

回折格子レーザによる能動型 3 次元計測を用いた幾何補正手法と掌紋認証への応用

Geometric Correction Method Using Active 3D Measurement with Diffraction Grating Laser and Its Application to Palmprint Recognition

佐藤 拓 杜[†], 青山 章一郎[†], 酒井 修 二[†],
遊 佐 秀 作[†], 正会員 伊 藤 康 一[†], 正会員 青 木 孝 文[†]

Takuto Sato[†], Shoichiro Aoyama[†], Shuji Sakai[†], Shusaku Yusa[†], Koichi Ito[†] and Takafumi Aoki[†]

あらまし 非接触掌紋認証では、非接触・非拘束で手のひらを撮影するため、手のひらの位置・姿勢に対してロバストな掌紋認証アルゴリズムが必要である。照合に用いる関心領域の抽出時に、撮影した手のひらの位置・姿勢に合わせて画像を補正することができれば、従来の照合アルゴリズムを用いて認証を行うことが可能である。高速かつ高精度に画像補正を行うために、本論文では、回折格子レーザによる能動型 3 次元計測を用いた幾何補正手法を提案する。提案手法を用いて幾何補正を行うことで、手の傾きに対して認証性能を向上することが可能である。本論文では、画像のみを用いた幾何補正手法と提案手法を比較し、提案手法が精度と計算コストで優れていることを示す。

キーワード：回折格子レーザ，能動型 3 次元計測，幾何補正，バイオメトリクス，掌紋認証

1. ま え が き

生体認証（バイオメトリクス認証）は、個人の生体特徴を用いて認証を行うため、パスワードなどに代わる安全性の高い個人認証技術として注目されている¹⁾。従来の認証技術と比較して、忘れる心配がない、盗まれる心配がない、なりすましがされにくいという特長から、これまでに、指紋や顔などを使った認証技術が研究開発されている。さまざまな生体特徴の中でも、掌紋（手のひらのテクスチャパターン）は、非接触で手のひらを撮影することができ、さらに、指紋と同等の識別性能を有していることより、さまざまな認証アルゴリズムが提案されている^{2)~4)}。

掌紋は、手のひらの内側にあるテクスチャパターンであり、広い領域に主線・隆線・しわなどの多くの特徴が存在するため、識別性能が高いと言われている。また、手をカメラにかざすのみで手のひら画像を撮影することができるため、非接触、かつ、非拘束に認証することができることが最大の特長である。これまでに提案されている掌紋認証では、撮影した手のひら画像から照合に用いる掌紋領域を抽出する際に、Zhang らの手法⁵⁾ やそれを基本とした手法が用いられることが多い。この手法では、人差指-中指と薬指-小指のくぼみを基準点とすることで、位置・回転・大き

さを正規化した掌紋領域を抽出する。手のひら画像がカメラの正面で撮影されている場合は、画像間の変形が回転と拡大縮小のみとなる。そのため、二つの基準点を結ぶ線分の傾きと長さを用いて、画像間の変形をほぼ正規化することが可能である。一方で、非接触・非拘束で手のひらを撮影する場合は、撮影のたびに手のひらの位置・姿勢が変化するため、回転や拡大縮小のみでは近似することができないような射影的な変形が画像間に生じる。そのため、非接触掌紋認証では、掌紋領域を抽出する前に手のひらの位置・姿勢に合わせて画像を補正する処理が必要となる。

対象の位置・姿勢に合わせて画像を補正する処理として、コンピュータビジョンの分野では、幾何変形にロバストな Scale Invariant Feature Transform (SIFT)⁶⁾ を用いた対応付けに基づく画像間の幾何補正が広く利用されている。この手法では、SIFT により得られる画像間の対応関係から、射影変換やアフィン変換などのような画像間の変形モデルを推定し、画像間に生じている変形を補正する。手のひら画像間の幾何補正に SIFT に基づく手法を適用することで、登録画像と入力画像に生じている相対的な幾何変形を補正することができる。ただし、SIFT に基づく手法では、検出された特徴点が手のひらの一部分に集中してしまったり、対応点数が少なかつたりすると、手のひらの補正に適切な変換パラメータを推定できないことがある。一方で、非接触掌紋認証のための幾何補正手法が Methani らにより提案されている⁷⁾。この手法では、手の形状を利用し

2014年12月2日受付, 2015年4月22日再受付, 2015年6月26日採録
[†]東北大学 大学院情報科学研究科
 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05, TEL: 022-795-7169)

た絶対的な回転角度補正と、正規化相互相関 (Normalized Cross-Correlation: NCC) を用いた画像対応付けによる相対的な射影変換パラメータの推定によって画像間に生じている相対的な幾何変形を補正する。Methani らの手法では、手の形状に基づいて回転が補正されているが、領域ベースの画像マッチングである NCC を画像対応付けに用いるため、その他の変形に対してロバストにマッチングを行うことが難しい。また、上述した二つの画像処理に基づく手法では、安定した幾何補正を行うために、画像対応付けや変換パラメータ推定に要する計算コストが大きい問題がある。

以上の問題に対して、本論文では、簡便な能動型 3 次元計測システムを用いて手のひらの 3 次元形状を計測し、正面から撮影した画像を仮想的に生成することで、掌紋認証の性能を改善する手法を提案する。提案手法で用いる能動型 3 次元計測システムは、回折格子をレーザの照射口に取り付け、掌紋認証に使用するカメラの横にそれらを取り付けるだけで実現される。簡便なシステムではあるが、誤差 0.142mm での 3 次元計測が可能であることを基礎実験により確認している。提案手法は、格子パターンをレーザ回折光を手のひらに照射し、手のひら上でのパターンの写り方から手のひらの傾きを計測する。そして、計測された手のひらの傾きを用いて射影変換を補正することで、手のひらをカメラに対して正面から撮影した画像に変換する。以上により、手のひらとカメラの位置関係が固定されていなくても、カメラに対して手のひらが正対している画像を取得できる。最後に、照合アルゴリズムにより画像間の照合スコアを求めることで認証する。回折格子レーザによる能動型 3 次元計測を用いることで、掌紋画像の幾何補正に要する計算コストを大幅に削減するとともに、画像ベースの幾何補正手法に比べて手のひらの大きな傾きに対応することができるため、認証性能を向上することが可能である。

手のひらの 3 次元形状を利用した個人認証の先行研究として、Zhang らの手法がある⁸⁾。Zhang らは、パターン光投影を利用した能動型 3 次元計測を用いて手のひらの密な 3 次元形状を計測し、その形状情報を利用することで 2 次元画像に基づく掌紋認証と比較して高い認証性能を実現している。一方で、3 次元形状を計測するための装置を取りつける必要があるため、システムの規模が大きくなってしまい、利用できる場面が限定されてしまう問題がある。また、パターン光投影により形状計測を行うため、装置に手を固定する必要があり、非接触・非拘束で手のひらの情報を取得できるという掌紋認証の利便性や受容性を損なう問題もある。

本論文では、さまざまな角度に傾けた手のひら画像を用いた性能評価実験を通して、2 次元画像処理に基づく手法と比較して、提案手法が精度と計算コストの両面で優れていることを実証する。なお、提案手法の初期段階の検討は、筆者らにより文献⁹⁾で報告されている。本論文は、文献⁹⁾と比較して、提案手法を詳細に説明していること、2 次元

画像処理に基づく幾何補正手法と認証性能の比較を行ったこと、0° から 40° まで手のひらの傾きを変えたデータベースを新たに作成し、傾き角度に対する性能評価を行ったことが新しい点である。

2. 2 次元画像処理に基づく幾何補正手法

関連研究として、性能評価実験において提案手法と比較する 2 次元画像処理に基づく幾何補正手法について概説する。本論文では、(i) SIFT に基づく手法、および (ii) Methani らの手法⁷⁾ を従来手法として用いる。

2.1 SIFT に基づく手法

本手法は、コンピュータビジョンの分野でよく用いられている画像間の変形にロバストな局所特徴記述子である SIFT⁶⁾ を用いて画像間の幾何補正を行う。具体的には、SIFT を用いて登録画像と入力画像の間を対応付けし、得られた対応関係から画像間の射影変換パラメータを推定し、入力画像を幾何補正する。

まず、入力画像と登録画像のそれぞれから抽出した SIFT 特徴記述子を比較することで、画像間の対応点ペアを求める (図 1 (a))。次に、得られた対応関係には誤対応も含まれているため、RANdom SAmples Consensus (RANSAC)¹⁰⁾ に基づくロバスト推定により射影変換パラメータを高精度に推定する (図 1 (b))。一般に、RANSAC により射影変換パラメータを推定する際は、4 組の対応点ペアをランダムに選択する。本論文では手のひら画像に特化させるために、4 組の対応点ペアのうち 2 組を Zhang らの手法⁵⁾ で掌紋領域の抽出に使用するキーポイント (人差指-中指と薬指-小指のくぼみ、図 1 (a) と (b) の赤点) とし、残り 2 組をランダムで選択する。以上のように 4 組の対応点ペアを選択することで、パラメータ推定の精度を向上させる。そして、推定したパラメータから得られる射影変換により入力画像の幾何補正を行う (図 1 (c))。最後に、登録画像と幾何補正後の入力画像から、Zhang らの手法で掌紋領域を抽出し、照合アルゴリズムにより照合スコアを求める。

SIFT に基づく対応付けは、汎用性が高く、正確な特徴抽出ができれば、高精度に画像間を対応付けることができる。それぞれの画像から特徴点を検出する必要があるが、手のひら画像のように部分的にテクスチャの少ない画像では、検出した特徴点の座標に偏りが見られることがある。そのため、得られた対応点ペアが指や手の縁の付近に集中してしまい、推定された射影変換行列が必ずしも手のひらに対して最適ではないことがある。

2.2 Methani らの手法⁷⁾

本手法は、手の形状を考慮して画像の回転角度を補正し、NCC に基づく画像対応付けを用いて登録画像と入力画像の間を対応付けし、得られた対応関係から画像間の射影変換パラメータを推定し、入力画像を幾何補正する。

まず、手の形状を考慮した画像の回転角度補正について説明する。手のひら画像の手領域が 1 に、背景領域が 0 に

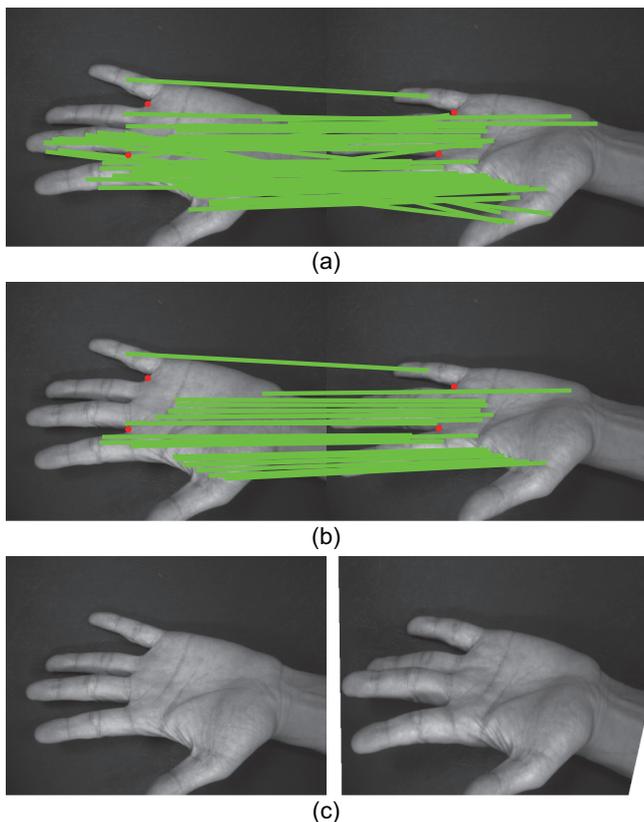


図 1 SIFT に基づく幾何補正 (左が登録画像, 右が入力画像): (a) SIFT による対応付け結果, (b) RANSAC による誤対応除去結果, (c) 登録画像と幾何補正後の入力画像

なるように画像を 2 値化し, 2 値化画像を主成分分析することで手領域の主軸を求める (図 2 (a)). 求めた主軸が画像の水平方向になるように入力画像の回転角度を補正する (図 2 (b)). 回転補正後の画像に対して Zhang らの手法⁵⁾ を用いて中指-薬指のくぼみを検出し, この点の座標を (x_v, y_v) とする. 本手法は, くぼみ (x_v, y_v) を基準として掌紋領域を抽出することになるが, 手の傾きが大きいと正確にくぼみを検出することができない. そこで, 本論文では, 本手法で正確に幾何補正を行うために, 手動でくぼみ (x_v, y_v) を与える. 続いて, Garg らの手法¹¹⁾ を用いて回転補正後の画像のエッジマップを作成する (図 2 (c)). くぼみ (x_v, y_v) を通る垂線を引き, 人差指の内側 (中指側) と小指の内側 (薬指側) の境界との交点 (x_v, y_i) および (x_v, y_l) を求める. それぞれの点 (x_v, y_i) および (x_v, y_l) から水平に直線を引き, 手首側でどちらか一方が初めて手領域の境界と交差する水平座標 x_w を求める. 最後に, エッジマップ上で (x_v, y_i) , (x_w, y_i) , (x_v, y_l) , (x_w, y_l) を頂点とする矩形領域を求め, その領域内のエッジ上に基準点を配置する (図 2 (d)). 回転角度補正および基準点の配置は, すべての画像において独立に行われる処理である.

次に, 画像間の対応関係から射影変換に基づいて入力画像を幾何補正する. 登録画像上に配置された基準点の 1 点の近傍から抽出した画像ブロックと, 入力画像上のすべての基準点の近傍画像ブロックの間で NCC を計算する. 最も

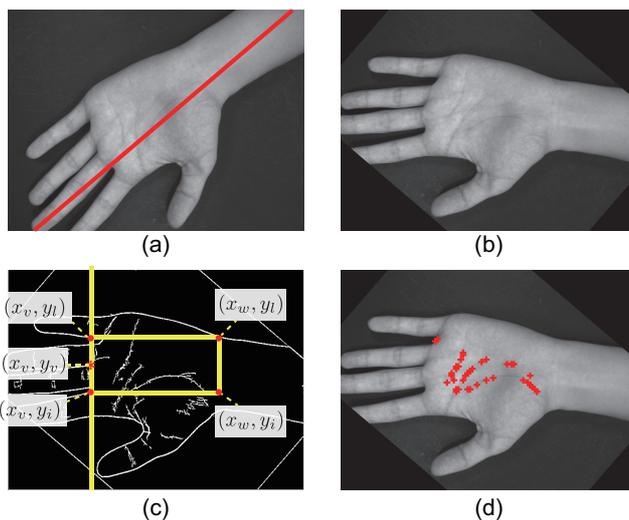


図 2 回転角度の補正と基準点の配置: (a) 原画像と検出した手領域の主軸, (b) 回転補正後の画像, (c) (b) から作成したエッジマップ, (d) 配置した基準点

相関値が高くなる入力画像の基準点を登録画像の基準点との対応点とする. 以上のような NCC の計算を登録画像上に配置したすべての基準点に対して行い, 登録画像と入力画像の間の対応関係を求める (図 3 (a)). 得られた対応関係には誤対応も含まれているため, 2.1 節と同様に RANSAC に基づくロバスト推定により射影変換パラメータを高精度に推定する (図 3 (b)). ここで, 2.1 節と同様に, RANSAC では, 推定に用いる 4 組の対応ペアのうち 2 組を Zhang らの手法⁵⁾ で掌紋領域の抽出に使用するキーポイント (人差指-中指と薬指-小指のくぼみ) とする. そして, 推定した射影行列で入力画像を補正する (図 3 (c)).

最後に, 回転補正後の登録画像および幾何補正後の入力画像から照合に使用する掌紋領域を抽出する. Methani らの手法では, 図 2 (c) のように, 基準点を配置する際に求めた登録画像の矩形領域を使用する. 掌紋認証においては, 一般的に Zhang らの手法⁵⁾ のように指の間のくぼみを使って掌紋領域を定義する. そこで, 本論文では, 比較のために, (i) Methani らの手法に基づいた掌紋領域抽出と (ii) Zhang らの手法に基づいた掌紋領域抽出の 2 通りを用いる.

Methani らの手法は, SIFT に基づく手法と比較して, 回転角度補正が独立に処理できるため, 処理時間が短い. ただし, 手のひらが傾いている状態で NCC で画像間を対応づけているため, 傾きが大きいと正確な対応付けが得られない問題がある. また, 2 次元画像処理に基づく幾何補正手法は, 登録画像と入力画像との対応付けにより幾何補正を行うため, 画像ペアが決まらなければ幾何補正を行うことができない.

3. 回折格子レーザ用いた能動型 3 次元計測

本論文で利用する, 回折格子レーザを用いた簡便な能動型 3 次元計測システムについて述べる. 回折格子を用いた

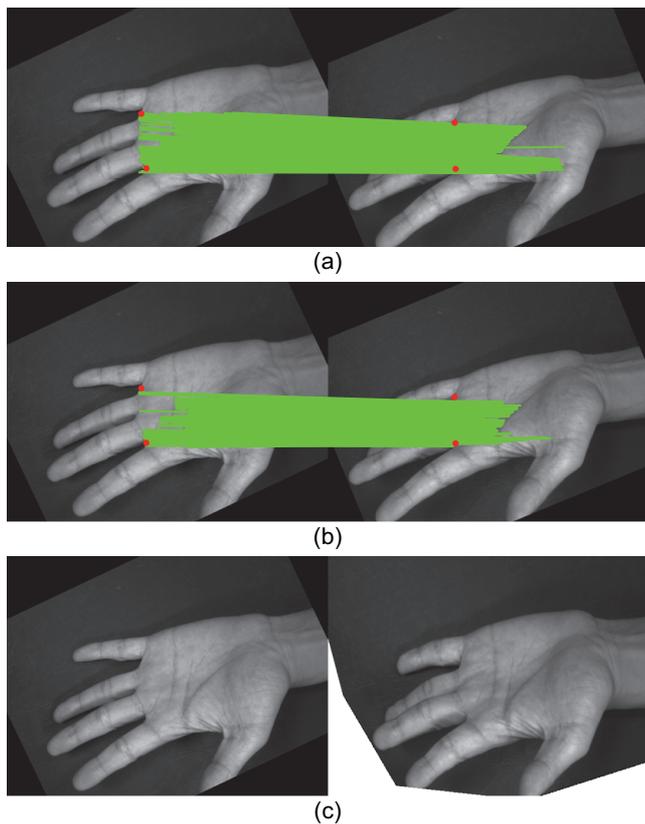


図 3 Methani らの手法による幾何補正 (左が登録画像, 右が入力画像である): (a) NCC に基づく対応付けの結果, (b) RANSAC による誤対応除去の結果, (c) 登録画像と幾何補正後の入力画像

3次元計測に関する先行研究として, 中沢らが提案しているファイバグレイティングを用いた3次元形状計測システムがある¹²⁾. 中沢らは, ファイバグレイティング, レーザ, カメラで小型な能動ステレオシステムを構築し, 計測精度・点数などにおける有効性を実証していた. 提案システムと比較すると, 3次元計測装置の原理は基本的に同等であるが, 3次元計測の処理は異なる. 大きな違いは, (i) 平行ステレオにおける計算式ではなく, より一般的な3次元計測の計算式を用いること, (ii) 投光系とカメラにおける各レーザ点の対応付けにエピポラ幾何を用いることである. 以下では, 提案システムの概要, 回折格子レーザを用いた3次元計測の手順, 精度評価について説明する.

3.1 システムの概要

回折格子レーザを用いた能動型3次元計測システムは, 図4に示すように, 回折格子とレーザ, およびカメラで構成される. 照射されたレーザ光は, レーザの照射口に固定された回折格子を通してパターン光となり, 計測対象に投影される. 回折格子パターンは自由に設計することができるが, 次節で説明する3次元計測の処理を簡単化するために, 本論文では7×5の等間隔な格子パターンを用いる. カメラとレーザを同期することで, 計測対象にパターン光を投影したタイミングと投影していないタイミングの2枚の画像を140fpsで撮影する. 連続する2枚の画像の差分

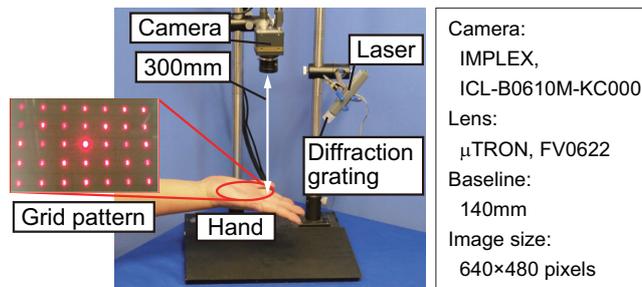


図4 回折格子レーザを用いた能動型3次元計測システムのプロトタイプ

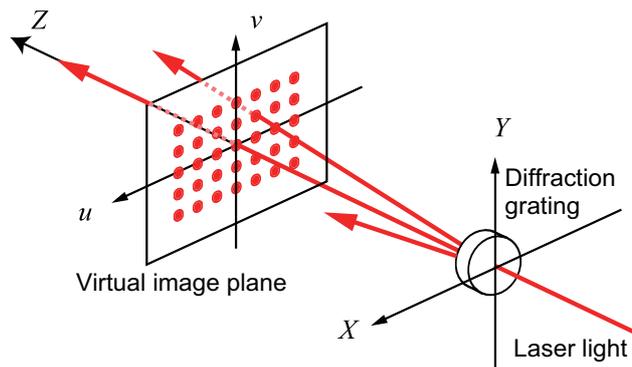


図5 レーザと回折格子を組合せた投光系と仮想画像平面の幾何関係

を調べるだけでパターン光を抽出することができる.

3.2 回折格子レーザによる3次元計測

提案システムを用いた3次元計測の原理について説明する. レーザとカメラ画像の間で3次元計測を行うために, 回折格子とレーザで構成される投光系に対し, 図5のように仮想画像平面とその座標系を設定する. 仮想画像平面は, 投光系をカメラと見なした場合の仮想的な結像面であり, レーザの照射口に正対した位置に設定される. 仮想画像平面のサイズは, カメラ画像のサイズと等しいとする. 仮想画像平面上をレーザ光が通り抜ける座標から, レーザ光の照射角が決定される. また, カメラ画像においても, カメラ画像上でレーザ光が投影された座標とカメラの内部パラメータから, 計測対象上のレーザ光がカメラ画像に投影される角度が決定される. 以上のように決定される二つの角度と, レーザとカメラの位置関係を用いることで, 三角測量の原理からレーザ光の3次元座標を計算する¹³⁾. 全レーザ点について上記の処理を行うことで, 計測対象の3次元形状を計測することができる. なお, カメラとレーザの内部・外部パラメータは, Zhangらの手法¹⁴⁾を用いてあらかじめ求めておく. 以下では, 3次元計測の具体的な手順について説明する. なお, 以下の説明では, 7×5の等間隔な格子パターンを用いることとする.

まず, 仮想画像平面上における各レーザ点の座標 $m_i = [u_i \ v_i]^T$ を設定する. i は, 各レーザ点のインデックス番号であり, 1から35の番号を重複しないように設定する. 仮想画像平面とレーザの照射口が正対しているため, 各レー

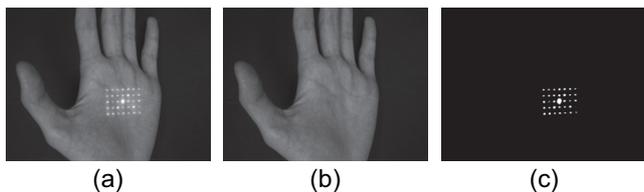


図 6 連続するフレームの差分を用いたレーザー点の抽出：(a) レーザが照射されているフレームで撮影された画像 I_t , (b) レーザが照射されていないフレームで撮影された画像 I_{t+1} , (c) (a) と (b) の差分の 2 値化画像 I_b

ザ点は、格子パターンの形状に対応した位置を通り抜ける。図 5 のように、格子パターンの中央点が仮想画像の画像中心と一致し、他のレーザー点の座標がその周囲に等間隔に並ぶ。本論文では、各レーザー点が 20 画素の間隔で並ぶように設定している。

次に、カメラ画像における各レーザー点の座標 $m'_i = [u'_i \ v'_i]^T$ を決定する。計測対象にレーザーが照射されているフレーム t で撮影された画像を I_t (図 6 (a)) とし、レーザーが照射されていない次のフレーム $t+1$ で撮影された画像を I_{t+1} (図 6 (b)) とする。 I_t と I_{t+1} の差分を求め、閾値処理により 2 値化画像 I_b (図 6 (c)) を得る。カメラとレーザーが 140fps で同期されているので、連続するフレームで計測対象がほぼ動いておらず、撮影環境にも変化がない。そのため、簡単な閾値処理を用いるだけで、図 6 (c) のようにレーザー点領域のみを抽出することができる。各レーザー点の領域の重心に対して、仮想画像平面のレーザー点 $m_i = [u_i \ v_i]^T$ に対応するエピポラ線上の 1 次元探索を行うことで、カメラ画像におけるレーザー点の座標 $m'_i = [u'_i \ v'_i]^T$ を決定する。以上の処理により、カメラ画像と仮想画像平面のレーザー点がインデックス番号 i で対応付けられる。

最後に、仮想画像平面のレーザー点座標 $m_i = [u_i \ v_i]^T$ とカメラ画像のレーザー点座標 $m'_i = [u'_i \ v'_i]^T$ 、レーザーとカメラの内部・外部パラメータから、三角測量の原理に基づき 3 次元計測を行う。レーザーとカメラの内部パラメータをそれぞれ A と A' とする。また、レーザーとカメラの外部パラメータをそれぞれ R と t 、および R' と t' とする。計測対象上のレーザー点の 3 次元座標 $M_i = [X_i \ Y_i \ Z_i]^T$ と、 $m_i = [u_i \ v_i]^T$ および $m'_i = [u'_i \ v'_i]^T$ の関係は、射影行列 $P = A[R|t]$ および $P' = A'[R'|t']$ を用いて、 $s\hat{m}_i = PM_i$ と $s\hat{m}'_i = P'M_i$ で表される。ただし、 \hat{M}_i 、 \hat{m}_i 、 \hat{m}'_i は、それぞれ M_i 、 m_i 、 m'_i の同次座標を表す。また、 s は、倍率を表す実数である。これらの式を \hat{M}_i について解き、次のように B_i および b_i を定義すると $B_i = M_i b_i$ が成り立つ。

$$B_i = \begin{bmatrix} u_i p_{31} - p_{11} & u_i p_{32} - p_{12} & u_i p_{33} - p_{13} \\ v_i p_{31} - p_{21} & v_i p_{32} - p_{22} & v_i p_{33} - p_{23} \\ u'_i p'_{31} - p'_{11} & u'_i p'_{32} - p'_{12} & u'_i p'_{33} - p'_{13} \\ v'_i p'_{31} - p'_{21} & v'_i p'_{32} - p'_{22} & v'_i p'_{33} - p'_{23} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$b_i = \begin{bmatrix} p_{14} - u_i p_{34} \\ p_{24} - v_i p_{34} \\ p'_{14} - u'_i p'_{34} \\ p'_{24} - v'_i p'_{34} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 p_{ij} と p'_{ij} は、それぞれ P と P' の i 行 j 列の要素である。以上の関係から、計測対象上のレーザー格子点の 3 次元座標 M_i は、次式で求められる。

$$M_i = B_i^+ b_i \quad (3)$$

ここで、 B_i^+ は B_i の擬似逆行列を表す。

3.3 3 次元計測精度の評価実験

本論文で提案する回折格子レーザーを用いた能動型 3 次元計測システムの計測精度を評価する。提案システムを用いて傾けたチェッカーボードの 3 次元計測を行い、正しく平面が計測できているかを調べる。カメラ画像上のチェッカーコーナー点座標から算出した平面の方程式を真値とし、真値と計測された 3 次元点群との誤差で計測精度を評価する。実験画像は、チェッカーボードの傾きを変えて撮影された 30 枚の画像を用いる。チェッカーボード画像 1 枚につき、レーザー点を 35 点計測するため、30 枚の画像で 1,050 点の 3 次元点を計測することになる。図 7 (a) は、チェッカーボード画像の 3 次元計測結果の例である。5 枚の画像はすべて傾きが異なっているが、提案システムにより平面が計測できていることが確認できる。図 7 (b) は、3 次元計測誤差のヒストグラムである。誤差は、負の値が大きいほどカメラに近い位置に計測されたことを表す。平均誤差が -0.040mm で、RMS 誤差が 0.142mm であった。これらの誤差は、VIVID 910 (KONICA MINOLTA 社) と同程度であり、提案システムが市販のレーザー計測装置に匹敵する精度を有することを示している。

4. 回折格子レーザーを用いた手のひら画像の幾何補正

提案する能動型 3 次元計測システムで手のひらの疎な 3 次元形状を計測し、それに基づいて幾何補正を行う手法について述べる。回折格子レーザーから手のひらに照射された 7×5 の等間隔な格子パターンを用いて、手のひら上の 35 点の 3 次元座標を得る。計測された 35 点の 3 次元座標に対して平面フィッティングを行い、手のひらの傾きを平面に近似して求める。近似平面の法線ベクトルを n とし、カメラと近似平面の距離を d とする。近似平面と正対し、かつ、距離 L だけ離れた位置に仮想的なカメラ (正面カメラ) を設定する。図 8 に実在カメラと正面カメラの関係を示す。実在カメラの画像から正面カメラの画像を生成することで、近似平面を仮想的に正面から撮影した画像とする。実在カメラと正面カメラの 3 次元空間上の位置関係を外部パラメータ R_{front} と t_{front} で表す。 R_{front} は、近似平面の法線ベクトル n と正面カメラの関係から決定される。仮想カメラ座標系において、 Z 軸方向の単位ベクトル z が $z = -n$ となるように、実在カメラ座標系を X 軸周り、お

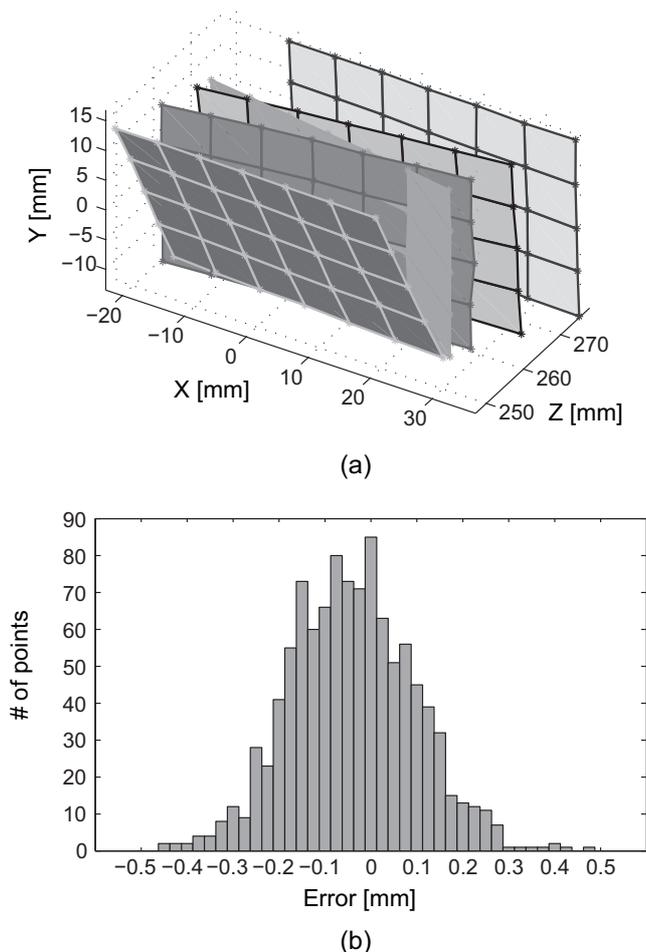


図 7 傾きが異なるチェッカーボードを用いた 3 次元計測精度の評価実験：(a) 計測結果の例，(b) 誤差のヒストグラム

よび Y 軸周りに回転する。 t_{front} は、实在カメラの位置と正面カメラの位置から決定される。また、正面カメラの内部パラメータは、实在カメラの内部パラメータと同じとする。このとき、3次元近似平面に対する实在カメラと正面カメラ間の画像変形は、射影変換 H_{front} で表すことができる¹⁵⁾。射影変換行列 H_{front} は、次式で与えられる。

$$H_{front} = A \left(R_{front} + \frac{t_{front} n^T}{d} \right) A^{-1} \quad (4)$$

射影変換行列 H_{front} を用いて实在カメラ画像を変換することで、正面カメラ画像を生成する (図 9)。この正面カメラ画像に対して Zhang らの手法⁵⁾ を適用することで、Z 軸周りの回転、拡大縮小率などを正規化して掌紋領域画像を抽出できる。

幾何補正手法を掌紋認証アルゴリズムに適用すると、図 10 のように組み込まれる。図 10 (a) に、画像ベースの従来手法のフローを示す。2.1 節で述べたような SIFT に基づく幾何補正手法は、登録画像を基準として入力画像を幾何補正する必要がある。そのため、あらかじめ登録画像の掌紋領域を抽出してデータベースに登録しておくことはできるが、照合する画像ペアが決まらなければ入力画像の幾何補正を行うことができない。2.2 節で述べた Methani らの手

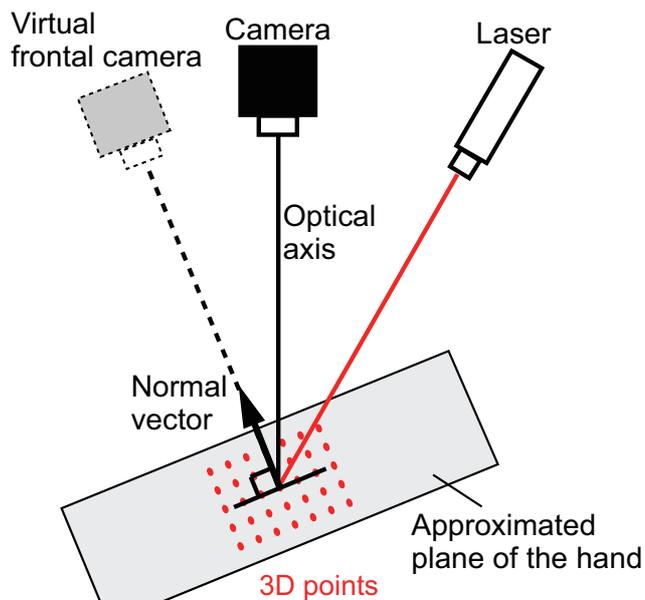


図 8 計測された 3 次元点群を用いた实在カメラ画像の幾何補正

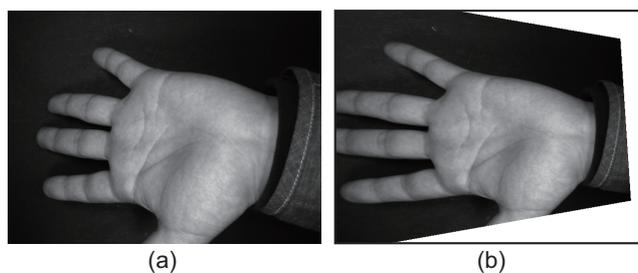


図 9 提案手法を用いた幾何補正の例：(a) 補正前の画像，(b) 補正後の画像

法は、手領域の主軸に基づく回転補正と掌紋領域抽出をそれぞれの画像に対して独立に行うことができる。回転補正された掌紋領域のみをデータベースに格納できるが、入力画像との間の変形を補正するために、NCC を用いて掌紋領域間を対応付ける必要がある。いずれの手法も、登録画像の掌紋領域をデータベースに登録することはできるが、照合する画像ペアが決まらなければ幾何補正を行うことができない。一方で、提案する幾何補正手法は、回折格子レーザを用いた 3 次元計測により計測された 3 次元点を用いて、仮想的な正面カメラ画像に補正するため、図 10 (b) のように、画像ごとに独立に適用することができる。そのため、登録画像に関しては、あらかじめ正面カメラ画像に補正することが可能であるとともに、入力画像に関しても 1 度だけ幾何補正を行えばよい。提案手法を用いることで、画像ペアごとに幾何補正を行う従来の画像ベースの幾何補正に比べると大幅な処理時間の短縮が実現できる。さらに、画像ベースの幾何補正の場合は、画像間の対応付け精度に幾何補正の精度が強く影響するのに対して、提案手法は、能動型 3 次元計測により正確な 3 次元点が得られるので、精度の面でもロバスト性の面でも画像ベースの手法よりも優

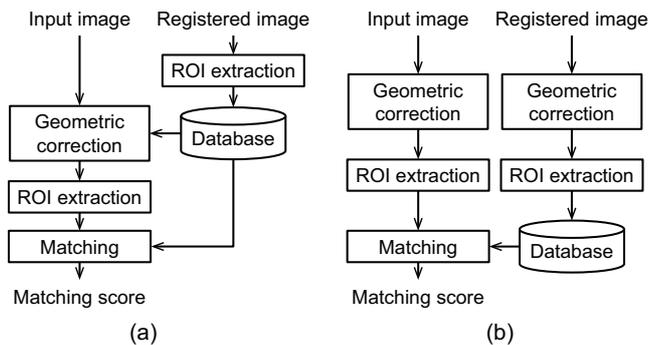


図 10 幾何補正手法を組み込んだ掌紋認証のフロー：(a) 画像ベースの従来手法の場合、(b) 提案手法の場合

れていることが期待される。

5. 性能評価実験と考察

提案する幾何補正手法を用いた掌紋認証の性能評価実験について述べる。従来手法として 2 節で説明した幾何補正手法との認証性能および処理時間の比較を行う。

5.1 認証性能の比較

本実験では、24 人の左右の手を 0° から 40° まで 10° 刻みで傾けて撮影して作成したデータベースを用いる。手の傾きに個人差が生じないように、図 11 に示す木片に手を置いて画像を撮影する。正面の場合は、図 12 (a) のような手の向きで、異なる 5 回のタイミングで撮影する。10° から 40° まで傾けた場合は、手の向きを図 12 (b)–(d) に示すように 3 通りに変化させて、それぞれの向きで異なる 3 回のタイミングで撮影する。3 通りの手の向きは、図 12 (b) に示すような回内の向き（手のひらを下に向けるように回転する向き）、図 12 (d) に示すような手を差し出す向き、図 12 (c) に示すような (b) と (d) の中間の向きであり、撮影の際にシステム利用者が取りやすい姿勢を想定している。作成したデータベースは、1 人当たりについて正面での 5 枚と 10°–40° での各 9 枚の合計 41 枚を左右の手に対して撮影するので、24 人分の合計 1,968 枚の画像で構成される。性能評価実験では、左右の手を異なる人物から撮影した画像とみなして、48 人 × 41 枚に対して 1 対 1 の認証性能を評価する。本実験では、左右いずれの手のひらを撮影した画像についても、幾何補正を行った後に抽出した関心領域画像を用いて照合を行う（上下反転等の処理を行わない）。幾何補正手法の傾き角度に対する有効性を評価するために、手のひらの傾き角度ごとのデータベース (Front, 10°, 20°, 30°, 40°), および、角度を混合したデータベース (mix) で実験を行う。傾き角度ごとのデータベースでの実験は、同じ角度で撮影したすべての画像から入力画像および登録画像を選択する。一方で、角度を混合したデータベースの実験では、24 人の左右の手のひらにおいて、正面から撮影した画像を 1 枚、10°–40° の角度で撮影した画像を各角度から 3 枚ずつ選択し、合計 624 枚の画像から入力画像および登録画像を選択する。なお、10°–40° の各角

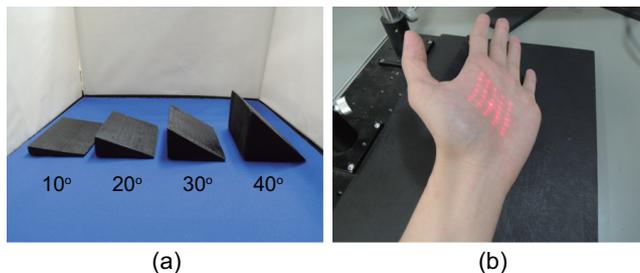


図 11 手のひら画像の撮影：(a) 手のひらを傾けるために使用した木片、(b) 撮影の様子

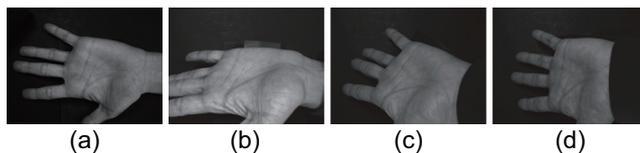


図 12 データベースに格納されている画像の例：(a) 正面（角度 0°）で撮影したときの手の向き、(b)–(d) 10° から 40° まで傾けたときの手の向き

Experiment	Genuine	Imposter
Front	480	28,200
10° ~ 40°	1,728	91,368
Mix	3,744	190,632

度から選択される 3 枚の画像は、3 通りに変化させた手の向きから 1 枚ずつ選択する。それぞれの実験条件における本人ペアおよび他人ペアの数を表 1 に示す。照合スコアの算出は、Competitive Code (CompCode)¹⁶⁾、Ordinal Code¹⁷⁾、POC¹⁸⁾ の三つの手法を用いる。それぞれの照合手法では、161 × 161 画素で抽出された掌紋領域を照合する。なお、Methani らの手法で抽出される掌紋領域の大きさが異なった場合は、手のひらの中心付近の 161 × 161 画素の領域を抽出して使用する。

図 13 に、それぞれの手法で幾何補正を行った画像の例を示す。従来手法は、登録画像と一致するように入力画像を幾何補正した。提案手法は、入力画像を正面カメラで撮影したように幾何補正した。Methani らの手法は、登録画像に近い画像に補正されているが、傾きが大きい場合の射影変換に誤差が含まれている。SIFT に基づく手法は、傾きが小さい時に正確に幾何補正できるが、傾きが 20° になると誤対応の数が多くなり始め、30° 以上になるとほとんどの画像で正確に補正できなくなる。一方で、提案手法は、傾きによらず、正面カメラから撮影されたような画像に補正されている。

表 2 に、それぞれの手法で抽出した掌紋領域画像で認証を行ったときの Equal Error Rate (EER) [%] を示す。Angle の各列は、手のひらの傾き角度ごとのデータベースに対する実験結果 (front, 10°–40°), および、角度を混合したデータベースに対する実験結果 (mix) を示す。Preprocessing の “w/o” は、幾何補正を適用していない画像から Zhang らの手法で抽出した掌紋領域画像を用いた場合を示

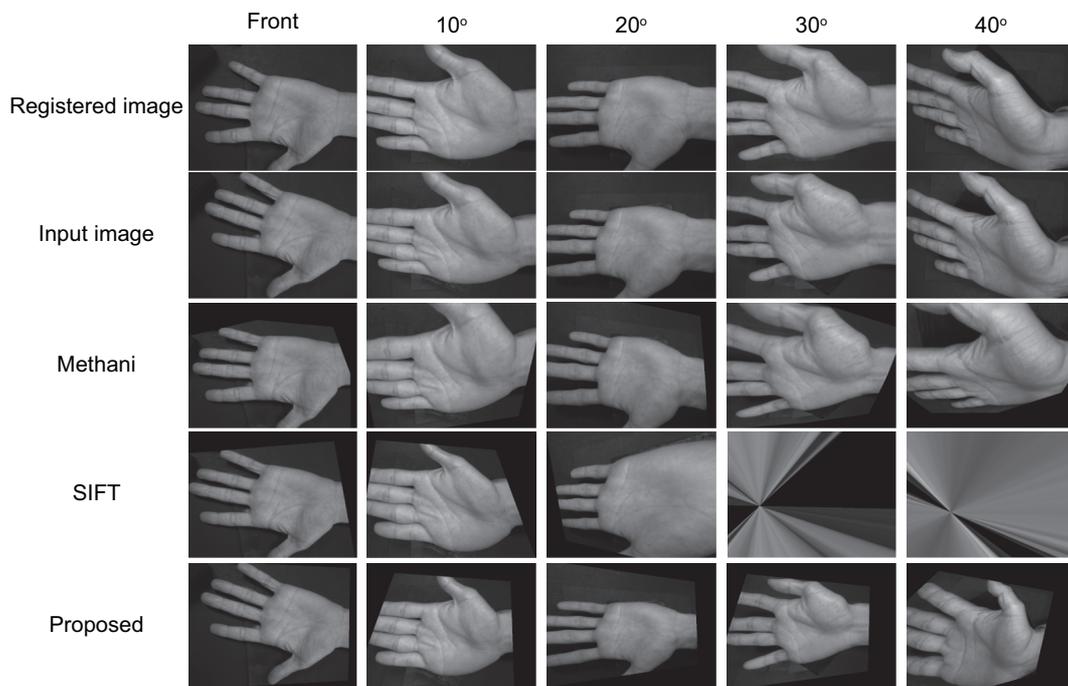


図 13 それぞれの手法で幾何補正を行った結果の例

表 2 各実験における EER [%]

Method		Angle					
Preprocessing	Matching	front	10	20	30	40	mix
w/o	CompCode	0.630	3.124	17.381	28.312	37.545	30.153
	Ordinal Code	0.400	3.293	17.653	27.681	36.605	29.035
	POC	0.221	2.252	11.784	24.916	36.898	28.272
Methani	CompCode	2.622	4.661	15.214	27.095	39.661	36.000
	Ordinal Code	2.553	4.837	15.366	27.099	39.685	36.257
	POC	2.643	3.921	14.830	26.551	40.203	35.919
Methani+Zhang	CompCode	3.630	6.761	17.723	31.463	43.783	38.308
	Ordinal Code	4.004	5.931	17.183	29.815	43.563	37.700
	POC	2.964	4.694	15.267	30.229	44.371	37.647
SIFT	CompCode	12.113	20.105	29.532	36.486	42.379	41.228
	Ordinal Code	10.758	18.696	29.498	36.691	41.483	40.858
	POC	10.854	18.095	28.750	35.883	42.151	40.795
Proposed	CompCode	0.607	2.224	6.585	8.753	21.727	14.117
	Ordinal Code	0.402	2.537	6.861	9.354	21.185	13.975
	POC	0.050	2.024	4.213	7.198	16.997	11.749

す。Methani らの手法で幾何補正と掌紋領域抽出を行う場合を“Methani”と、Methani らの手法で幾何補正を行い Zhang らの手法で掌紋領域を抽出する手法を“Methani + Zhang”と表記する。

表 2 において、SIFT に基づく手法と Methani らの手法は、ほぼすべての実験で EER を悪化させる結果となった。これは、本人ペアの対応付け結果に誤対応点ペアが多く含まれたり、そもそも対応付けができなかったりしたためである。SIFT に基づく手法では、特徴点が指やエッジ部分に集中して検出されることが原因として考えられる。本実験では、被験者に対して手のひらの傾きのみを固定しているため、手の開き方や指の曲げ方が画像ごとに異なる。そのため、図 14 (a) や (b) のように、手のひらではなく、指上に検出された特徴点同士で対応付けられてしまうと、正確に手のひらの射影変換行列を推定できなくなる。この影響は、指やエッジ部分に検出された特徴点を除外し、Methani

らの手法のように手のひら領域でのみ対応付けを行うことで低減できる可能性がある。本来対応付けたい手のひら領域では、指やエッジ部分と比較して、そもそも SIFT で検出される特徴点が少ない。そのため、幾何補正を行うために十分な数の対応点ペアが得られないことが多い。SIFT に基づく対応付けを手のひら画像の幾何補正に適用する場合は、検出範囲を手のひら領域に限定した上で、安定して特徴点を検出するための改良を加える必要がある。Methani らの手法では、以下に示す二つのことが主な原因としてあげられる。一つは、主線近傍の局所領域において異なった位置であっても似たようなパターンが見られることである。本論文では、文献⁷⁾と同様、NCC を計算する画像ブロックのサイズを 11 × 11 画素としている。このような小さい領域マッチングを行うと、主線近傍の位置が異なる領域であったとしても高い相関値を示す場合がある。正面から撮影した画像や手を 10° 傾けて撮影した画像では、一部の本

表 3 幾何補正の処理時間 [msec.]

SIFT		Methani		Proposed	
SIFT-based matching	2,905	Rotation correction	1,494	3D measurement	20
		Reference points placement	680		
		NCC-based matching	380		
Projection matrix estimation	2,780	Projection matrix estimation	760	Projection matrix estimation	1
Total	5,685	Total	3,334	Total	26

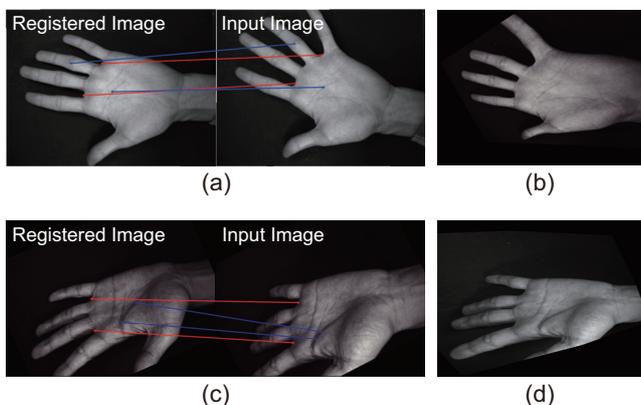


図 14 従来手法の失敗例 (赤線：指の間の対応関係，青線：画像対応付けにより得られた対応関係)：(a) SIFT の対応付け結果，(b) (a) のペアにおける幾何補正後の入力画像，(c) Methani らの手法で失敗した画像ペア，(d) (c) のペアにおける幾何補正後の入力画像

人ペアについて、これが原因で誤対応点ペアが増えてしまい、補正を行わない場合と比較して性能が低下した。もう一つは、NCC が画像間の平行移動以外の変形 (回転や射影変形など) にロバストではないことである。Methani らの手法では、高精度に幾何補正を行うために、NCC の値が小さい対応点ペアを排除している。手の傾きが大きくなるほど手のひらに加わる射影的な変形が大きくなるため、相関値が低くなってしまい、対応点ペアがほとんど得られなくなる。また、手領域の主軸を揃えることで画像間の回転を補正しているが、画像中における手首の曲がり具合によって主軸の傾きが大きく変化してしまうため、回転補正が不正確になる場合がある。このような場合は、上述したように NCC が画像の回転にロバストではないため、誤対応点ペアが増加してしまう。図 14 (c) および (d) に示したように、これらの影響によって正確な画像対応付けができず、射影変換行列の推定精度が低下してしまったために正確に幾何補正ができなかったと考えられる。

一方で、提案手法は、幾何補正なしの場合に比べて EER が改善されている。特に、手の傾きが 20° および 30° のときの改善が顕著である。傾き角度を混合した場合 (mix) の EER を比較しても、提案手法が最もよい結果であった。これは、手の傾きが大きくなったとしても、能動型 3 次元計測から得られた高精度な手のひらの 3 次元点を用いて正確に幾何補正を行うことが可能であることを示す。ただし、傾きが 40° になると EER が 20% を超える。これは、手のひら上のレーザ点が重なってしまっ

て正確に抽出できなくなる場合があることと、3 次元計測が正確にできたとしても、幾何補正による画素補間によってテクスチャ情報が少ないことが原因である。傾き角度を混合した場合 (mix) の EER が 10% を超えるのは、幾何補正が失敗しやすい 30° 以上の画像とのマッチング結果が影響したためである。

5.2 処理時間の比較

画像ベースの従来の幾何補正手法および提案手法の処理時間を比較する。画像ベースの従来手法は、5.1 節と同様に SIFT に基づく手法と Methani らの手法とし、登録画像と入力画像の 1 ペアに対する射影変換行列推定までの処理時間を計測する。一方で、提案手法は、1 枚の画像に対する射影変換行列推定までの処理時間を計測する。処理時間は、それぞれの手法を MATLAB で実装し、Intel Xeon X5690 (3.46GHz) を搭載した PC で評価する。ただし、SIFT に基づく手法では、画像対応付けのみ OpenCV¹⁹⁾ の C++ を用いる。表 3 に、それぞれの手法の処理時間を示す。ただし、SIFT に基づく手法および Methani らの手法は、RANSAC で 2,000 回の繰り返し処理を行ったときの結果である。実験結果より、提案する 3 次元計測に基づく手法は、2 次元画像処理のみに基づく手法と比較して、計算時間がきわめて短く、MATLAB での実装でも実時間での処理が可能である。

以上より、回折格子レーザを用いた能動型 3 次元計測システムを非接触掌紋認証に適用すると、回折格子レーザを取り付けるだけのシステムの改変、および少ない処理時間の増加で、手の大きな傾きに対するロバスト性が大幅に向上する。

6. む す び

本論文では、回折格子レーザを用いた簡便な能動型 3 次元計測システムを利用した非接触型掌紋認証における手のひら画像の幾何補正手法を提案した。従来の画像ベースの幾何補正手法では、そもそもの処理時間が長かったことと、画像ペアが決まらな

けるだけで、画像処理の負担を大幅に軽減することが可能である。今後は、疎な3次元計測によりシステム全体の性能改善が期待される部品検査システムやジェスチャ認識システムなどに適用することを検討している。

【文 献】

- 1) A.K. Jain, P. Flynn, and A.A. Ross, Handbook of Biometrics, Springer, (2008).
- 2) D. Zhang, Palmprint Authentication, Kluwer Academic Publication, (2004).
- 3) A. Kong, D. Zhang, and M. Kamel, "A survey of palmprint recognition," Pattern Recognition, **42**, 7, pp.1408-1418, (2009).
- 4) D. Zhang, W. Zuo, and F. Yue, "A comparative study of palmprint recognition algorithms," ACM Computing Surveys, **44**, 1, pp.2:1-2:37, (2012).
- 5) D. Zhang, W.-K. Kong, J. You, and M. Wong, "Online palmprint identification," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, **25**, 9, pp.1041-1050, (2003).
- 6) D. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," Int'l J. Computer Vision, **60**, 2, pp.91-110, (2004).
- 7) C. Methani and A.M. Namboodiri, "Pose invariant palmprint recognition," Lecture Notes in Computer Science (ICB2009), **5558**, pp.577-586, (2009).
- 8) D. Zhang, G. Lu, W. Li, L. Zhang, and N. Luo, "Palmprint recognition using 3-D information," IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, **39**, 5, pp.505-519, (2009).
- 9) T. Sato, S. Aoyama, S. Sakai, S. Yusa, K. Ito, and T. Aoki, "A contactless palm recognition system using simple active 3D measurement with diffraction grating laser," Proc. Asian Conf. Pattern Recognition, pp.542-546, (2013).
- 10) M.A. Fischler and R.C. Bolles, "Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," Comm. ACM, **24**, 6, pp.381-395, (1981).
- 11) S. Garg, J. Sivaswamy, and S. Chandra, "Unsupervised curvature-based retinal vessel segmentation," Proc. Int'l Symp. Biomedical Imaging: From Nano to Macro, pp.344-347, (2007).
- 12) 中沢和夫, 中島真人, 小林 寛, "ファイバースケイティングを用いた3次元形状計測システムの開発," 電子情報通信学会論文誌 D, **J69-D**, 12, pp.1929-1935, (1986).
- 13) R. Szeliski, Computer Vision: Algorithms and Applications, Springer, (2010).
- 14) Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, **22**, 11, pp.1330-1334, (2000).
- 15) 徐 剛, 辻 三郎, 3次元ビジョン, 共立出版, (1998).
- 16) A.-K. Kong and D. Zhang, "Competitive coding scheme for palmprint verification," Proc. Int'l Conf. Pattern Recognition, **1**, pp.520-523, (2004).
- 17) Z. Sun, T. Tan, Y. Wang, and S.Z Li, "Ordinal palmprint representation for personal identification," Proc. IEEE Computer Society Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, **1**, pp.279-284, (2005).
- 18) K. Ito, S. Iitsuka, and T. Aoki, "A palmprint recognition algorithm using phase-based correspondence matching," Proc. Int'l Conf. Image Processing, pp.1977-1980, (2009).
- 19) "OpenCV.jp," <http://opencv.jp>.



さかい しゅうじ
酒井 修二 2010年, 東北大学工学部電気情報・物理工学科卒業。2015年, 同大学院情報科学研究科博士課程修了。画像処理に関する研究に従事。博士(情報科学)。



うさ しゅうさく
遊佐 秀作 2008年, 東北大学理学部物理学卒業。2013年, 同大学院理学研究科博士課程修了。2013-2015年, 同大学国際集積エレクトロニクス研究開発センター研究支援者。画像処理の研究に従事。博士(理学)。



いとう こういち
伊藤 康一 2000年, 東北大学工学部電子工学科卒業。2005年, 同大学院情報科学研究科博士課程修了。同年同大学院情報科学研究科助手, 2007年, 同助教。2004-2005年, 日本学術振興会特別研究員。現在に至る。画像処理およびバイオメトリクスに関する研究に従事。博士(情報科学)。正会員。



あおき たかふみ
青木 孝文 1988年, 東北大学工学部電子工学科卒業。1992年, 同大学院工学研究科博士課程修了。同年同大学工学部助手, 1994年, 同大学院情報科学研究科助手, 1996年, 同助教, 2002年, 同教授。現在に至る。超高速デジタル計算の理論, 画像センシング, 映像信号処理, バイオメトリクス, VLSI設計技術, 分子コンピューティングに関する研究に従事。博士(工学)。正会員。



さとう たくと
佐藤 拓杜 2013年, 東北大学工学部情報知能システム総合学科卒業。2015年, 同大学院情報科学研究科修士課程修了。画像処理に関する研究に従事。



あおやましょういちろう
青山 章一郎 2010年, 東北大学工学部電気情報・物理工学科卒業。2015年, 同大学院情報科学研究科博士課程修了。現在, 日本学術振興会特別研究員。画像処理に関する研究に従事。博士(情報科学)。