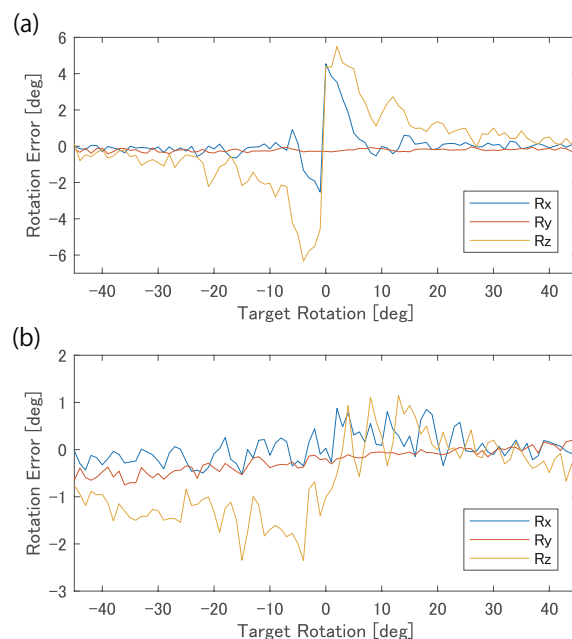


図 6: 回転の推定誤差: (a) 平面, (b) 曲面.

としたデータも用いて同様の評価を行い、平面マーカーとの比較とした。図 5 にシミュレーションに用いた画像の例を、図 6 に平面・曲面における回転の推定誤差 (真値との差) を示す。なお姿勢推定における PnP 問題を解くときは真値を初期値とした反復法を利用し、マルチドットの検出も含めオフラインで解析を行った。

平面において対象の姿勢が 0 [deg] 付近の状態、5~6 [deg] もの回転推定誤差が生じており、正面からの観測において推定精度が著しく低下する現象 [9] が確認できた。一方で、曲面のネイルマーカーでは回転推定誤差が 1~2 [deg] 程度に収まっており、極端に誤差が大きくなるような姿勢は確認できなかった。すなわち、図 4 のドットの三次元位置を考慮に入れると、最大 1 [mm] 程度のマーカー表面の起伏により、平面マーカーの回転推定における欠点 [9] を大きく緩和することが出来ることが確かめられた。

5. おわりに

本稿ではダイナミックプロジェクションマッピングなど低レイテンシが要求される指先姿勢推定応用に向けて、継続的かつ高解像度な画像計測を実現する高速光軸制御計への利用を意図し、拘束性の低い微小剛体曲面であるネイルマーカーを提案し、実際にネイルプリントを用いて試作した。精緻な 3D スキャンを用いて作成した CG データによるシミュレーションによって、マルチドットを有するネイルマーカーが十分な非平面性を有し、平面マーカーと比較して回転推定精度が大きく向上することが確認できた。

今後は高速なネイルマーカー検出画像処理の実装により、実際に指先に付けた場合の高速トラッキングについて定量的に評価を行う。またネイルマーカー上のテクスチャの選定や爪形状の個人差への対応などの検討も進めつつ、手指へのダイナミックプロジェクションマッピング等の応用の実

現を目指す。

参考文献

- [1] Frank Weichert, Daniel Bachmann, Bartholomäus Rudak, and Denis Fisseler. Analysis of the accuracy and robustness of the leap motion controller. *Sensors*, Vol. 13, No. 5, pp. 6380–6393, 2013.
- [2] Jože Guna, Grega Jakus, Matevž Pogačnik, Sašo Tomažič, and Jaka Sodnik. An analysis of the precision and reliability of the leap motion sensor and its suitability for static and dynamic tracking. *Sensors*, Vol. 14, No. 2, pp. 3702–3720, 2014.
- [3] Gaku Narita, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. Dynamic projection mapping onto deforming non-rigid surface using deformable dot cluster marker. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, Vol. 23, No. 3, pp. 1235–1248, 2016.
- [4] Yuri Mikawa, Tomohiro Sueishi, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. Variolight: hybrid dynamic projection mapping using high-speed projector and optical axis controller. In *SIGGRAPH Asia 2018 Emerging Technologies*, p. 17. ACM, 2018.
- [5] Yuji Yamakawa, Kazuki Kuno, and Masatoshi Ishikawa. Human-robot cooperative task realization using high-speed robot hand system. In *2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 281–286. IEEE, 2015.
- [6] Ludovic Hoyet, Kenneth Ryall, Rachel McDonnell, and Carol O’Sullivan. Sleight of hand: perception of finger motion from reduced marker sets. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH symposium on interactive 3D graphics and games*, pp. 79–86. ACM, 2012.
- [7] 奥村光平, 奥寛雅, 石川正俊. アクティブビジョンの高速化を担う光学的視線制御システム. 日本ロボット学会誌, Vol. 29, No. 2, pp. 201–211, 2011.
- [8] Francisco J Romero-Ramirez, Rafael Muñoz-Salinas, and Rafael Medina-Carnicer. Speeded up detection of squared fiducial markers. *Image and Vision Computing*, Vol. 76, pp. 38–47, 2018.
- [9] 田中秀幸, 角保志, 松本吉央. Lentimark: レンチキュラーレンズを用いた高精度な姿勢推定のための視覚マーカ. 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 95, No. 8, pp. 1522–1529, 2012.
- [10] Po-Chen Wu, Robert Wang, Kenrick Kin, Christopher Twigg, Shangchen Han, Ming-Hsuan Yang, and Shao-Yi Chien. Dodecapen: Accurate 6dof tracking of a passive stylus. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 365–374. ACM, 2017.
- [11] Ojaswi Gupta and Ramya Hebbalaguppe. Fingertipcubes: an inexpensive diy wearable for 6-dof per fingertip pose estimation using a single rgb camera. In *SIGGRAPH Asia 2018 Posters*, p. 20. ACM, 2018.
- [12] Hideaki Uchiyama and Eric Marchand. Deformable random dot markers. In *2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 237–238. IEEE, 2011.
- [13] Asahi Suzuki, Yoshitsugu Manabe, and Noriko Yata. Design of an ar marker for cylindrical surface. In *2013 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 293–294. IEEE, 2013.
- [14] 菅間拓実, 末石智大, 石川正俊. 手指の高速姿勢推定に向けた再帰反射特性に基づく立体的リング状マーカの検討. 第 25 回画像センシングシンポジウム, pp. IS2–20, 2019.