

[チュートリアル講演] 位相限定相関法とそのバイオメトリクス認証への応用

伊藤 康一[†] 青木 孝文[†] 中島 寛^{††} 小林 孝次^{††}

[†] 東北大学大学院情報科学研究科 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-05

^{††} 株式会社山武 〒251-8522 藤沢市川名1-12-2

E-mail: †ito@aoki.ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 本稿では、高精度画像マッチング手法である位相限定相関法(Phase-Only Correlation: POC)について概説する。位相限定相関法は、フーリエ変換された信号の振幅成分を無視し、位相成分のみに着目する画像マッチング手法であり、その有効性は、工業用画像認識、受動型3次元計測、バイオメトリクス認証、映像信号処理などの分野で実証されつつある。本稿では、特に、指紋、虹彩、掌紋、顔、歯科X線写真を用いたバイオメトリクス認証への応用について紹介する。

キーワード 位相限定相関法, バイオメトリクス認証, 指紋, 虹彩, 掌紋, 顔

[Tutorial Lecture] Phase-Only Correlation and Its Application to Biometric Authentication

Koichi ITO[†], Takafumi AOKI[†], Hiroshi NAKAJIMA^{††}, and Koji KOBAYASHI^{††}

[†] Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

6-6-05, Aramaki Aza Aoba, Sendai-shi 980-8579, Japan

^{††} Yamatake Corporation 1-12-2, Kawana, Fujisawa-shi 251-8522, Japan

E-mail: †ito@aoki.ecei.tohoku.ac.jp

Abstract This paper summarizes a high-accuracy image matching technique called Phase-Only Correlation (POC). The Phase-Only Correlation is an image matching technique using the phase components in 2D Discrete Fourier Transforms (DFTs) of given images. This technique has been successfully applied to a wide range of applications, such as industrial image recognition, passive 3D measurement, biometric authentication, video signal processing, etc. In this paper, we present applications of POC to fingerprint, iris, palmprint, face and dental radiograph recognition.

Key words phase-only correlation, biometric authentication, fingerprint, iris, palmprint, face

1. はじめに

高精度な画像マッチングは、画像センシング、映像信号処理、コンピュータビジョンなどのさまざまな分野で重要になる基本処理である。画像マッチングは、2つの画像がどれくらい似ているかを評価する「画像照合」と、2つの画像の間の幾何学的な変形パラメータを求める「画像位置合わせ」を主な目的とする。これまでに、筆者らは、双方の目的に有効である位相情報に基づく画像マッチング技術を開拓してきた [1], [2]。

位相情報に基づく画像マッチングは、画像の位置合わせの観点から進められてきた。古くは、1975年のKuglinらによる位相相関に関する先駆的な研究がある [3]。その後、振幅スペクトルの対数極座標変換 (Fourier-Mellin 変換) を用いた回転・拡大縮小の計測 [4] や映像の動き推定 [5] など

に応用されている。一方で、筆者らの研究グループでは、1990年代から、高精度なバイオメトリクス認証のための画像マッチング技術として位相情報に基づく画像マッチングの研究開発に着手し、これに基づく指紋照合装置を実用化している。これと平行して、各種画像モデルへの拡張を行い、1999年ごろより工業市場向け画像認識システムを実用化している。これまでに、用途に応じた高精度化手法を体系化し、大幅な高性能化を達成している。一連の高精度画像マッチング技術を総称して「位相限定相関法(Phase-Only Correlation: POC)」と呼んでいる。位相限定相関法は、工業用画像認識、顕微鏡向け画像解析、高精度3次元計測、車載カメラ、バイオメトリクス認証、映像信号処理など広範な分野へ応用されている [2]。本稿では、この中で、位相限定相関法のバイオメトリクス認証への応用について述べる。

バイオメトリクス認証は、個人の身体的・行動的特徴をそのまま認証情報として利用する信頼性が高く、利便性に優れた認証技術である [6]。認証において利用される身体的・行動的特徴には、指紋・虹彩・顔・掌紋・筆跡などがある。バイオメトリクス認証では、指紋認証におけるマニユシャマッチングのように、生体特徴から抽出した特徴をマッチングに利用する場合が多い。画像の局所的な特徴を利用することで、(i) 複雑な画像変形に対応できる、(ii) 高速なマッチングが可能になる、(iii) 登録データの容量を抑えることができる特長がある。一方で、明るさの変化やノイズなどが原因で画質が低下すると、正確に特徴を抽出することができないため、認証性能が低下する。これに対して、位相限定相関法を用いたバイオメトリクス認証は、(i) 画像全体の情報を利用するため局所的な特徴を利用したマッチングよりも高性能に認証できる、(ii) 位相情報が明るさの変化やノイズにロバストであるため画像の劣化に対してロバストに認証できる特長がある。一方で、ひずみのような局所的な変形が原因で認証性能が低下したり、フーリエ変換に起因する計算量が大きい問題がある。これらの問題を解決し、現在までに、指紋認証 [7] ~ [9]、虹彩認証 [10]、掌紋認証 [11], [12]、顔認証 [13]、歯科 X 線写真認証 [14] ~ [16] などに位相限定相関法を応用している。

本稿では、位相限定相関法に基づく高精度な画像マッチングについて概説するとともに、指紋認証、虹彩認証、掌紋認証、顔認証、歯科 X 線写真認証への応用について述べる。

2. 位相限定相関法

ここでは、位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) の定義と、位相限定相関法を用いた高精度画像マッチングについて述べる。

2.1 位相限定相関関数

大きさ $N_1 \times N_2$ 画素の画像を $f(n_1, n_2)$ と $g(n_1, n_2)$ とする。ただし、定式化の便宜上、離散空間のインデックスを $n_1 = -M_1, \dots, M_1$ ($M_1 > 0$) および $n_2 = -M_2, \dots, M_2$ ($M_2 > 0$) とし、画像の大きさを $N_1 = 2M_1 + 1$ 画素および $N_2 = 2M_2 + 1$ 画素とする。なお、ここでは説明を簡単にするために離散空間のインデックスを正負対称にとり、2次元画像信号の大きさ N_1 と N_2 を奇数にしているが、これは必須ではない。通常よく用いられるように非負のインデックスを用い、 N_1 と N_2 を任意の正の整数に設定するように一般化することが可能である。

画像 $f(n_1, n_2)$ と $g(n_1, n_2)$ の 2次元離散フーリエ変換 (2次元 DFT) をそれぞれ $F(k_1, k_2)$ および $G(k_1, k_2)$ として次式で与える。

$$\begin{aligned} F(k_1, k_2) &= \sum_{n_1, n_2} f(n_1, n_2) W_{N_1}^{k_1 n_1} W_{N_2}^{k_2 n_2} \\ &= A_F(k_1, k_2) e^{j\theta_F(k_1, k_2)} \\ G(k_1, k_2) &= \sum_{n_1, n_2} g(n_1, n_2) W_{N_1}^{k_1 n_1} W_{N_2}^{k_2 n_2} \end{aligned} \quad (1)$$

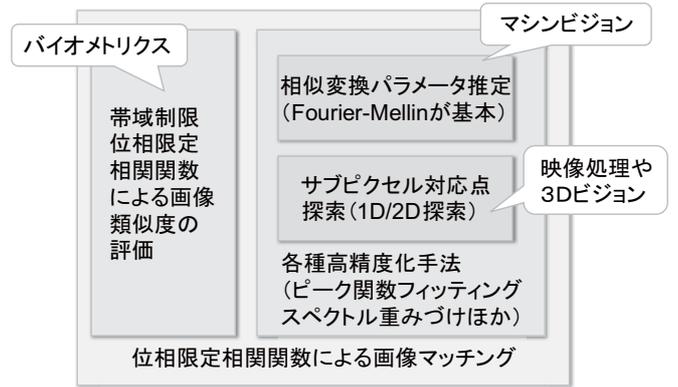


図 1 位相限定相関法の技術体系

$$= A_G(k_1, k_2) e^{j\theta_G(k_1, k_2)} \quad (2)$$

ただし、 $W_{N_1} = e^{-j\frac{2\pi}{N_1}}$ 、 $W_{N_2} = e^{-j\frac{2\pi}{N_2}}$ であり、 \sum_{n_1, n_2} は $\sum_{n_1=-M_1}^{M_1} \sum_{n_2=-M_2}^{M_2}$ を意味する。ここで、 $A_F(k_1, k_2)$ および $A_G(k_1, k_2)$ はそれぞれの画像の振幅成分、 $\theta_F(k_1, k_2)$ および $\theta_G(k_1, k_2)$ はそれぞれの画像の位相成分である。一般性を失うことなく離散周波数のインデックスを $k_1 = -M_1, \dots, M_1$ 、 $k_2 = -M_2, \dots, M_2$ とすることができる。 $F(k_1, k_2)$ と $G(k_1, k_2)$ の正規化相互パワースペクトル $R_{FG}(k_1, k_2)$ を次のように定義する。

$$\begin{aligned} R_{FG}(k_1, k_2) &= \frac{F(k_1, k_2) \overline{G(k_1, k_2)}}{|F(k_1, k_2) G(k_1, k_2)|} \\ &= e^{j\theta(k_1, k_2)} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\overline{G(k_1, k_2)}$ は $G(k_1, k_2)$ の複素共役である。また、 $\theta(k_1, k_2)$ は、 $\theta_F(k_1, k_2) - \theta_G(k_1, k_2)$ で与えられる。POC 関数 $r_{fg}(n_1, n_2)$ は、 $R_{FG}(k_1, k_2)$ の 2次元逆離散フーリエ変換 (2次元 IDFT) として、次のように表される。

$$\begin{aligned} r_{fg}(n_1, n_2) &= \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{k_1, k_2} R_{FG}(k_1, k_2) \\ &\quad \times W_{N_1}^{-k_1 n_1} W_{N_2}^{-k_2 n_2} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 \sum_{k_1, k_2} は $\sum_{k_1=-M_1}^{M_1} \sum_{k_2=-M_2}^{M_2}$ を意味する。類似した 2枚の画像間の POC 関数 $r_{fg}(n_1, n_2)$ はするどいピークを示す。一方、異なる 2枚の画像間では、全くピークが現れない。POC 関数のピークの高さは、画像間の類似度を調べる指標となる。この特長以外にも、POC 関数は、画像間の位置ずれ (平行移動) や明るさの変化、加算ノイズに対してロバストである [7]。

2.2 位相限定相関法を用いた高精度画像マッチング

以下では、位相限定相関法を用いた高精度画像マッチング (図 1) について述べる。

(A) サブピクセルレベルの平行移動量推定 [17]

位相限定相関法を用いて高精度に平行移動量を推定するためには、(i) 離散データで得られた POC 関数への相関ピークモデルのフィッティング (図 2)、(ii) 画像端での信号の不連続性を解消するための窓関数の適用、(iii) エイリアシングやノイズの影響を抑制するためのスペクトル重み付

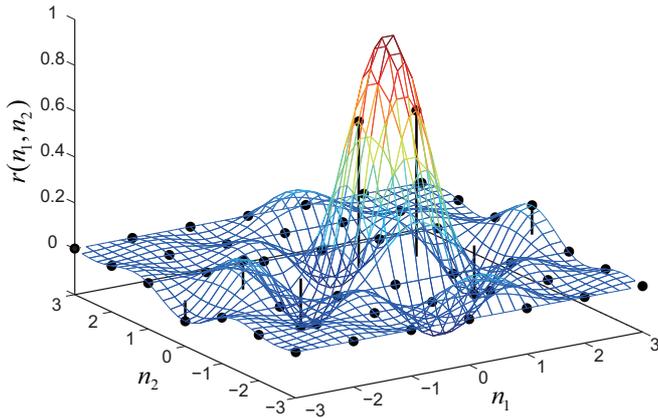


図2 相関ピークモデルのフィッティング

けが重要となる[17]。これらの高精度化手法を用いることで、 100×100 画素の場合にRMS (Root Mean Square) 誤差が0.01画素で平行移動量を推定することが可能である。

(B) 帯域制限位相限定相関関数による類似度評価[7]

信頼性の低い高周波成分の影響を排除しつつ、画像の識別性能を向上させるために、帯域制限位相限定相関 (Band-Limited Phase-Only Correlation: BLPOC) 関数が提案されている[7]。BLPOC関数は、 $R_{FG}(k_1, k_2)$ の2次元IDFTのサイズ自体を画像テクスチャの有効帯域に制限することで相関ピークのエネルギーを集中させ、画像の識別性能を向上させる。BLPOC関数は、次式で定義される。

$$r_{fg}^{K_1 K_2}(n_1, n_2) = \frac{1}{L_1 L_2} \sum_{l_1, l_2} R_{FG}(l_1, l_2) \times W_{L_1}^{-l_1 n_1} W_{L_2}^{-l_2 n_2} \quad (5)$$

ここで、 \sum_{l_1, l_2} は $\sum_{l_1=-K_1}^{K_1} \sum_{l_2=-K_2}^{K_2}$ を表し、 K_1 と K_2 ($0 < K_1 \leq M_1, 0 < K_2 \leq M_2$)は2次元IDFTの有効帯域を表し、 $L_1 = 2K_1 + 1$ および $L_2 = 2K_2 + 1$ である。BLPOC関数は、低画質な画像の照合が可能であり、生体テクスチャ画像の照合に有効である。

(C) 相似変換パラメータの推定[17]

2つの画像の幾何学的な変形が相似変換の関係にある場合は、画像を局所的なブロックに分解することなく、高精度に変換パラメータ(平行移動量、回転角度、拡大縮小率)を推定することができる[4], [17]。一般に、画像マッチングを利用して回転角度を求める場合、回転中心を基準として極座標変換し、画像の回転を平行移動に置き換える。しかし、平行移動も含まれている画像の回転中心を求めることは困難である。そこで、画像をフーリエ変換して得られる振幅スペクトルがよく利用されている。振幅スペクトルは、画像の平行移動に関わらず、常に画像の拡大縮小と回転の中心が原点となる。振幅スペクトルを原点中心に極座標変換することで、回転角度を平行移動量に置き換えることができる。ここでは、回転角度と同時に拡大縮小率も求めるために、極座標変換ではなく、対数極座標変換を用いる。対数極座標変換された振幅スペクトルに対し、(A)で述べた平行移動量推定手法を適用する。精度評価実験により、

256×256 画素の画像において、回転角度はRMS誤差が0.03度、拡大縮小率はRMS誤差が0.02%の高精度な計測が可能であることを確認している。

(D) サブピクセル対応点探索[18], [19]

(A)で述べた平行移動量推定手法を局所的な画像ブロックのマッチングに適用し、画像ピラミッドによる粗密探索と組み合わせることにより、2つの画像の対応点をサブピクセル精度で検出することができる[18], [19]。精度評価実験により、 32×32 画素の画像ブロックに対して、0.05画素の精度で対応点間の移動量を求めることが可能であることを確認している。

3. バイオメトリクス認証

ここでは、バイオメトリクス認証の基礎について述べる。バイオメトリクス (biometrics) とは、生物学 (biology) と測定 (metrics) の合成語であり、生体測定学とも訳されている。Jainらは、“Biometrics deals with identification of individuals based on their biological or behavioral characteristics”と定義している[20]。ユビキタス情報社会において、セキュリティは、最も重要なキーワードの1つであり、信頼性が高く、利便性に優れたシステムが必要とされている。現在、よく用いられている認証方法は、パスワード、PIN (Personal Identification Number)、鍵などのように記憶や所持を必要とするものである。そのため、「忘れる」「盗まれる」「なくす」という危険性がある。これらの問題に対し、記憶や所持が不要で、さらに時間がたっても変化することのない究極的な認証方法として、個人の身体的・行動的特徴をそのまま認証情報として利用するバイオメトリクス認証が注目されている。以下では、バイオメトリクスに用いられる生体特徴について、およびバイオメトリクス認証アルゴリズムの性能評価法について述べる。

3.1 生体特徴

バイオメトリクス認証で用いられる生体特徴には、表1に示すような身体的特徴および行動的特徴がある。以下では、主な生体特徴について簡単に説明する。

指紋を用いた個人認証は、利便性や性能の観点より古くから数多くの研究がなされている[21]。指紋にある特徴点 (minutiae) を用いた認証アルゴリズムがよく用いられている。現在では、指紋センサの小型化により、建物や部屋の入退出管理だけでなく、携帯電話、PCなどユーザー認証にも使われている。

顔を用いた個人認証は、利便性と受容性の高さより、数多くの研究がなされている[22]。しかし、顔の向きや表情、環境の変化に対応した認証が必要であるため、他の生体特徴に比べて認証性能があまり高くない。近年では、顔の向きなどにロバストな認証を実現するために、顔のテクスチャ情報である顔画像を用いた認証から、顔の構造情報である3次元データを用いた認証へと研究が移り変わりつつある。

虹彩は、瞳孔と白目の間にある楕円上の領域で、瞳孔の

表 1 バイオメトリクス認証技術 [25]

| 生体特徴 | 普遍性 | 識別力 | 永続性 | 収集性 | 精度 | 受容性 | 脅威耐久性 |
|------|-----|-----|-----|-----|----|-----|-------|
| 指紋 | 中 | 高 | 高 | 中 | 高 | 中 | 中 |
| 顔 | 高 | 低 | 中 | 高 | 低 | 高 | 低 |
| 虹彩 | 高 | 高 | 高 | 中 | 高 | 低 | 高 |
| 網膜 | 高 | 高 | 中 | 低 | 高 | 低 | 高 |
| 静脈 | 中 | 中 | 中 | 中 | 中 | 中 | 高 |
| 掌紋 | 中 | 高 | 高 | 中 | 高 | 中 | 中 |
| DNA | 高 | 高 | 高 | 低 | 高 | 低 | 高 |
| 声紋 | 中 | 低 | 低 | 高 | 低 | 高 | 低 |
| 筆跡 | 低 | 低 | 低 | 高 | 低 | 高 | 低 |

大きさを調節して網膜に入る光の量を調節する筋肉の集まりであり、カオス状のパターンを持っている。他の生体特徴よりも認証性能が高いだけではなく、体の中にある特徴であるため、傷が付きにくく、偽造も難しいと言われている。Daugman が考案した iris code がよく用いられている [23]。

掌紋は、手のひらにある細かい紋様であり、指紋と比べて大きな領域であるため、安定して紋様を撮影することができる [24]。認証性能は指紋と同等であるが、特別なセンサを使わずにカメラなどで簡単に撮影できるため、利便性が高い。

3.2 性能評価

バイオメトリクス認証アルゴリズムの性能評価法について概説する。アルゴリズムの性能評価では、用途に応じて、1 対 1 (verification) もしくは 1 対 n (identification) の認証を行ったときの識別率を用いる。1 対 1 の場合は ROC (Receiver Operating Characteristic) 曲線を、1 対 n の場合は CMC (Cumulative Match Characteristic) 曲線を用いる [26]。

ROC 曲線は、本人と他人を識別する照合スコアの閾値を変化させて、本人拒否率 (False Non-Match Rate: FNMR) に対する他人受入率 (False Match Rate: FMR) をプロットすることで描かれる (図 3 (a))。ここで、データベースには、 n 人の画像がそれぞれ m 枚格納されているとする。まず、FNMR を求めるために、同じ人におけるすべての組み合わせである $mC_2 \times n$ ペアについて実験する。続いて、FMR を求めるために、異なる人におけるすべての組み合わせである $nC_2 \times m^2$ ペアについて実験する。ただし、FNMR と FMR のペア数に大きな差が出てしまうため、FMR の計算では、各人の 1 番目の画像を使ったすべての組み合わせ nC_2 ペアについて実験を行う場合もある。ROC 曲線が原点に近いほど性能が高いことを示す。また、性能評価の指標として、 $FNMR = FMR$ で定義される EER (Equal Error Rate) も用いる。EER が小さいほど性能が高いことを示す。

CMC 曲線は、本人ペアの順位に基づく認識率によって描かれる (図 3)。具体的には、すべての登録画像と入力画像に対して照合し、それぞれのペアに対して照合スコアを求める。この処理をすべての入力画像について行う。そして、本人ペアの順位により認識率を求める。たとえば、データベースに登録されている画像および入力する画像の枚数が

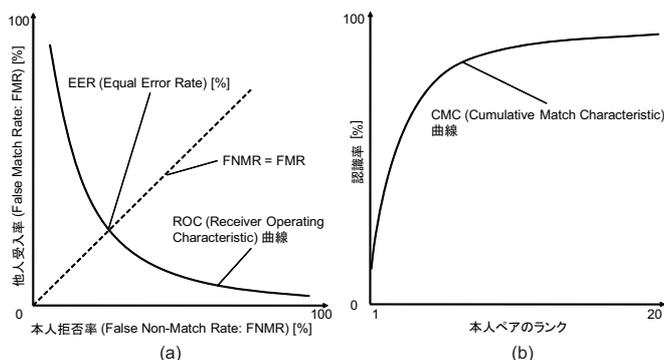


図 3 ROC 曲線と CMC 曲線

n 枚であったとすると、 $n \times n$ ペアについて照合実験をする必要がある。

4. 位相限定相関法を用いたバイオメトリクス認証

ここでは、筆者らがこれまでに取り組んできた位相限定相関法を用いたバイオメトリクス認証について述べる。本稿では、(i) 指紋認証、(ii) 虹彩認証、(iii) 掌紋認証、(iv) 顔認証、(v) 歯科 X 線写真認証の 5 つについて紹介する。

4.1 指紋認証

一般に、全体の数パーセント程度のユーザーについて、アレルギー性皮膚炎、肌荒れ、乾燥肌などの問題があり、指紋を用いて認証することが難しいと言われている。特徴点抽出に基づく通常の指紋照合手法は、これらのユーザーの指紋の特徴点を正確に抽出できないことが多く、認証性能が大幅に低下する。これに対し、位相限定相関法に基づく指紋認証アルゴリズムは [7]、指紋画像の劣化に強く、手荒れや乾燥肌のユーザーにも利便性が高い。以下では、位相限定相関法を用いた指紋認証アルゴリズムを紹介するとともに、その特徴点マッチングとの組み合わせによる高性能化について述べる。

4.1.1 位相限定相関法を用いた指紋認証アルゴリズム

位相限定相関法を用いた指紋認証アルゴリズムは、(i) 回転補正、(ii) 平行移動補正、(iii) 共通領域抽出、(iv) 照合スコア算出の 4 ステップで構成される。まず、(i) 回転補正では、適当な範囲で登録画像を回転させた画像を作成し、入力画像との類似度を BLPOC 関数を用いて求める。もっとも類似度の高い回転角度を用いて回転補正した画像を得る。(ii) 平行移動補正では、回転補正した画像と入力画像の POC 関数を用いて平行移動量を求め、それに基づいて平行移動を補正する。(iii) 共通領域抽出では、 x 軸および y 軸方向への画素の投影を利用し、画像間の共通領域を抽出する。POC 関数の計算において、非共通領域は、無相関なノイズとなるため、正確に照合するためには、共通領域を抽出する必要がある。(iv) 照合スコア算出では、共通領域間の BLPOC 関数を計算し、最大ピークの相関値を照合スコアとする。

画質の悪い指紋画像が含まれている指紋データベース



図4 感圧センサで撮影した指紋画像：(a) 通常の指紋，(b) 乾燥した指先の指紋，(c) 荒れた指先の指紋，(d) 皮膚アレルギーの指先の指紋



図5 FVC 2002 DB1 SetA に含まれている指紋画像：(a) ひずんだ指紋画像ペア，(b) 共通領域の少ない指紋画像ペア

(DB A) とひずんだ指紋画像が含まれている指紋データベース (DB B) を用いた性能評価実験について述べる。DB A は、感圧センサを用いて撮影した指紋画像であり、図4のような指紋画像が含まれている。画像サイズは 384×256 画素で、30人からそれぞれ11回撮影して得られた330枚が格納されている。本人ペア1,650ペアおよび他人ペア435ペアに対して実験を行った。位相限定相関法を用いた指紋認証アルゴリズムのEERが1.15%であるのに対し、特徴点を用いた指紋認証アルゴリズム[27]のEERは13.72%であった。これより、画質の悪い指紋画像に対して、位相限定相関法を用いることでロバストな認証が可能である。DB B は、Fingerprint Verification Competition (FVC) 2002[28]で使用された指紋画像であり、図5のような指紋画像が含まれている。画像サイズは 388×374 画素で、100人からそれぞれ8回撮影して得られた800枚が格納されている。本人ペア2,800ペアおよび他人ペア4,950ペアに対して実験を行った。位相限定相関法を用いた指紋認証アルゴリズムのEERが3.06%であるのに対し、特徴点を用いた指紋認証アルゴリズムのEERは2.89%であった。これより、特徴点を用いた指紋認証アルゴリズムの方が指紋画像のひずみに対してロバストな認証が可能である。

4.1.2 位相限定相関法と特徴点マッチングの組み合わせ

バイオメトリクス認証において、認証アルゴリズムの性能を向上させるために複数の認証アルゴリズムを組み合わせることが考えられる。これは、マルチモーダルバイオメトリクスの1手法である[29]。現在までに、複数の特徴点マッチングの組み合わせにより性能が向上することが報告されている[30]。また、FVC 2004に参加した認証アルゴリズムを組み合わせることで、性能向上が見られるという報告もある[31]。この中では、特に、特徴点を用いたアルゴリズムと相関を用いたアルゴリズムの組み合わせにより、大きく性能が向上すると記されている。これに対し、位相限定相関法と複数の特徴点マッチングの組み合わせによる性

能向上を検討した。

組み合わせに用いた特徴点マッチングは、指紋画像の非線形なひずみに対応したString Matching[27]、特徴点の局所的な構造と全体の構造に基づいて照合するStructure Matching[32]、特徴点の周りの局所ブロックに対して位相限定相関法で照合するBlock Matching[9]の3つである。以上の3つのアルゴリズムと上述した位相限定相関法を用いたアルゴリズムを用いて指紋画像ペアの照合スコアを計算し、それらの照合スコアを組み合わせた。4.1.1の性能評価実験と同じデータベースを用いて実験を行った結果、DB AではEERが0.65%、DB BではEERが0.61%であった。以上より、位相限定相関法と特徴点マッチングの組み合わせは、性能向上に非常に有効である。

4.2 虹彩認証

虹彩認証は、Daugmanが提案したiris codeがよく用いられている[23]。iris codeは、前処理した虹彩画像に対し、2次元Gaborフィルターを用いて特徴ベクトルを抽出し、量子化した特徴ベクトル間のハミング距離によって照合する。特徴ベクトルを量子化することで登録データの容量を削減するとともに、ハミング距離の計算のみで照合することが可能である。一方で、特徴抽出におけるGaborフィルタのパラメータを撮影環境に応じて最適化する必要がある。煩雑なパラメータの最適化により、本来の認証性能を実現することができる。これに対し、位相限定相関法を用いた虹彩認証[10]は、iris codeと比べて、煩雑なパラメータの最適化を必要としないシンプルなアルゴリズムであるにもかかわらず、高い認証性能を有する。

位相限定相関法を用いた虹彩認証アルゴリズムは、(i)前処理、(ii)有効領域抽出、(iii)平行移動補正、(iv)照合スコア算出の4ステップで構成される。(i)前処理では、図6のように、撮影された虹彩画像から認証に使用する正規化画像を生成する処理である。(ii)有効領域抽出では、まぶた領域を含まない共通領域を抽出する処理である。(iii)平行移動補正は、頭の回転などにより生じた虹彩パターンの回転を補正する処理である。(iv)照合スコア算出では、最終的に得られた正規化画像間のBLPOC関数を計算し、最大ピークの相関値を照合スコアとする。また、画質の悪い虹彩画像に対応するために、画像全体をそのまま照合するのではなく、局所ブロックに分割して照合した方が性能が向上する場合もある。

虹彩認証アルゴリズムの性能を評価するために、CASIA iris image version 1.0および2.0[33]、ICE 2005[34]データベースを用いた実験について述べる。CASIA iris image version 1.0には、 320×280 画素の虹彩画像が756枚含まれている。これらは、108人からそれぞれ目に対し7回撮影して得られたものである。実験では、本人ペア2,268ペア、他人ペア283,122ペアについて認証実験を行った。iris codeと性能を比較するために、文献[35]にある1D log-Gaborフィルターを用いた虹彩認証アルゴリズムを用いた。位相限定相関法を用いた虹彩認証アルゴリズムのEERが0.0032%で

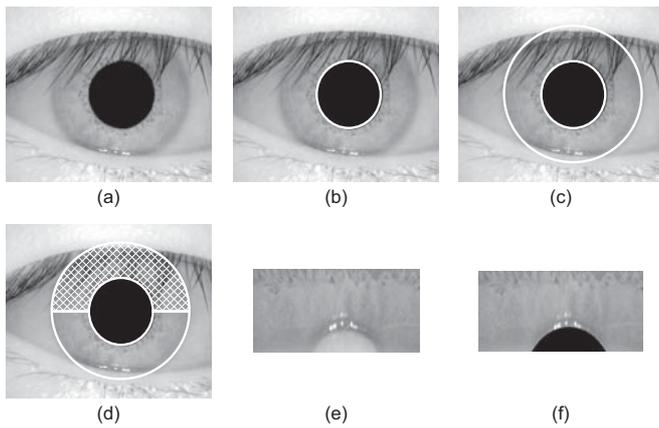


図 6 虹彩認証における前処理：(a) 虹彩画像，(b) 虹彩と瞳孔の境界検出，(c) 虹彩と白目の境界検出，(d) 認証に使用する領域，(e) 認証に使用する正規化画像，(f) まがた領域をマスクした正規化画像

あるのに対し，1D log-Gabor フィルタを用いた認証アルゴリズムの EER は 1.46% であった．CASIA iris image version 2.0 には， 640×480 画素の虹彩画像が 1,200 枚含まれている．これらは，60 人からそれぞれ目に対し 20 回撮影して得られたものである．実験では，本人ペア 11,400 ペア，他人ペア 28,320 ペアについて認証実験を行った．位相限定相関法を用いた虹彩認証アルゴリズムの EER は 0.53% であった．ICE 2005 データベースには， 640×480 画素の虹彩画像が 2,953 枚含まれている．124 人から右目を，120 人から左目を撮影している（右目の虹彩画像が合計で 1,425 枚，左目が 1,528 枚である）．ICE 2005 では，Experiment 1 として 12,214 の本人ペアと 1,002,384 の他人ペアに対して照合実験を行い，Experiment 2 として 14,653 の本人ペアと 1,151,975 ペアの他人ペアに対して照合実験を行う．Experiment 1 では EER が 0.33%，Experiment 2 では EER が 1.21% であった．以上の実験結果より，位相限定相関法を用いた虹彩認証アルゴリズムは，十分な認証性能を有していることがわかる．

4.3 掌紋認証

掌紋を用いた認証システムは，新しいバイオメトリクス認証として注目されている．これまでに提案されている掌紋認証アルゴリズムには，掌紋画像から得られた特徴を利用したもの [24], [36], [37] がある．文献 [36] では，掌紋画像から抽出した特徴点を利用して照合しているが，指紋に比べて特徴点の抽出が困難であるため，あまり性能が高くない．一方で，文献 [37] では，虹彩認証で用いられている iris code のように，Gabor フィルタを用いて抽出した特徴ベクトルを照合に使うことで，高い認証性能を得ている．これに対し，位相限定相関法を用いた相似変換パラメータ推定を利用した掌紋認証アルゴリズム [11] と手のひらのひずみに対応するためにブロックマッチングを利用した掌紋認証アルゴリズム [12] を提案している．ここでは，後者のブロックマッチングを利用した認証アルゴリズムを紹介する．

ブロックマッチングを利用した掌紋認証アルゴリズムは，

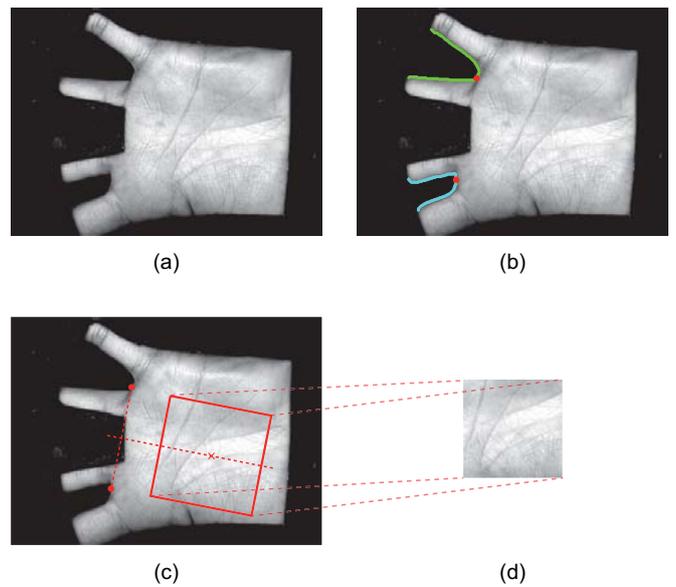


図 7 掌紋認証における前処理：(a) 掌紋画像，(b) 人差指と中指，薬指と小指の間のくぼみの検出，(c) 掌紋領域の抽出，(d) 抽出した掌紋領域

(i) 前処理，(ii) 照合の 2 ステップで構成される．(i) 前処理では，図 7 のように，掌紋画像から照合に利用する掌紋領域を抽出する．具体的には，境界線追跡を用いて人差指と中指および薬指と小指の間にあるくぼみを検出する．検出した 2 つのくぼみの間の線分の垂直 2 等分線を求め，ある一定距離にある点を手のひらの重心とする．そして，重心を中心とする掌紋領域を抽出する．登録処理の場合は，掌紋領域をブロックに分割し，それぞれのブロックの位相情報を登録データとする．(ii) 照合では，前処理で得られた掌紋領域をブロックに分割し，位相限定相関法を用いて対応する登録データのブロックと照合する．このとき，ブロック間の平行移動を補正することで，掌紋画像のひずみに対応することができる．

実験では，PolyU Palmprint Database [38] を用いた．データベースに含まれている画像は，画像サイズが 384×284 画素で，100 人からそれぞれ 6 回撮影して得られた 600 枚が格納されている．本人ペア 1,500 ペアおよび他人ペア 178,200 ペアに対して実験を行った．実験では，Zhang らのアルゴリズム [37] および位相限定相関法を用いた相似変換パラメータ推定を利用した掌紋認証アルゴリズム [11] と性能を比較した．ブロックマッチングを用いたアルゴリズムの EER が 0.003% であるのに対し，Zhang らのアルゴリズムは 2.147%，相似変換パラメータ推定を利用したアルゴリズムは 0.200% であった．登録データの容量および計算時間の面でもブロックマッチングを用いたアルゴリズムは，従来法よりも優れており，実用的なアルゴリズムである．

4.4 顔認証

近年，顔認証は，2 次元画像を用いた認証よりも，認証性能の高さより 3 次元データを用いた認証に関する研究が盛んに行われている [22], [39]．2 次元画像を用いた認証は，

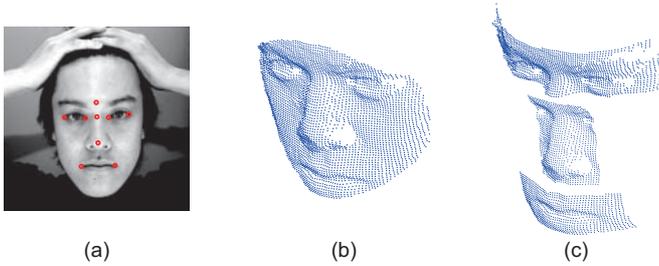


図 8 顔の 3 次元構造 : (a) 顔画像, (b) 顔全体の 3 次元構造, (c) 顔の部分領域の 3 次元構造

顔のテクスチャ情報を用いた認証であり、表情変化や顔の向きの変化、照明変化などにより大幅に性能が低下する問題がある。これに対して、3次元データを用いた認証は、顔の構造情報を用いた認証であるため、2次元画像に比べて環境変化にロバストな認証が可能である。

3次元顔認証では、顔の3次元形状を取得するために、市販されている能動型3次元計測装置を使用している場合が多い。能動型3次元計測装置は、レーザーやパターン光を撮影対象に照射することで計測するため、人体、特に顔の計測にはあまり向いていない。これに対し、レーザーやパターン光の照射を要しないステレオビジョンと位相限定相関法の高精度な対応付け手法を組み合わせた受動型3次元計測システムを開発している [13], [19]。図 8 は、開発したシステムを用いて顔の3次元形状を取得した例である。

高精度に復元された3次元構造であれば、ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズムを用いて3次元データを位置合わせし、データ間の距離により認証することができる。ただし、表情変化によって顔の構造が変わると性能が低下する問題がある。そこで、図 8 (c) のように、顔全体の3次元構造を用いるのではなく、表情変化に影響を受けない部分領域の3次元構造を用いることで、表情変化にロバストな認証が可能である。24人からそれぞれ8回撮影した192ペアの顔のステレオ画像に対し、本人ペア672ペアおよび他人ペア17,664ペアに対して実験を行った。実験結果より、顔全体の3次元構造を用いたときのEERが10.43%であるのに対し、目と鼻の3次元構造を用いたときのEERが0.53%であった。以上より、表情変化の少ない部分領域を用いることで、より高性能な顔認証が可能である。

4.5 歯科 X 線写真認証

歯科 X 線写真は、骨の内部構造の小さな変化を発見するため、病気の進行具合を調べるため、治療の方針を立てるため、あるいは身元を確認するためなどに使われている [40]。このような目的で使用する場合、数週間前あるいは数年前に撮影した X 線写真と現在撮影した X 線写真とを正確に比較する必要がある [41]。口内法 X 線写真の撮影では、フィルムと X 線照射器を撮影のたびに撮影者が手動で配置するため、同じ人の同じ口腔内領域を撮影したとしても、X 線写真の間に平行移動、回転、拡大縮小、ひずみなどの幾何的な変形が生じてしまう。そのため、正確な診

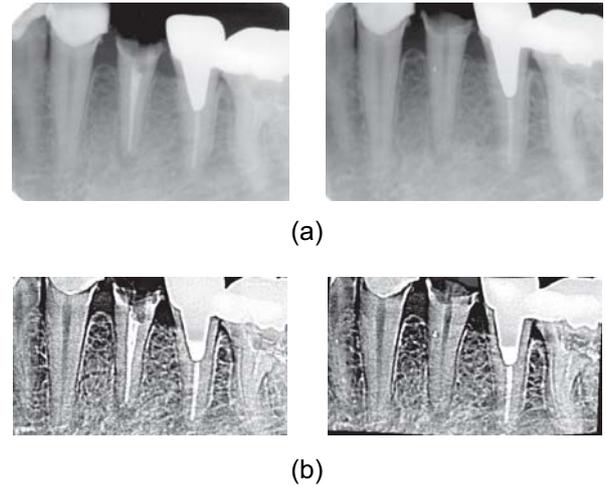


図 9 歯科 X 線画像 (a) と位置合わせ後の画像 (b)

断や身元確認のためには、平行移動、回転、拡大縮小を合わせるだけでなく、ひずみも補正することができる高精度な位置合わせ手法および照合手法が必要となる。

これに対し、位相限定相関法を用いることで、ひずんだ歯科 X 線写真を高精度に位置合わせし、正確に認証することが可能である。位相限定相関法を用いた歯科 X 線写真認証アルゴリズムは、(i) 拡大縮小、回転、平行移動補正、(ii) ひずみ補正、(iii) 照合スコア算出の3ステップで構成される。(i) 拡大縮小、回転、平行移動補正では、位相限定相関法を用いた相似変換パラメータ推定手法を用いて、画像間のおおざっぱな位置をあわせる。(ii) ひずみ補正では、位相限定相関法を用いたサブピクセル対応付け手法を用いて対応点を抽出し、得られた対応関係に基づいて画像の変形パラメータを推定し、ひずみを補正する。ここでは、非線形な変形モデルである TPS (Thin-Plate Spline) モデルを用いる。(iii) 照合スコア算出では、ひずみ補正をした画像間の BLPOC 関数を計算し、最大ピークの相関値を照合スコアとする。

性能評価実験では、250人の患者から1週間またはそれ以上の間隔で撮影した500枚(250人×2枚)の歯科 X 線写真(367×485画素)を用いた。ここでは、治療後の画像を入力画像とし、治療前の画像をデータベースに格納されている登録画像として、1対nの認証により性能を評価した。ひずみ補正を行わないアルゴリズムの認識率が69.6%であるのに対し、TPSモデルに基づいてひずみ補正を行ったアルゴリズムの認識率は82.8%であった。以上より、歯科 X 線写真間のひずみを補正することで、正確な位置合わせおよび照合が可能である。

5. まとめ

本稿では、高精度画像マッチング手法である位相限定相関法と、そのバイオメトリクス認証への応用について述べた。特に、指紋、虹彩、掌紋、顔、歯科 X 線写真を用いたバイオメトリクス認証への応用について説明した。これらの認証アルゴリズムの照合処理において、位相限定相関法

を用いていることより、今後は、さまざまな生体特徴の認証に利用することができるマルチモーダルバイオメトリクス認証エンジンの開発を検討する予定である。

文 献

- [1] 青木孝文, 伊藤康一, 柴原琢磨, 長嶋聖: “位相限定相関法に基づく高精度マシンビジョン—ピクセル分解能の壁を越える画像センシング技術を目指して—”, *IEICE Fundamentals Review*, **1**, 1, pp. 30–40 (2007).
- [2] 青木孝文, 伊藤康一, 本間尚文: “位相情報に基づく画像マッチング技術とその応用展開—3d ビジョンからバイオメトリクスまで—”, *電子情報通信学会誌*, **90**, 8, pp. 680–685 (2007).
- [3] C. D. Kuglin and D. C. Hines: “The phase correlation image alignment method”, *Proc. Int. Conf. Cybernetics and Society*, pp. 163–165 (1975).
- [4] Q. Chen, M. Defrise and F. Deconinck: “Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-Mellin transforms for image registration and recognition”, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, **16**, 12, pp. 1156–1168 (1994).
- [5] G. A. Thomas: “HDTV bandwidth reduction by adaptive subsampling and motion-compensation DATV techniques”, *Society of Motion Picture and Television Engineers Journal*, pp. 460–465 (1987).
- [6] A. K. Jain, P. Flynn and A. A. Ross: “Handbook of Biometrics”, Springer (2007).
- [7] K. Ito, H. Nakajima, K. Kobayashi, T. Aoki and T. Higuchi: “A fingerprint matching algorithm using phase-only correlation”, *IEICE Trans. Fundamentals*, **E87-A**, 3, pp. 682–691 (2004).
- [8] Y. Sasaki, K. Ito, T. Aoki and T. Higuchi: “A compact cluster computer with embedded cpus and its application to rapid prototyping of fingerprint verification system”, *IEICE Electronics Express*, **2**, 17, pp. 465–470 (2005).
- [9] K. Ito, A. Morita, T. Aoki, T. Higuchi, H. Nakajima and K. Kobayashi: “A fingerprint recognition algorithm combining phase-based image matching and feature-based matching”, *Lecture Notes in Computer Science (ICB2006)*, **3832**, pp. 316–325 (2005).
- [10] K. Miyazawa, K. Ito, T. Aoki, K. Kobayashi and H. Nakajima: “An effective approach for iris recognition using phase-based image matching”, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, **30**, 10, pp. 1741–1756 (2008).
- [11] K. Ito, T. Aoki, H. Nakajima, K. Kobayashi and T. Higuchi: “A palmprint recognition algorithm using phase-only correlation”, *IEICE Trans. Fundamentals*, **E91-A**, 4, pp. 1023–1030 (2008).
- [12] S. Itsuka, K. Ito and T. Aoki: “A practical palmprint recognition algorithm using phase information”, *Proc. 19th Int. Conf. Pattern Recognition* (2008). (to be published).
- [13] A. Hayasaka, T. Shibahara, K. Ito, T. Aoki, H. Nakajima and K. Kobayashi: “A passive 3D face recognition system and its performance evaluation”, *IEICE Trans. Fundamentals*, **E91-A**, 8, pp. 1974–1981 (2008).
- [14] E. Kosuge, R. Kawamata, I. Kashima, A. Nikaido, K. Ito and T. Aoki: “An automated dental radiograph identification system using phase-only correlation for mass disasters”, *Radiological Society of North America (RSNA) 2007*, p. 974 (2007).
- [15] K. Ito, A. Nikaido, T. Aoki, E. Kosuge, R. Kawamata and I. Kashima: “A dental radiograph recognition system using phase-only correlation for human identification”, *IEICE Trans. Fundamentals*, **E91-A**, 1, pp. 298–305 (2008).
- [16] 伊藤康一, 二階堂旭, 青木孝文, 小菅栄子, 川股亮太, 鹿島勇: “歯科 X 線写真のための位相限定相関法を用いた高精度位置合わせアルゴリズム”, *電子情報通信学会論文誌 D*, **J91-D**, 7, pp. 1788–1797 (2008).
- [17] K. Takita, T. Aoki, Y. Sasaki, T. Higuchi and K. Kobayashi: “High-accuracy subpixel image registration based on phase-only correlation”, *IEICE Trans. Fundamentals*, **E86-A**, 8, pp. 1925–1934 (2003).
- [18] K. Takita, M. A. Muquit, T. Aoki and T. Higuchi: “A sub-pixel correspondence search technique for computer vision applications”, *IEICE Trans. Fundamentals*, **E87-A**, 8, pp. 1913–1923 (2004).
- [19] M. A. Muquit, T. Shibahara and T. Aoki: “A high-accuracy passive 3d measurement system using phase-based image matching”, *IEICE Trans. Fundamentals*, **E89-A**, 3, pp. 686–697 (2006).
- [20] A. K. Jain, R. Bolle and S. Pankanti: “Biometrics: Personal Identification in Networked Society”, Kluwer Academic Publisher (1999).
- [21] M. D., D. Maio, A. K. Jain and S. Prabhakar: “Handbook of Fingerprint Recognition”, Springer (2003).
- [22] S. Z. Li and A. K. Jain: “Handbook of Face Recognition”, Springer (2005).
- [23] J. Daugman: “High confidence visual recognition of persons by a test of statistical independence”, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, **15**, 11, pp. 1148–1161 (1993).
- [24] D. Zhang: “Palmprint Authentication”, Kluwer Academic Publication (2004).
- [25] A. Jain, A. Ross and S. Prabhakar: “An introduction to biometric recognition”, *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, **14**, 1, pp. 4–20 (2004).
- [26] J. Wayman, A. Jain, D. Maltoni and D. Maio: “Biometric Systems”, Springer (2005).
- [27] A. K. Jain, L. Hong, S. Pankanti and R. Bolle: “An identity-authentication system using fingerprints”, *Proc. IEEE*, **85**, 9, pp. 1365–1388 (1997).
- [28] <http://bias.csr.unibo.it/fvc2002/>.
- [29] A. A. Ross, K. Nandakumar and A. K. Jain: “Handbook of Multibiometrics”, Springer (2006).
- [30] A. Ross, A. Jain and J. Reisman: “A hybrid fingerprint matcher”, *Pattern Recognition*, **36**, pp. 1661–1673 (2003).
- [31] J. Fierrez-Aguilar, L. Nanni, J. Ortega-Garcia, R. Cappelli and D. Maltoni: “Combining multiple matchers for fingerprint verification: A case study in FVC2004”, *Lecture Notes in Computer Science (ICIAP2005)*, **3617**, pp. 1035–1042 (2005).
- [32] X. Jiang and W. Y. Yau: “Fingerprint minutiae matching based on the local and global structures”, *International Conference on Pattern Recognition.*, **2**, pp. 1038–1041 (2000).
- [33] <http://www.sinobiometrics.com/>.
- [34] <http://iris.nist.gov/ice/>.
- [35] L. Masek and P. Kovesi: “MATLAB source code for a biometric identification system based on iris patterns”, *School of Computer Science and Software Eng., Univ. Western Australia* (2003).
- <http://people.csse.uwa.edu.au/pk/studentprojects/libor/>.
- [36] N. Duta, A. Jain and K. Mardia: “Matching of palmprints”, *Pattern Recognition Letters*, **23**, 4, pp. 477–485 (2002).
- [37] D. Zhang, W.-K. Kong, J. You and M. Wong: “Online palmprint identification”, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, **25**, 9, pp. 1041–1050 (2003).
- [38] PolyU Palmprint Database, <http://www4.comp.polyu.edu.hk/~biometrics/>.
- [39] A. Scheenstra, A. Ruifrok and R. Veltkamp: “A survey of 3D face recognition methods”, *Lecture Notes on Computer Science (AVBPA 2005)*, **3546**, pp. 891–899 (2005).
- [40] T. M. Lehmann, H.-G. Gröndahl and D. K. Benn: “Computer-based registration for digital subtraction in dental radiology”, *Dentomaxillofacial Radiology*, **29**, pp. 323–346 (2000).
- [41] D. L. G. Hill, P. G. Batchelor, M. Holden and D. J. Hawkes: “Medical image registration”, *Phys. Med. Biol.*, **46**, pp. R1–R45 (2001).