高速カラープロジェクタを用いたダイナミックフェイシャルプロジェクションマッピングの試作

瞿 佳雯 *1　　渡辺　義浩 *1

Abstract – 近年，様々な顔へのダイナミックプロジェクションマッピングが実現されている．しかし，現実の顔と投影された映像のずれが知覚できない程度まで遅延を抑えるためには，顔追跡と投影の両方の高速化が課題であった．このような要請に対して，高速プロジェクタを用いたものもあるが，投影映像がモノクロに限定されているなどの問題があった．そこで本稿では，高速カラープロジェクタを新たに導入したダイナミックフェイシャルプロジェクションマッピングを報告する．また，同システムを用いて肌色や肌反射特性を操作する手法とその検証結果を述べる．

Keywords ： 高速プロジェクタ，顔追跡，ダイナミックプロジェクションマッピング

1　はじめに

プロジェクタを用いて，映像を物体の表面に合わせて投影する技術はプロジェクションマッピングと呼ばれている．このようなプロジェクションマッピングに関して，様々な技術が提案されている．例えば建築，楽器などの物体へのプロジェクションマッピングのアプリケーションが広がっている．このように，アート，エンターテインメントや学習支援などの分野での応用展開が期待されている [1, 2, 10, 12, 13, 14, 15, 19]．

さらに，投影対象を顔にすれば，舞台表現，バーチャルメイクなどの分野で斬新な体験を与えられる．本稿では，特に顔へ投影するプロジェクションマッピングに着目する．近年では，動的に変化する顔を投影対象としたダイナミックプロジェクションマッピング技術が新たに可能となった．これまで関連研究のうち，Siegl らが非剛体の顔へのマーカーレスプロジェクションマッピングを達成した [3]．しかし，Siegl らの手法では，1 フレームの処理時間が 20ms であった [3]．運動と変形している物体と投影像の間に 6ms 以上の投影遅延があると，人間が遅延を知覚し，没入体験は低下する恐れがある [5]．

一方，高速プロジェクタ Dynaflash と高速カメラを用いた顔へのマッピングも実現された [18]．用いられた高速プロジェクタは 1000fps で 8bit グレースケール画像を投影することが可能である．しかし，同手法では顔の変形に対応できない問題を抱えていた．これに対して，同じ高速プロジェクタを用いて，マーカレスで顔の変形に追従するプロジェクションマッピングが実現された [6]．しかし，この手法で投影像はモノクロのテクスチャで，表現力が不足している問題があった．

また，Bermano らでは，480fps で投影できる高速カラープロジェクタを用いた顔へのプロジェクションマッピング手法を提案した [4]．同論文では，顔への追跡・投影を含まない場合のシステム遅延が 10ms 程度，顔への追跡・投影のための処理時間が 7ms 程度と報告されている．より遅延が抑えられるシステム構成が望ましいと考えられる．これに対して，同遅延による影響を抑えるために，カルマンフィルタによる予測処理を組み込んでいた．このほか，高速プロジェクタが大型である点も運用の点で問題があったと考えられる．

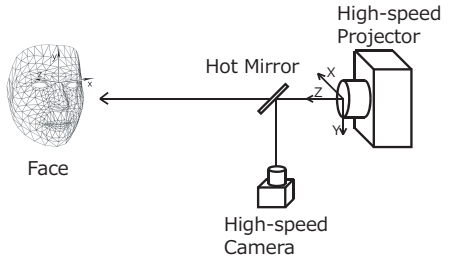

図 1　システムの構成
Fig. 1　Configuration of system

一方，撮像された顔画像をモニタ内で仮想的に加工するニーズは高く，近年では，スマートフォンの機能として実装されている．モデルベースの手法や深層学習を利用する手法など，様々なものが提案されている [7, 11]．これに対して，ダイナミックプロジェクションマッピングを介したアプローチのように，実世界で加工できれば，コミュニケーションや自己表現などの新たな展開が期待できると考えられる．

そこで本稿では，単板式の高速カラープロジェクタ [9] を用いたダイナミックフェイシャルプロジェクションマッピングを提案する．同高速プロジェクタは単板式であるため，システムサイズを小さく抑えることが

*1 東京工業大学

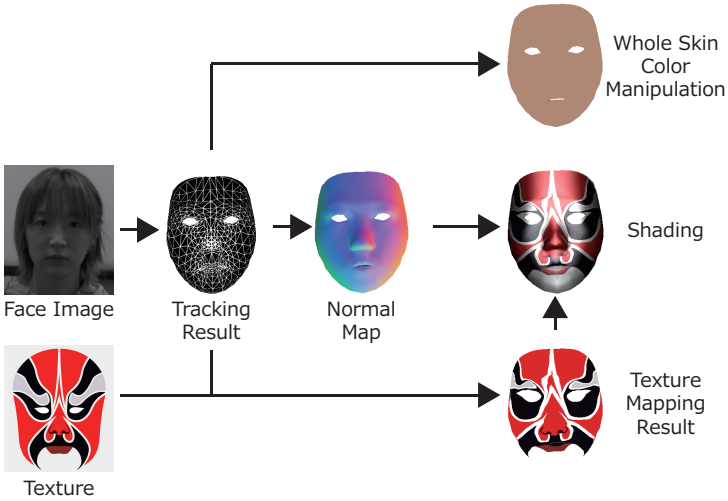

図 2　システムの流れ
Fig. 2　Workflow of system

可能である．また，同プロジェクタは 947fps で 24bit の投影が可能である．さらに，マーカレスで顔の追従に合わせたプロジェクションマッピングを実現できる．

2　高速カラープロジェクタを用いたダイナミックフェイシャルプロジェクションマッピング

2.1　概要

システムの全体構成を図 1 に示す．提案システムは同軸設置された高速カメラ 1 台と高速プロジェクタ 1 台から構成される．

図 2 に提案システムの処理の流れを示す．まず撮像された画像を用いて，顔追跡技術に基づいて，顔の特徴点検出を行う．次に，検出された特徴点の座標によって顔の位置を取得し，顔の形状を表現する三角形メッシュを生成する．最後に，予め用意したテクスチャ画像を顔メッシュ形状と合わせて変形して投影画像を生成する．

さらに，顔メッシュから計算された法線情報を利用することによって，光源と顔の反射特性を操作した画像を生成する．さらに，顔の実際に動きに合わせて，同操作も追従させることで動的な質感を再現する．

2.2　顔のマーカレス追跡

これまでの顔追跡手法には，2 次元の輝度画像のみを用いるタイプ，デプス画像を用いるタイプ，その両者を用いるタイプなどがある．これらの手法のなかで，輝度画像を使うタイプは 1000fps レベルの高速顔追跡手法なども提案されており [16, 17]，システムが要請する速度を達成することができると考えられる．そこで，本稿は顔のモノクロ画像を用いて特徴点を検出するアプローチを採用する．

顔追跡から，図 1 で示した顔の相対座標系に基づく顔メッシュの N 個頂点の三次元座標の集合 $X = \{\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{x}_2, ..., \boldsymbol{x}_N\}$ を取得する．また，顔座標系からカメラ座標系への回転行列 R と併進 $\boldsymbol{t}$ を取得する．

次に，各頂点座標に基づい法線情報を計算する．具体的には，隣接する 3 頂点の位置から式 (1) に示すように，三角形の法線ベクトルを計算する．

$$\boldsymbol{n}_{ijk} = \frac{(\boldsymbol{x}_j - \boldsymbol{x}_i) \times (\boldsymbol{x}_k - \boldsymbol{x}_i)}{\|(\boldsymbol{x}_j - \boldsymbol{x}_i) \times (\boldsymbol{x}_k - \boldsymbol{x}_i)\|} \tag{1}$$

各頂点の法線は，式 (2) に示すように計算する．

$$\boldsymbol{n}_i = \frac{1}{|N_i|} \sum_{(j,k) \in N_i} \boldsymbol{n}_{ijk} \tag{2}$$

ここで，i, j, k は隣接する頂点，N_i は頂点 i を含める三角形の隣接頂点対の集合とする．

2.3　投影像の生成

三角形の頂点のカメラ座標系に対応するピクセル座標を $\boldsymbol{p}_i^c$ とする．カメラの投影関数は $P(\cdot)$ とする．顔座標系からカメラ座標系へは，式 (3) を用いて変換する．

$$\boldsymbol{p}_i^c = P(R\boldsymbol{x}_i + t) \tag{3}$$

顔に合わせる投影像を生成するため，$\boldsymbol{p}_i^c$ をプロジェクタ座標系おけるピクセル座標 $\boldsymbol{p}_i^p$ にの変換する必要がある．システムが同軸構成であるため，この変換は式 (4) のようにホモグラフィー行列 H^{pc} で示す．

$$\boldsymbol{p}_i^p = H^{pc}\boldsymbol{p}_i^c \tag{4}$$

そして，予め用意したテクスチャ画像を顔のメッシュに対応してアライメントし，式 (3)(4) による変換した結果を利用して，顔にテクスチャを貼り付いたような投影が可能になる．テクスチャにメイクの画像を埋め

込んで，顔の各部分の色や反射特性を操作すれば，フェイスペイントや肌の色操作も可能になる．

なお，式 (1)(2) で計算できた顔メッシュにおける各三角形の頂点法線を用いて，仮想の光源と反射特性を用いた陰影画像を投影することで，光沢感を操作することもできる．具体的に，頂点 i の色 I_i は式 (5)(6)(7) のようにシェーディングする．

$$I_i = A_i + D_i + S_i \tag{5}$$

A_i は環境光，D_i は拡散反射，S_i は鏡面反射とする．

Phong のモデルを用いて，その中，D_i と S_i は式 (6)(7) のように計算する [20].

$$D_i = \frac{ML_i \boldsymbol{n}_i \cdot \boldsymbol{l}_i}{d_i^2} \tag{6}$$

$$S_i = \frac{ML_i((\boldsymbol{l}_i - 2(\boldsymbol{n}_i \cdot \boldsymbol{l}_i)\boldsymbol{n}_i) \cdot \boldsymbol{w}_i)^t}{d_i^2} \tag{7}$$

M はアルベド，L_i は仮想点光源の強さ，d_i は仮想光源との距離，$\boldsymbol{n}_i$ が頂点 i の法線，$\boldsymbol{l}_i$ は入射光の方向ベクトル，$\boldsymbol{w}_i$ は視線方向ベクトル，t は鏡面反射の特性を操作するパラメータである．

さらに，このようなシェーディングと合わせて，法線マッピングを用いることで，凹凸感の質感を操作することもできると考えられる [21].

3 実験

3.1 実験条件

本実験では，図 3 に示すように，擬似的に同軸構成で配置したカメラとプロジェクタを用いた．使用したカメラは解像度 720×540 で，最大 500fps で撮影可能な高速カメラ Basler acA720-520um である．使用したプロジェクタは最小投影遅延が約 2ms で，最大フレームレート 947fps で投影可能な高速カラープロジェクタである [9]．使用した CPU は Intel(R) Xeon(R) Gold 6136 CPU (3.00GHz) である．鏡面反射を抑えるため，投影対象はファンデーションとルースパウダーだけを施した顔とした．なお，今回は顔追跡の処理時間は 150fps の程度であった．関連論文 [16] の達成性能に基づけば，高速化は可能であると考えられる．

3.2 効果評価

動的に変化する顔に対してのプロジェクションマッピングの結果を図 4 に示す．1 段目はカラーテクスチャマッピングの結果である，追跡した顔の表情変化と位置変化に対応してテクスチャを正確に投影できていることが確認できる．システムに導入した高速カラープロジェクタによって，従来手法と比べて遅延が大きく低減された上，カラー化したプロジェクションマッピングも実現できた．

図 3　実験環境
Fig. 3　Experiment setup

2 つ目の応用を同図 2 段目に示す．ここでは，追跡した顔に異なる色を投影して，肌色の調整を実施した．同手法により，ファンデーションなどの化粧効果を期待できる．

3 段目はシェーディングを用いて仮想の光沢感を実現した投影結果である．仮想の反射特性と法線情報を統合して生成した陰影画像を投影することによって，顔の輪郭や顔器官の立体感などを操作できることがが確認できた．

なお，これらの応用では，顔以外の場所にも高速プロジェクタによって白色を投影している．これによって，顔だけが暗闇に浮かび上がることを避けている．また，肌色調整の応用では，照明色が変わったのではなく，肌色が変わったと知覚させる効果を生み出すことが可能となっている．

4 まとめ

本稿では，高速カラープロジェクタと高速カメラを連携し，顔追跡を行うことで非剛体の顔変形に対応できるダイナミックフェイシャルプロジェクションマッピングの実現手法について述べた．カラー化されたシステムを用いてバーチャルメイクなど幅広い分野での応用が期待できる．

参考文献

[1] 渡辺 義浩, 末石 智大, 石川 正俊: ダイナミックプロジェクションマッピング (特集 プロジェクションマッピング技術とその応用); 映像情報メディア学会誌, 72(3), 332-335 (2018.5)

[2] 土井 麻由佳, 宮下 芳明: プロジェクションマッピングによる箏演奏学習支援システム; 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション（HCI）, 2017-HCI-172(15), 1-8 (2017)

[3] Christian Siegl, Vanessa Lange, Marc Stamminger, Frank Bauer, Justus Thies: FaceForge: Markerless Non-Rigid Face Multi-Projection Mapping; IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics,vol. 23, 2440-2446 (2017.11)

[4] Amit H. Bermano, Markus Billeter, Daisuke Iwai, Anselm Grundhöfer: Makeup Lamps: Live Augmentation of Human Faces via Projection; Computer Graphics Forum, 311-323 (2017.5)

[5] Albert Ng, Julian Lepinski, Daniel Wigdor, Steven Sanders, and Paul Dietz: Designing for low-

図 4　ダイナミックフェイシャルプロジェクションマッピングの実験結果．1 段目：顔の表情と位置が変化していながらカラーテクスチャマッピングの結果．2 段目：異なる色の投影で肌色を操作した結果．3 段目：シェーディングで顔に仮想の光沢感を実現した投影結果．
Fig. 4　Demonstration of the proposed dynamic facial projection mapping

latency direct-touch input. In Proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '12), 453-464 (2012.10)

[6] Dynamic Facial Projection Mapping - Basic Test, 2018. http://www.vision.ict.e.titech.ac.jp/projects/faceDPM/

[7] Chen Li, Kun Zhou, Hsiang-Tao Wu and Stephen Lin: Physically-Based Simulation of Cosmetics via Intrinsic Image Decomposition with Facial Priors; IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 41, 1455-1469 (2019.6)

[8] Yoshihiro Watanabe, Gaku Narita, Sho Tatsuno, Takeshi Yuasa, Kiwamu Sumino, Masatoshi Ishikawa. High-speed 8-bit image projector at 1,000 fps with 3 ms delay. International Display Workshops (2015.12).

[9] Yoshihiro Watanabe, Masatoshi Ishikawa: High-Speed and High-Brightness Color Single-Chip DLP Projector Using High-Power LED-Based Light Sources, International Display Workshops (2019)

[10] Yoshihiro Watanabe, Toshiyuki Kato, Masatoshi Ishikawa: Extended Dot Cluster Marker for High-speed 3D Tracking in Dynamic Projection Mapping; 2017 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 52-61 (2017.10)

[11] Takao Makino, Norimichi Tsumura, Koichi Takase, Keiichi Ochiai, Nobutoshi Ojima, Toshiya Nakaguchi: Computational lighting reproduction for facial live video with rigid facial motion. Journal of Imaging Science and Technology, 55(1), 10503-1-10503-7 (2011.1)

[12] 遠藤 宣明, 天野 光, 渡辺 義浩, 石川 正俊: High-Speed Three-Dimensional Tracking of Non-Rigid Surface for Dynamic Projection Mapping Using Multiple Cameras; 電子情報通信学会技術研究報告, 87-92 (2018.1)

[13] 田畑 智志, 天野 光, 渡辺 義浩, 石川 正俊: 高速 3 次元追跡を用いたマーカレスダイナミックプロジェクションマッピングの検証; 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), 1-6 (2018.1)

[14] Leo Miyashita, Yoshihiro Watanabe, Masatoshi Ishikawa: MIDAS projection: markerless and modelless dynamic projection mapping for material representation; ACM Trans, vol 37, article 196 (2018.12)

[15] Gaku Narita, Yoshihiro Watanabe Masatoshi Ishikawa: Dynamic Projection Mapping onto Deforming Non-Rigid Surface Using Deformable Dot Cluster Marker; IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 23, 1235-1248 (2017.3)

[16] Shaoqing Ren, Xudong Cao, Yichen Wei, Jian Sun: Face Alignment at 3000 FPS via Regressing Local Binary Features; The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 1685-1692, (2014.6)

[17] Vahid Kazemi, Josephine Sullivan: One Millisecond Face Alignment with an Ensemble of Regression Trees; The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 1867-1874, (2014.6)

[18] INORI - PRAYER - Realtime Face-mapping, 2017. https://www.w0w.co.jp/portfolio/inori_prayer

[19] A. Grundhöfer, D. Iwai: Recent Advances in Projection Mapping Algorithms, Hardware and Applications; Computer Graphics Forum, 37, 653-675 (2018)

[20] Phong, Bui Tuong: Illumination for computer generated pictures; Communications of the ACM vol. 18, 311-317 (1975.6)

[21] DynaFlash v2 and Post Reality, 2018. http://www.vision.ict.e.titech.ac.jp/projects/dynaflashv2/index.html

© 2020 by the Virtual Reality Society of Japan (VRSJ)