Vol.2015-CG-161 No.26
Vol.2015-CVIM-199 No.26
2015/11/7

パッチタイリングを用いた法線推定による3次元顔形状復元

野沢 綸佐[1]　加藤 卓哉[1]　藤崎 匡裕[1]　サフキン パーベル[1]　森島 繁生[2,3]

概要：顔画像からの 3 次元顔形状復元は，セキュリティなどの分野で応用が期待される重要な研究課題である．復元手法は既にいくつか提案されているが，代表的な既存手法として顔の特徴点情報を用いるものがある．しかし，特徴点情報は疎な情報であるため，頬など特徴点が取れない領域では精度が悪くなる問題があった．そこで本手法では，輝度値と法線が密接な関係にあると仮定し，輝度値と法線を対応付けた小片画像 (以下パッチ) のデータベースを作成する．このデータベースを用いて，1 枚の入力正面顔画像の法線をパッチの再構成によって推定することで，3 次元顔形状の復元を行う．パッチという密な情報を用いて 3 次元顔形状の復元を行うため，従来手法と比較してより高精度な結果を得ることが可能となる．

1. はじめに

人間は，視覚情報などのみの情報から物体の形状認識を容易に行うことが可能である．一方，コンピューターなどに同様の作業をさせることは非常に困難である．人間が知覚可能な情報をコンピュータに認識させることで，人間の知覚メカニズムの解明や，ロボティクスにおける様々な情報の認識精度を向上させることができるため高い需要がある．このような背景から，コンピュータビジョンの研究においては，視覚情報に着目することで人間や動物が視覚から得られる情報を抽出することを大きな目標としている．とりわけ，2 次元画像から 3 次元形状を推定することは，物体の認識精度を向上させることに繋がる．そのため，様々な対象の 2 次元画像を 3 次元形状復元する研究は，同分野の最も重要とされる研究領域の一つである．

特に，2 次元顔画像からの 3 次元顔形状復元の研究は，顔認証に代表されるバイオメトリクス認証やアニメ・ゲームなどのエンタテインメントなどの分野において応用が期待されている [1], [2]．たとえば，犯罪捜査などでは，捜査対象者の情報が 2 次元顔画像に限られる場面が多々存在する．したがって，2 次元画像のみから本人の印象を保持した，高精度な 3 次元顔形状復元を行うことには，高い需要がある．以上の点を踏まえ本研究では，2 次元顔画像のみを入力とした 3 次元顔形状復元手法の提案を研究目的とする．

2 次元顔画像のみから得られる情報を用いて，3 次元顔形状復元手法はいくつか提案されている．その多くの手法では，目や口など画像中において際立って検出できる点 (以降，特徴点と呼ぶ) を検出し，データベースとマッチングさせるなどの処理を施すことで復元を行っている．この手法を用いることで，入力顔画像から尤もらしい 3 次元顔形状復元を行うことを実現した [5], [6], [7]．しかし，2 次元顔画像のみから得られる情報は，3D レンジスキャナなどの機材を直接用いて撮影する場合と比較して非常に少ないため，復元精度が劣っている．また，顔のように個人間で特有の凹凸形状を含むものを，特徴点のみで表現することは困難であり，高精度な 3 次元顔形状復元を行えないという問題があった．以上の点から，2 次元画像のみを入力とした場合でも，3D レンジスキャナなどの機材を用いた 3 次元顔形状復元の精度に匹敵するような，3 次元顔形状復元結果を得る手法が求められている．

そこで本研究では，矩形に切り分けた小片画像群 (以降，パッチ呼ぶ) を 3 次元顔形状復元に用いることで，復元精度を向上させるような手法の提案を行う．まず，複数人の顔形状データから構成される輝度画像と法線マップから，輝度画像パッチと法線マップパッチを切り分け，パッチから成るデータベースを構築する，次に，得られたパッチデータベースをもとに，入力顔画像をパッチ単位で再構成し，推定法線マップを作成する．最後に，得られた推定法線マップより最適化問題を解くことで，最終的な 3 次元顔形状復元結果を得る．本研究では，特徴点と比較し、より密な情報を持つパッチを用いて復元を行うため，従来手法では困難であった頬など細部にいたるまでの 3 次元顔形状復元を実現した．

1 早稲田大学
Waseda Uniersity
2 早稲田大学理工学術院総合研究所
Waseda Research Institute for Science and Engineering
3 JST CREST

© 2015 Information Processing Society of Japan

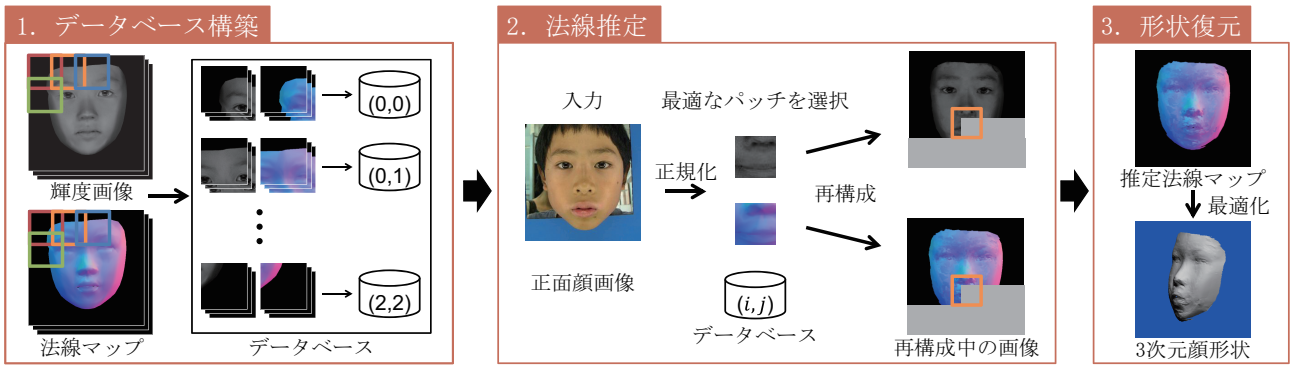

図 1 本研究の概要

2. 関連研究

2.1 特徴点を用いる 3 次元顔形状復元手法

2 次元顔画像のみを入力とし，3 次元顔形状復元を行う手法として代表的なものに，Blanz ら [5] の特徴点情報を用いる手法がある．この手法の手順としては，はじめに複数人の顔の 3 次元形状データから 3D Morphable Model(以降，3DMM と呼ぶ) と呼ばれる，形状とテクスチャ情報を有する顔モデルを構築する．次に，未知の人物の入力顔画像から特徴点を手動で入力する．最後に，その特徴点に対応する 3DMM 上の頂点，およびテクスチャ情報に含まれる RGB 値の差分が，最も小さくなるような最適化を行うことで，3DMM を特徴点群にフィッティングさせ 3 次元顔形状復元を行った．この手法では，特徴点を手動で入力することで，入力顔画像に対して尤もらしい 3 次元顔形状復元を実現した．

同様な手法として，前島ら [6] の手法が挙げられる．前島らは，特徴点検出を手動ではなく自動で行い顔変形モデルをフィッティングさせることで，正面顔画像から 3 次元顔モデルを構築する手法を提案した．この手法では，特徴点検出を自動で行うため，Blanz らの手法と比べ高速な 3 次元顔形状復元を実現している．

また，Zhu[7] らは，3DMM を特徴点群に対しフィッティングを行った後，SIFT 特徴量を用いてより密に特徴点間の対応をとる手法を提案した．この手法により，既存手法と比較して目や口などの部分において，より個人の特徴を反映した 3 次元顔形状復元を実現した．

以上に示した 3 つの手法では，いずれも入力顔画像から特徴点を抽出し，その情報をもとに 3 次元顔形状復元を実現した．しかし，いずれの手法も，頬など特徴点の分布が疎な領域では，個人の特徴を反映した 3 次元顔形状復元を行うことが難しい問題があった．

2.2 陰影情報を用いる 3 次元顔形状復元手法

特徴点情報を用いる手法以外で，2 次元顔画像のみの入力から 3 次元顔形状復元を行う手法としては，Kemelmacher ら [8] に代表される陰影情報を用いる手法が挙げられる．Kemelmacher らは，入力顔画像中の陰影情報から Shape-from-Shading(以降，SfS と呼ぶ) を顔に適用し，3 次元顔形状復元を行った．ここで，SfS とは物体表面をランバート面と仮定することで陰影情報 (輝度値) から法線を推定し，得られた法線に対し最適な面を計算することで，3 次元形状復元を行う技術である．この手法では，SfS によって画素単位で密な法線推定を行うことが可能であるため，データベースを用いず，細部の 3 次元顔形状まで復元することができる．しかし，本来部位により質感が異な半透明物質である顔に対してランバート面を仮定し，反射率に関しても平均顔に似ていると仮定しているため，平均顔から離れている人ほど精度が悪くなる問題があった．

2.3 パッチタイリングを用いる 3 次元顔形状復元手法

最後に，顔画像のみの入力から 3 次元顔形状復元を行う手法としてパッチタイリング [9] を用いる手法が挙げられる．パッチタイリングとは，複数人の顔画像をパッチに切り分けパッチデータベースを構築し，入力となる大域制約画像をもとにテクスチャ情報が最も類似するパッチを選択し，パッチ単位で再構成することで新たに尤もらしい顔画像を生成する画像合成手法である．郷原ら [10] は，このパッチタイリングを用いて入力顔画像のデプス情報を推定する手法を提案した．まずこの手法では，顔においてテクスチャ情報 (見え) が似ていればその形状も似ているという仮定のもと，テクスチャ情報にに対応したデプス情報のパッチデータベースを構築する．次に，パッチタイリングより新たに尤もらしい入力顔画像を生成する処理と同時に，対応するデプスパッチを再構成させることで，入力画像のデプスマップを推定し 3 次元顔形状復元を行った．この手法では，特徴点検出を必要とせず，入力画像とデータベースとの間でパッチという密な対応をとり，3 次元顔形状を推定することができる．しかし，仮定として用いている，テクスチャ情報とデプス情報の相関関係が不明瞭であり，精度が悪い問題があった．

© 2015 Information Processing Society of Japan

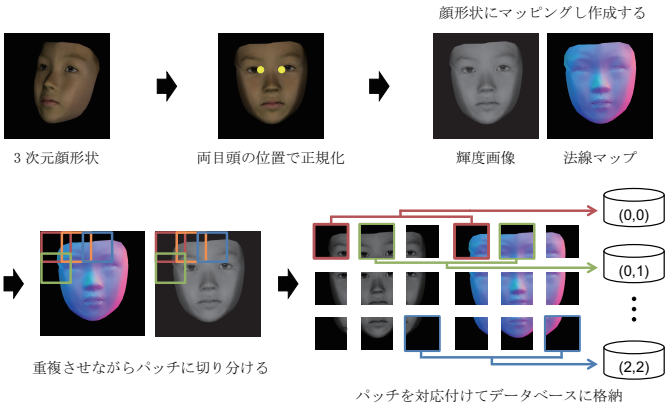

図 2　データベース構築

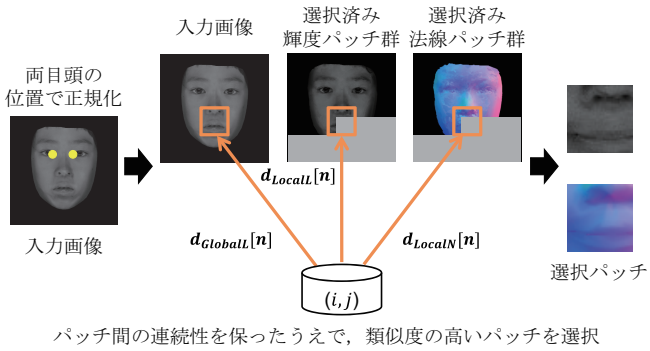

図 3　パッチタイリング

2.4　本手法のアプローチ

以上の点を踏まえ本研究では，顔において疎な情報である特徴点を用いるのではなく，密に取得可能な画像の輝度値を用いる手法を提案する．輝度値に着目しているものとして，Hertzmann ら [11] の手法が挙げられる．Hertzmann らは，同じ材質でできた物体間において同一光源下では，輝度値とその部分の法線の間に相関関係が成り立つと仮定した．この仮定を用いて，3 次元形状復元の対象である物体と，対象物体と同じ材質でできた球などの法線が既知の参照物体との間で，輝度値の対応付けを行い，復元対象物体の法線を推定し 3 次元形状復元を行う手法を提案した．本研究では，Hertzmann らの仮定が顔の皮膚のように，大まかには同じ特性を持つようなものでも成り立つと考え，顔においては「輝度値と法線はより密接な関係にある」という仮定を新たに用いる．この仮定をもとに，郷原らとは異なり，輝度値と法線情報を対応付けたパッチデータベースを新たに構築する．次に，構築したデータベースをもとにパッチタイリングを行うことで法線マップを推定する．最後に，得られた推定法線マップをもとに最適化問題を解くことで 3 次元顔形状を復元する手法を提案する．本手法では，疎な特徴点情報を用いずにより密なパッチ単位で推定を行うため，特徴点情報を用いる手法と比較して，より個人の特徴を反映した 3 次元顔形状復元を行うことが可能となる．また，様々な条件下におけるビックデータを収集し，データベース構築することができれば，Kemelmacher らの手法では 3 次元顔形状復元を行うことが困難であった，個人の特徴が強く表れた 2 次元入力顔画像においてでも，復元を行うことができる．

3.　研究概要

本章では，提案手法の概要について述べる．本研究では，1 枚の正面顔画像を入力とし，あらかじめ構築しておいたパッチデータベースを用いてパッチタイリングを行うことで，法線マップの推定を行い，推定法線マップをもとに形状復元を行う．より具体的な本手法の手順としては，図 2 に示すように，複数人の輝度パッチと法線マップパッチからなるパッチデータベースを事前に準備する「データベース構築」と，パッチタイリングを用いた入力顔画像の「法線推定」と，推定法線マップから形状を復元を行う「形状復元」の大きく 3 つの手順からなる．以下，それぞれの手順に対し，順を追って詳細を記述する．

4.　データベース構築

本章では，輝度画像パッチと法線マップパッチのデータベースを構築する手順について記述する．データベースを構築の概要を図 2 に示す．

まず，3D レンジスキャナなどの 3 次元計測器を用いて，あらかじめ複数人の 3 次元顔形状とテクスチャ画像を取得する．その後，取得したそれぞれの 3 次元顔形状の両目頭の位置を合わせることで顔の位置，向き，スケールの正規化を行う．一般的に人間の目，鼻や口といった各顔パーツの配置は，人物間において大きなばらつきは少ないと考えられる．また，後述の周辺探索を施すことで，多少の位置のずれは修正されるため，本手法では両目頭の位置を合わせるのみの正規化で十分である．次に，それぞれの正規化済み 3 次元顔形状に対応するテクスチャ画像を，3 次元顔形状にマッピングし輝度画像を作成する．この際，肌の色の個人差を極力少なくするために，輝度画像としてはグレースケール画像を用いる．同様に，それぞれの正規化済み 3 次元顔形状の法線情報を用いて法線マップを作成する．ここで法線マップは，法線の x 成分を RGB 値の R 値へ，y 成分を G 値へ，z 成分を B 値へとそのまま代入することで色付けを行っている．最後に，得られた輝度画像と法線マップを左上から順に重複させながらパッチに切り分け，それぞれの輝度画像パッチと法線マップパッチを位置によって対応付けしデータベースを構築する．

5.　法線推定

本章では，パッチタイリングを用いて法線マップを推定する手順について記述する．法線推定の概要を図 3 に示す．ここで，(i,j) とは画素値の座標を，n とは位置 (i,j) に対応するデータベースの，n 番目の人物のデータパッチ

であることを示している．本手法では，図 3 に示すように，正規化済み入力正面顔画像に対し，ラスタ順に左上の位置 $(0,0)$ からパッチを選択していき，右下の位置まですべてのパッチが選択することで法線マップの推定を行う．位置 (i,j) の場合における，パッチ選択の手順の詳細を以下に記述する．

(1) 入力となる正面顔画像を，データベース構築と同様に両目頭の位置を合わせることで正規化を行う．
(2) 入力画像の位置 (i,j) に対応するパッチ $P_{Input}(i,j)$ と，位置 (i,j) のデータベース中のすべての輝度画像パッチ $P_{DataL}(i,j)[n]$，法線マップパッチ $P_{DataN}(i,j)[n]$ との類似度を評価関数 E_n を用いて求める．この時，より最適なパッチの選択を行うために，周辺位置のデータベースも同様に評価対象へと加える．
(3) 評価関数 E_n より類似度が最も高いと判断された輝度画像パッチ $P_{DataL}(i,j)[n]$ と，対応する法線マップパッチ $P_{DataN}(i,j)[n]$ を位置 (i,j) へ，タイリングすることで選択済み輝度画像パッチ群 $P_{SelectL}$ と，選択済み法線マップパッチ群 $P_{SelectN}$ を生成する．

左上から順にすべての位置 (i,j) に対しこの手順を繰り返すことで，データベースのパッチを用いて最も近いと推定される法線マップ $I_{EstimateN}$ を生成することができる．以下，評価関数 E_n と周辺探索に関してより具体的に示す．

5.1 評価関数 E_n

この節では，パッチ選択の際の評価方法について記述する．本研究では，n 番目のデータと比較するとき式 (1) に示すような，重み付け線形和からなる評価関数 E_n を用いる．

$$E_n = \alpha d_{GlobalL}[n] + \beta d_{LocalL}[n] + \gamma d_{LocalN}[n] \quad (1)$$

$$d_{GlobalL}[n] = \sum_{x,y} ||P_{Input}(i,j)\{x,y\} - P_{DataL}(i,j)[n]\{x,y\}|| \quad (2)$$

$$d_{LocalL}[n] = \sum_{X,Y} ||O_{SelectL}(i,j)\{X,Y\} - P_{DataL}(i,j)[n]\{X,Y\}|| \quad (3)$$

$$d_{LocalN}[n] = \sum_{X,Y} ||O_{SelectN}(i,j)\{X,Y\} - P_{DataN}(i,j)[n]\{X,Y\}|| \quad (4)$$

ここで，$d_{GlobalL}[n]$ は大域輝度類似度，$d_{LocalL}[n]$ は局所輝度類似度，$d_{LocalN}[n]$ は局所法線類似度を表す．また，

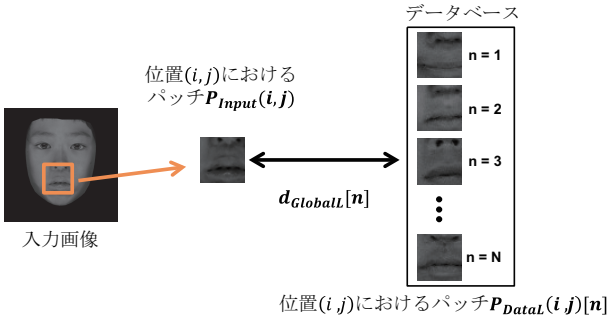

図 4 大域輝度類似度について

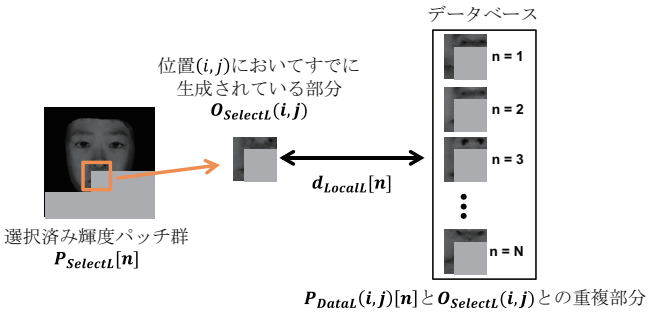

図 5 局所輝度類似度について

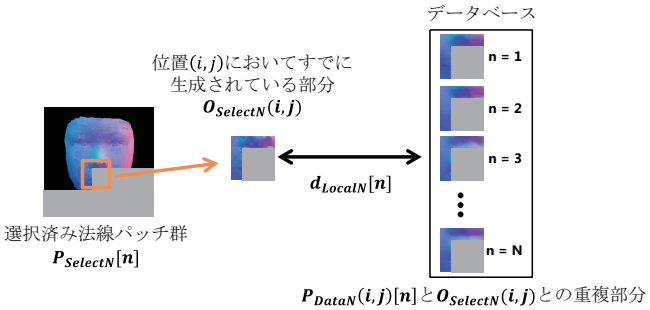

図 6 局所法線類似度について

α，β，γ はそれぞれ重み係数を表す．

大域輝度類似度 $d_{GlobalL}[n]$ とは，式 (2) に示すような二乗ノルムの式で表される．また，式 (2) 内のそれぞれの項は，図 4 に示されるように，入力画像の位置 (i,j) に対応するパッチ $P_{Input}(i,j)$ と，位置 (i,j) のデータベースにおける n 番目の人物の輝度画像パッチ $P_{DataL}(i,j)[n]$ との間におけるパッチ全体の輝度値類似度を表している．ここで $\{x,y\}$ はパッチ内の画素値の座標を，$[n]$ は比較しているデータの番号を示している．$d_{GlobalL}[n]$ を考慮することにより，$P_{Input}(i,j)$ に最も見えが近いような輝度画像パッチ $P_{DataL}(i,j)[n]$ を選択することが可能となる．

局所輝度類似度 $d_{LocalL}[n]$ とは，式 (3) に示すような二乗ノルムの式で表される．また，式 (3) 内のそれぞれの項は，図 5 に示されるように，選択済み輝度画像パッチ群 $P_{SelectL}$ の位置 (i,j) に対応するパッチにおいて，前回までの操作によりすでに生成されている重複部分 $O_{SelectL}(i,j)$ と，位置 (i,j) のデータベースにおける n 番目の人物の輝度画像パッチ $P_{DataL}(i,j)[n]$ との間におけるパッチの重複部分の

対応する位置から同心円状にずらした位置のデータベースも参照する

図 7 周辺探索

輝度値類似度を表したものである．ここで $\{X, Y\}$ はパッチ内の重複部分の画素値の座標を示している．$d_{LocalL}[n]$ を考慮することにより，パッチ間における輝度値の連続性を保つような輝度画像パッチ $P_{DataL}(i,j)[n]$ を選択することが可能となる．

局所法線類似度 $d_{LocalN}[n]$ とは，式（4）に示すような二乗ノルムの式で表される．また，式 (4) 内のそれぞれの項は，図 6 に示されるように，選択済み輝度画像パッチ群 $P_{SelectN}$ の位置 (i,j) に対応するパッチにおいて，前回までの操作によりすでに生成されている重複部分 $O_{SelectN}(i,j)$ と，位置 (i,j) のデータベースにおける n 番目の人物の法線マップパッチ $P_{DataN}(i,j)[n]$ との間におけるパッチの重複部分の法線類似度を表したものである．$d_{LocalN}[n]$ を評価することにより，パッチ間における法線マップの連続性を保つような $P_{DataN}(i,j)[n]$ を選択することが可能となる．

5.2 周辺探索

この節では，パッチ選択の際の周辺探索について記述する．5 章法線推定の手順 (2) で記述したように，本研究では周辺位置のデータベースも評価の対象としている．この理由としては，本手法における正規化のみを施した場合では，図 7 に示すように，各パーツの配置は各個人によって微妙に異なってしまうケースが存在するためである．そこで本研究では，より正確なパッチ選択を行う事ができるようパッチタイリングの際に，周辺探索アルゴリズムを用いている．具体的には，位置 (i,j) におけるパッチ選択を行う際，参照するデータベースを位置 (i,j) のものだけではなく，同心円上に 1[Pixel] ずつ位置をずらしたデータベースまで，最適なパッチ探索を行うというアルゴリズムを用いている．周辺探索を用いることで，入力顔画像と，それぞれのデータベース上の画像との間の，多少の位置のずれは修正することが可能となる．

6. 形状復元

この節では，得られた推定法線マップより，3 次元顔形状を復元する方法について記述する．3 次元形状の推定方法としては，ある点における推定法線の傾きと，推定される面の傾きの誤差が最少になるように計算をすることで，3 次元座標を得ることができる．以下，詳しく記述する．推定面上のある点を $(x, y, Z(x,y))$ とする．法線ベクトル $n = n(x,y,z)$ とは，任意の 2 つの接線ベクトルの外積で与えられる 3 次元ベクトルであることから，$n(x,y,z) = (p, q, -1)$ と表される．ここで p, q は推定面上の z 座標である $Z(x,y)$ の x, y 方向のそれぞれの傾きを示しており，

$$p = \frac{\partial Z(x,y)}{\partial x} \approx Z(x+1,y) - Z(x,y) \tag{5}$$

$$q = \frac{\partial Z(x,y)}{\partial y} \approx Z(x,y+1) - Z(x,y) \tag{6}$$

と表される．以上より，正規化を施した面の法線ベクトル $n(n_x, n_y, n_z)$ は，

$$n(n_x, n_y, n_z) = \frac{1}{\sqrt{p^2+q^2+1}}(p, q, -1) \tag{7}$$

と表すことができる．また，式 (7) より p, q は面の法線ベクトル $n(n_x, n_y, n_z)$ を用いて，

$$p = -\frac{n_x}{n_z} \tag{8}$$

$$q = -\frac{n_y}{n_z} \tag{9}$$

とも表すことができる．以上の関係から，式 (5)，式 (6) に示される推定面の傾きと，式 (8)，式 (9) に示される推定法線マップから得られる面の傾きの関係から，式 (10) に示されるような最適化問題を定義することができる．

$$E(Z(x,y)) = \left(Z(x+1,y) - Z(x,y) + \frac{n_x}{n_z}\right)^2 + \left(Z(x,y+1) - Z(x,y) + \frac{n_y}{n_z}\right)^2 \tag{10}$$

この式 (10) に示される，二乗誤差の最適化問題 $E(Z(x,y))$ を解くことによって，面 $Z(x,y)$ を推定することができる．

7. 生成結果と評価

今回，成人男性 10 人分の輝度画像と法線マップ (画像サイズ:540×540[Pixel]) を用いて，輝度画像パッチと法線マップパッチ (パッチサイズ : 5×5[Pixel]，重複部分 : 4[Pixel]) のデータベースを構築した．また，入力顔画像は，データベースに存在しない正面顔画像 (画像サイズ:540 × 540[Pixel]) を用いた．以上の入力顔画像に対し，3 次元顔形状復元を行うオープンテストを行った．なお今回の実験では，パッチ 2 枚分に相当する 10[Pixel] 先まで同心円状に周辺探索を行った．

復元結果の精度評価としては，得られた推定 3 次元顔形状と，あらかじめ 3D レンジスキャナで取得しておいた正解形状との誤差を，画素単位で計算し誤差マップと平均誤差を作成した．同様に，特徴点を用いた手法の 1 つである，前島ら [6] の手法で生成した結果においても，誤差マップと平均誤差を作成した．

© 2015 Information Processing Society of Japan

得られた出力のうち，本手法における誤差が最も小さかった場合と，最も大きかった場合の結果は図 8，図 9 に示すようになった．図 8，図 9 の誤差マップより，既存手法と比較して，精度の向上が実現できていることが確認できる．また，本手法では頬や鼻先といった顔の部位の表現に関しても，より個人の特徴を反映した 3 次元顔形状復元が可能となっていることが分かる．

8. まとめと今後の課題

本研究では，輝度値と法線情報はより密接な関係にあるという仮定の下，パッチタイリングを用いた法線推定を行い，3 次元顔形状復元を行う手法を提案した．これにより，特徴点という疎な情報を用いる場合と比較して，より個人の特徴を反映した表現を実現した．以上の点から，本手法は，正面顔画像 1 枚のみの入力から，精度の高い 3 次元顔形状復元を行うことができるため，入力となる情報が 2 次元の写真のみである，犯罪捜査の場面などで応用することが可能である．

今後の課題としては以下のことを行う予定である．まず，図 8，図 9 からもわかるように，現在の誤差分布を見ると，ある一定の部分に誤差が集中していることがわかる．これは，パッチの選択順番がラスタ順であることが下人である可能性が高いため，選択順に依存しないようなパッチ選択方法等を検討し，さらなる精度の向上を図る．

次に，今回の実験で用いたデータベースは，661 頂点からなる 3 次元顔モデルを用いて構成されている．しかし，661 頂点では細部まで表現するためには不十分であるため，さらに頂点数の多いモデルを用いてデータベースの構築を行い，さらなる精度の向上を行う．

最後に，今回の実験では，入力画像，データベース中の画像ともにレンダリングソフト上で作成したシミュレーション上の画像を用いている．そこで，今後は実写真を用いたもので 3 次元顔形状複復元を行い，手法の有用性を確立していく必要がある．

謝辞　大変お忙しい中，本研究を進めるにあたり生じた私のつたない数々の相談に対し，いつも耳を傾けて頂き，ご丁寧に指導していただいた研究室 OB の桑原大樹氏に深く感謝申し上げます．

参考文献

[1] Morishima, S.: *""Dive into the Movie" Project to realize an immersive experience in the story"*, IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, Special Section on Human Communication III, Vol.80, No.2, pp.189-210 (2008).

[2] Jones, A. et al.: *"An automultiscopic projector array for interactive digital humans"*, ACM SIGGRAPH 2015 Emerging Technologies, pp.6 (2015).

[3] Choi, J. et al.: *"3d face reconstruction using a single or multiple views"*, In ICPR, pp.39593962 (2010).

[4] 菅谷佳子, 安藤慎吾, 鈴木章, 小池秀樹.: "単眼カメラからの三次元顔モデル構築方法に関する検討", 電子情報通信学会信学技報, MVE2009-35, pp.710 (2009).

[5] Blanz, V., and Vetter, T.: *"A morphable model for the synthesis of 3D-faces"*, Proc. of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp.187-194 (1999).

[6] 前島謙宣, 森島繁生.: "顔変形モデルと顔形状分布制約に基づく単一画像からの 3 次元顔モデル高速生成", 画像の認識・理解シンポジウム MIRU(2010).

[7] Zhu, X., and Yi, D., and Lei, Z., and Li, Z.: *"Robust 3D Morphable Model Fitting by Sparse SIFT Flow"*, In ICPR, pp.4044-4049 (2014).

[8] Kemelmacher-Shlizerman, I., and Basri, R.: *"3d face reconstruction from a single image using a single reference face shape"*, Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, Vol.33, No.8, pp.394-405 (2011).

[9] Mohammed, U., Prince, S. J. D., and Kautz, J.: *"Visiolization:Genarating Novel Facial Images"*, Proc. ACM SIGGRAPH 2009, No.57 (2009).

[10] 郷原裕明, 前島謙宣, 森島繁生.: "テクスチャ-デプスパッチタイリングに基づく正面顔画像からの 3 次元形状推定", 情報処理学会研究報告 コンピュータビジョンとイメージメディア, 2011-20 (2011).

[11] Hertzmann, A., and Seitz, S. M.: *"Example-Based Photometric Stereo:Shape Reconstruction with General, Varying BRDFs"*, Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, Vol.27, No.8, pp.1254-1264 (2005).

© 2015 Information Processing Society of Japan

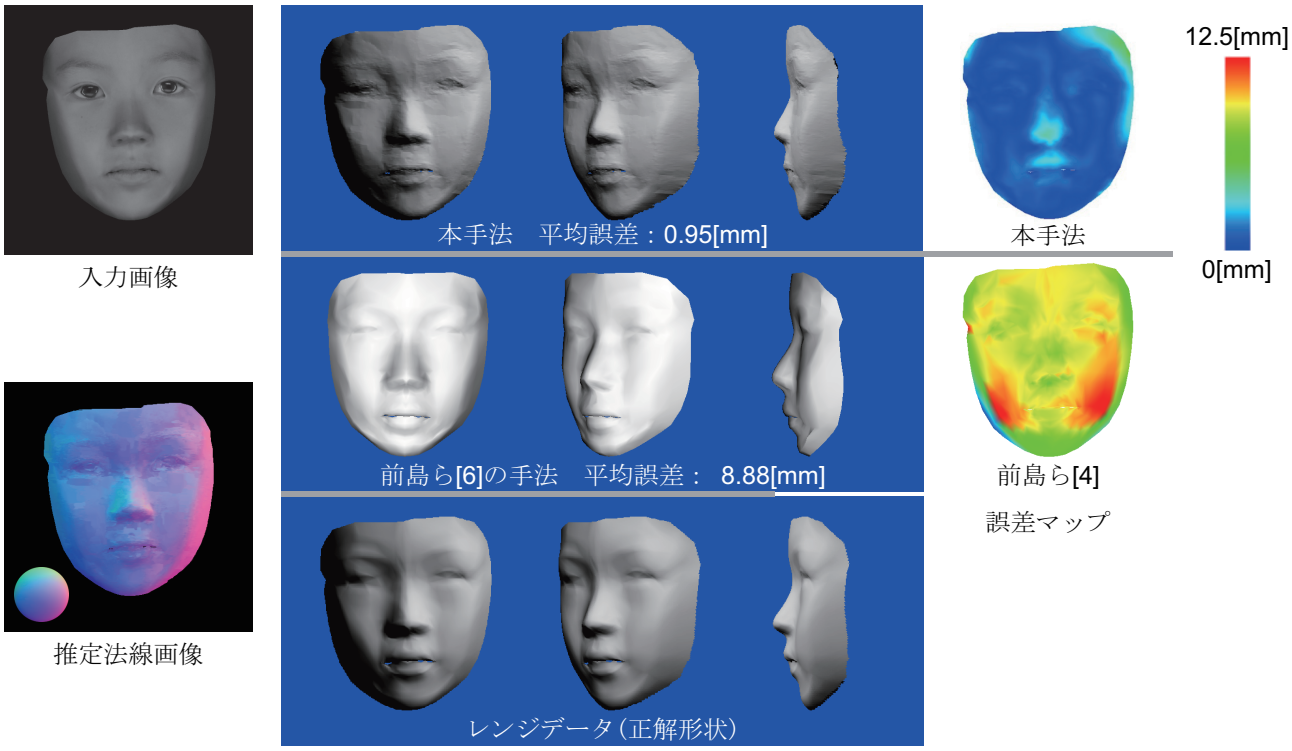

図 8　最も誤差の小さい結果

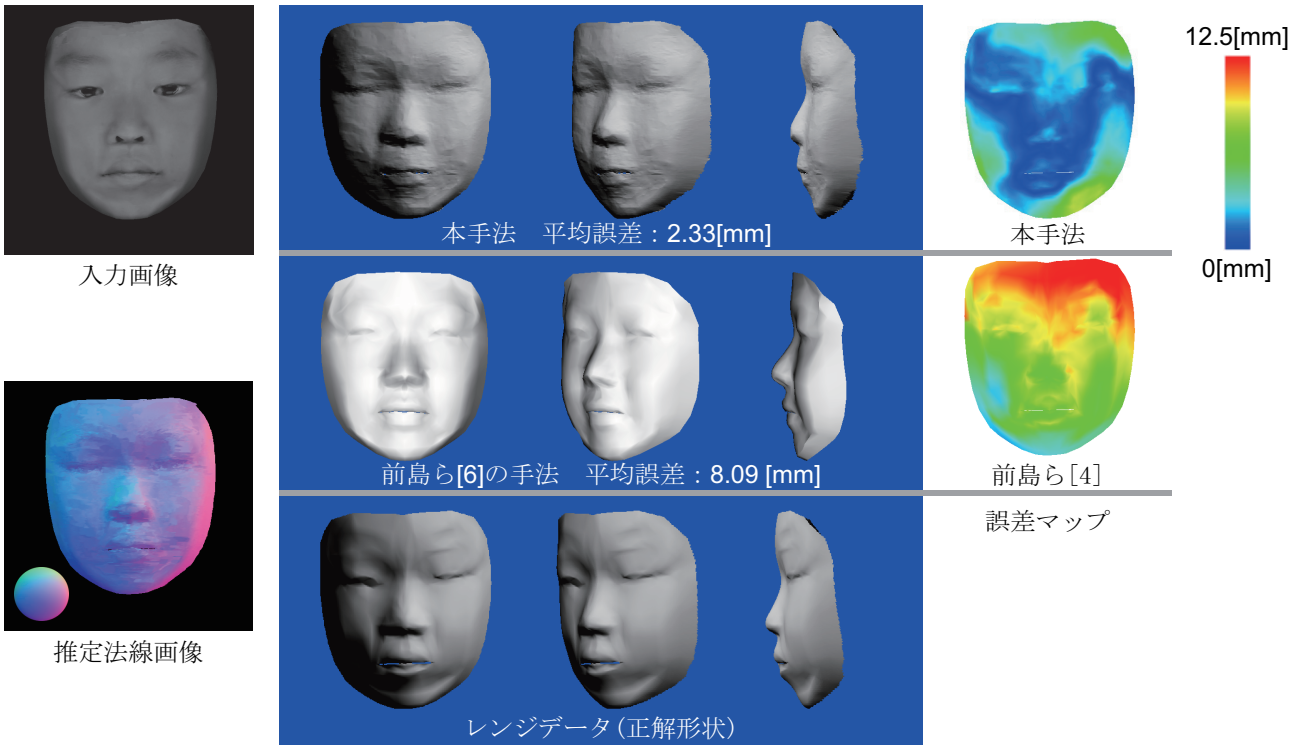

図 9　最も誤差の大きい結果

© 2015 Information Processing Society of Japan