

位相限定相関法を用いた歯の X 線写真の 位置合わせアルゴリズム

A Dental Radiograph Registration Algorithm Using Phase-Only Correlation

二階堂 旭[†] 伊藤 康一[†] 青木 孝文[†] 小菅 栄子^{††} 川股 亮太^{††}
Akira NIKAIDO[†], Koichi ITO[†], Takafumi AOKI[†], Eiko KOSUGE^{††},
and Ryota KAWAMATA^{††}

[†]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

^{††}神奈川歯科大学放射線学教室 〒 238-8580 横須賀市稲岡町 82

[†]Graduate School of Information Sciences, Tohoku University
6-6-05, Aramaki Aza Aoba, Sendai-shi 980-8579, Japan

^{††}Department of Oral and Maxillofacial Radiology, Kanagawa Dental College
82, Inaoka-cho, Yokosuka-shi 238-8580, Japan
E-mail: †nikaido@aoki.ecei.tohoku.ac.jp

あらまし

大規模災害における犠牲者の身元確認は、バイオメトリクス認証で使われる身体的な特徴（顔、指紋、虹彩など）を利用できない場合に、歯の X 線写真を利用している。歯の X 線写真を用いた個人認証は、身元がわかっている X 線写真と身元不明の X 線写真とを照合し、個々の歯科的特徴を比較することで行われている。本論文では、高精度画像照合技術である位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) を用いた歯の X 線写真の位置合わせアルゴリズムを提案する。画像を 2 次元離散フーリエ変換することで得られる位相情報を利用することで、画像間のロバストな位置合わせや認識が可能となる。歯の X 線写真のデータベースを用いた性能評価実験により、提案アルゴリズムが低品質な画像を高性能に認識できることを示す。

Abstract

Dental records are often used to identify victims of massive disasters, where the conventional biometric features, e.g., face, fingerprint, iris, etc., are not available. Human identification using dental records is to match an unidentified individual's postmortem radiographs against a set of identified antemortem radiographs. This paper presents an efficient dental radiograph registration algorithm using phase-based image matching for human identification. The use of phase components in 2D (two-dimensional) discrete Fourier transforms of dental radiograph images makes possible to achieve highly robust image registration and recognition. Experimental evaluation using a small

database of dental radiographs indicates that the proposed algorithm exhibits efficient recognition performance for low-quality images.

1 まえがき

近年、信頼性が高く、利便性に優れた個人認証技術としてバイオメトリクス認証が注目を集めている。バイオメトリクス認証は、個人の身体的・行動的特徴を利用して個人を同定する技術である。個人認証システムに利用される身体的・行動的特徴には、顔・指紋・虹彩・筆跡などがある。これらの特徴を用いた認証システムは、カギやパスワード、PIN (Personal Identification Number) を用いた従来の認証システムに比べて安全性・利便性が高く、さまざまなセキュリティシステムへの応用が進んでいる。

一方、地震・火災・津波などの大規模な災害における犠牲者の身元確認に、これらの特徴を利用することができない場合がある。その場合は、大規模な災害でも特徴を失いにくい歯を利用して身元を確認する。歯を用いた個人認証は、歯科医院などに保管されている身元が明らかな X 線写真と身元不明の X 線写真とを照合することで行われている。歯の X 線写真の例を図 1 に示す。一般に、専門家がこのような X 線写真を 1 枚 1 枚重ね合わせながら身元確認を行っている。そのため、大規模な災害になればなるほど、膨大な時間がかかり、誤りも多くなってしまふ。そこで、照合時間を短縮させるとともに識別性能を向上させるために、歯の X 線写真を用いた身元確認を自動的または半自動的に行うことができるシステムへの要求が高まっている [1]。

現在までに報告されている歯の X 線写真を用いた個



図 1: 歯の X 線写真の例

人認証アルゴリズムは、X 線写真に写っている歯冠や歯根、治療痕などの輪郭を特徴として抽出し、特徴間の距離を用いて認証するアルゴリズムである [1]–[3]。画像から抽出した特徴を用いた場合は、画像のひずみに強いが、画質が悪いと特徴を正確に抽出することができないため、性能が著しく低下する問題がある。X 線写真は、一般的に、撮影時に多量のノイズが入り込むことが多く、また X 線の照射量も撮影のタイミングで異なるため、画像全体がぼけてしまったり、それぞれの X 線写真で明るさが異なってしまう場合が多い。そのため、X 線写真から正確に特徴を抽出することは難しい。

これに対して、本論文では、画像マッチングを用いた歯の X 線写真の位置合わせアルゴリズムを提案する。このアルゴリズムは、歯の X 線写真を用いた高性能な個人認証を実現するための基本処理となる。本論文では、高精度画像マッチング技術である位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) を用いた位置合わせアルゴリズムを提案する。画像を 2 次元離散フーリエ変換することで得られる位相情報を利用することで、画像間のロバストな位置合わせや照合が可能である。

これまでに、POC は、コンピュータビジョンにおいて、サブピクセル画像位置合わせ手法として有効であることが報告されている [4]–[6]。また、バイオメトリクス認証において、POC を用いた指紋認証アルゴリズムが提案されており [7]、そのアルゴリズムを実装した認証システムも開発されている [8]。最近では、POC を用いた虹彩認証アルゴリズム [9] や掌紋認証アルゴリズム [10] も提案されており、バイオメトリクス認証における POC の有効性が示されている。

本論文では、指紋認証や虹彩認証、掌紋認証と同様に、画像の位相情報を用いた照合手法が歯の X 線写真の認識にも有効であることを示す。また、治療前後の歯の X 線写真を用いた性能評価実験により、提案アルゴリズムが低品質な画像を高精度に位置合わせすることができることを示す。

2 位相限定相関法

ここでは、位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) の定義について述べる。大きさ $N_1 \times N_2$ の 2 枚の画像を $f(n_1, n_2)$, $g(n_1, n_2)$ 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 $n_1 = -M_1, \dots, M_1$ および $n_2 = -M_2, \dots, M_2$ とし、画像の大きさを $N_1 = 2M_1 + 1$ および $N_2 = 2M_2 + 1$ とする。これらの画像の 2

次元離散フーリエ変換をそれぞれ $F(k_1, k_2)$, $G(k_1, k_2)$ として次式で与える。

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

$$\begin{aligned} G(k_1, k_2) &= \sum_{n_1 n_2} g(n_1, n_2) W_{N_1}^{k_1 n_1} W_{N_2}^{k_2 n_2} \\ &= A_G(k_1, k_2) e^{j\theta_G(k_1, k_2)} \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 $k_1 = -M_1, \dots, M_1$, $k_2 = -M_2, \dots, M_2$, $W_{N_1} = e^{-j\frac{2\pi}{N_1}}$, $W_{N_2} = e^{-j\frac{2\pi}{N_2}}$ 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、それぞれ画像 $f(n_1, n_2)$, $g(n_1, n_2)$ の振幅成分、 $\theta_F(k_1, k_2)$ および $\theta_G(k_1, k_2)$ は位相成分である。この時、合成位相スペクトル $R_{FG}(k_1, k_2)$ は次のように定義される。

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

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、 $\theta(k_1, k_2) = \theta_F(k_1, k_2) - \theta_G(k_1, k_2)$ である。位相限定相関関数 $r_{fg}(n_1, n_2)$ は $R_{FG}(k_1, k_2)$ の 2 次元逆離散フーリエ変換として、次のように表される。

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

ただし、 $\sum_{k_1 k_2}$ 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 $r_{fg}(n_1, n_2)$ は鋭いピークを示す。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り、ピークの座標が位置ずれ量 (平行移動量) を表している。この特徴以外にも、POC 関数は、画像間の明るさの変化、加算ノイズに対してロバストである。これらの特徴は、バイオメトリクス認証において非常に有効である [7]。

本論文では、バイオメトリクス認証に特化した POC である帯域制限位相限定相関法 (Band-Limited Phase-Only Correlation: BLPOC) を用いる [7]。BLPOC を用いることにより、高性能な指紋認証、虹彩認証が可能である。歯の X 線写真の周波数特性を調べると、重要な情報は低周波領域に含まれ、高周波領域にはノイズなどの意味のない情報が含まれていることに気づく。BLPOC は、この性質を利用し、画像の高周波成分を取り除き、有効な周波数成分のみを利用して画像間の相関を求める手法であり、照合性能の改善が図られる。BLPOC 関数は次式で定義される。

$$\begin{aligned} r_{fg}^{K_1 K_2}(n_1, n_2) &= \frac{1}{L_1 L_2} \sum_{k_1=-K_1}^{K_1} \sum_{k_2=-K_2}^{K_2} R_{FG}(k_1, k_2) \\ &\quad \times W_{L_1}^{-k_1 n_1} W_{L_2}^{-k_2 n_2} \end{aligned} \quad (5)$$

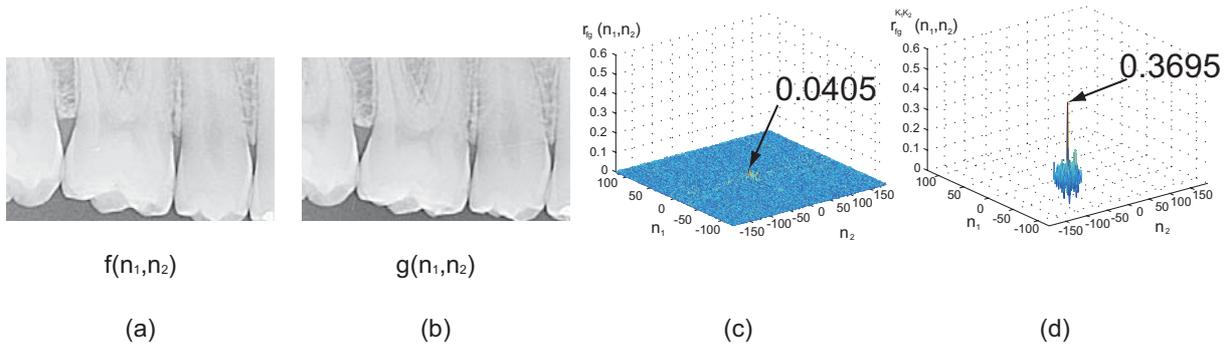


図 2: POC と BLPOC を使って本人ペアを照合した例 : (a) 登録画像 $f(n_1, n_2)$, (b) 入力画像 $g(n_1, n_2)$, (c) POC 関数 $r_{fg}(n_1, n_2)$, (d) BLPOC 関数 $r_{fg}^{K_1 K_2}(n_1, n_2)$ ($K_1/M_1 = K_2/M_2 = 0.1$)

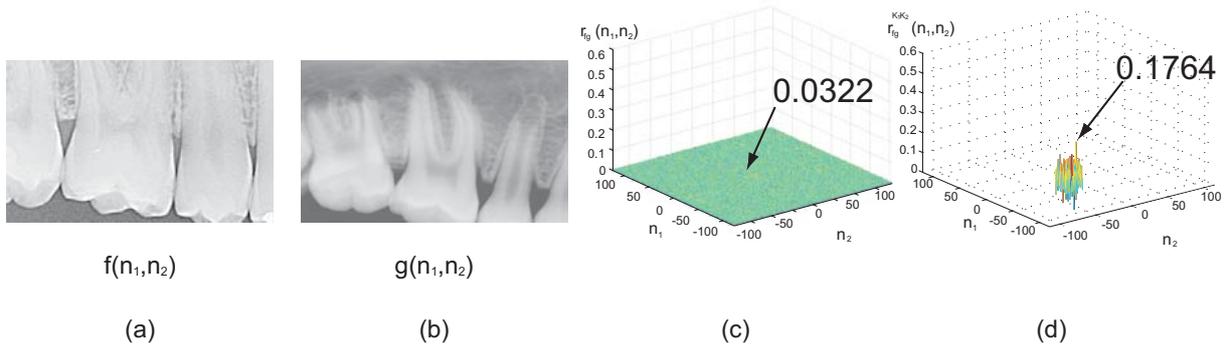


図 3: POC と BLPOC を使って他人ペアを照合した例 : (a) 登録画像 $f(n_1, n_2)$, (b) 入力画像 $g(n_1, n_2)$, (c) POC 関数 $r_{fg}(n_1, n_2)$, (d) BLPOC 関数 $r_{fg}^{K_1 K_2}(n_1, n_2)$ ($K_1/M_1 = K_2/M_2 = 0.1$)

ここで, $n_1 = -K_1, \dots, K_1, n_2 = -K_2, \dots, K_2, L_1 = 2K_1 + 1, L_2 = 2K_2 + 1$ である. BLPOC は, 制限する帯域幅に依存せず, 常に相関値のピークの最大値が 1 に正規化される.

実際に, POC 関数 r_{fg} と BLPOC 関数 $r_{fg}^{K_1 K_2}$ を用いて本人ペアの照合を行った例を図 2 に, 他人ペアの照合を行った例を図 3 に示す. これより, POC 関数よりも BLPOC 関数を用いた方が高い識別性能を示すことがわかる.

3 歯の位置合わせアルゴリズム

位相限定相関法を用いた歯の X 線写真の位置合わせアルゴリズムについて述べる. 本論文で提案する位置合わせアルゴリズムは, 位相限定相関法を用いた高精度で高精度な回転角度・平行移動量推定手法を利用し, 歯の X 線写真間の位置合わせを行う. 提案するアルゴリズムは, (i) 画像のコントラスト強調, (ii) 回転・平行移動補正, (iii) 共通領域抽出, (iv) 照合の 4 ステップから構成される. それぞれの処理について以下で説明する.

3.1 画像のコントラスト強調

歯の X 線写真は, 多量のノイズが加わり, X 線照射量が撮影のタイミングにより異なるため, ぼけてしまっていることが多い. そこで, 位置合わせの精度を向上させるために, まず, 画像のコントラストを強調する. 本論文では, 画像のコントラスト強調に Local Area Contrast Enhancement (LACE) [11] を用いる. 以下では, LACE による画像強調について述べる.

原画像を $f(n_1, n_2)$, コントラスト強調された画像を $f_e(n_1, n_2)$ とした時, $f_e(n_1, n_2)$ は次式で与えられる.

$$f_e(n_1, n_2) = \frac{\nu \cdot m_f}{s_l(n_1, n_2)} (f(n_1, n_2) - m_l(n_1, n_2)) + m_l(n_1, n_2) \quad (6)$$

ここで, ν は定数, m_f は画像全体の平均, $m_l(n_1, n_2)$ は原画像の各画素の近傍ブロックの平均値, $s_l(n_1, n_2)$ は原画像の各画素の近傍ブロックの標準偏差である. 本論文では, $\nu = 0.5$, $m_l(n_1, n_2)$ を計算するブロックサイズを 8, $s_l(n_1, n_2)$ を計算するブロックサイズを 8 とした. 式 (6) において, $m_l(n_1, n_2)$ は画像の低周波成分を表していると考えられるので, $f(n_1, n_2) - m_l(n_1, n_2)$ は画像の高周波成分となる. そのため, 式 (6) は, 標準偏差 $s_l(n_1, n_2)$ が小さいほど, すなわちコントラストが低い領域ほど高周波成分が強調されることを表している. 実際にコントラストを強調した画像を図 4(b) に示す. ここで, $f_e(n_1, n_2)$ と $g_e(n_1, n_2)$ は, それぞれコントラスト強調した登録画像と入力画像である.

3.2 回転・平行移動補正

ここでは, 登録画像 $f(n_1, n_2)$ と入力画像 $g(n_1, n_2)$ の間の回転角度・平行移動量を求め, 補正する処理について説明する. 正確な照合を行うためには, 正確かつ高精度に画像間の回転角度と平行移動量を求める必要がある. そこで, 本論文では, POC を用いた高精度な回転・平行移動量推定手法を用いる [5].

まず, 画像間の回転角度を求める. 本論文では, 画像

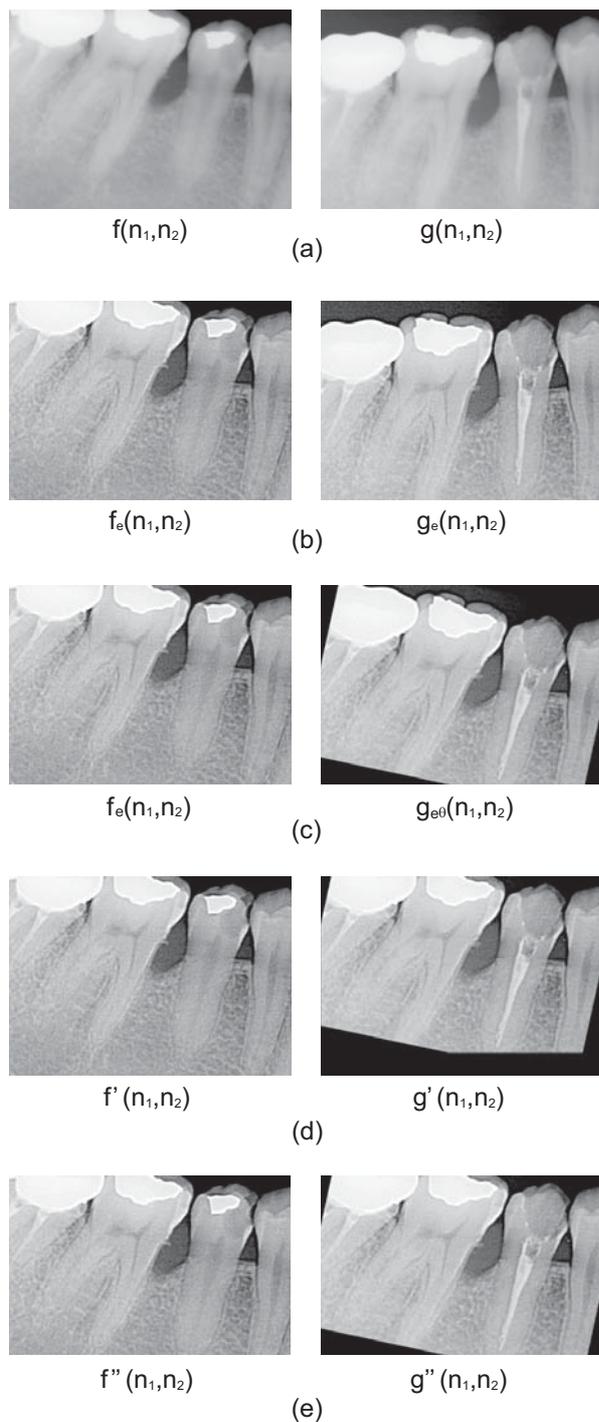


図 4: 回転・平行移動の補正と共通領域抽出: (a) 登録画像 $f(n_1, n_2)$ と入力画像 $g(n_1, n_2)$, (b) コントラスト強調後の画像 $f_e(n_1, n_2)$ と $g_e(n_1, n_2)$, (c) 回転補正後の画像 $f_e(n_1, n_2)$ と $g_{e\theta}(n_1, n_2)$, (d) 回転・平行移動補正後の画像 $f'(n_1, n_2)$ と $g'(n_1, n_2)$, (e) 抽出した共通領域 $f''(n_1, n_2)$ と $g''(n_1, n_2)$

をフーリエ変換した際に得られる振幅スペクトルを利用した手法を用いる [5]。画像間の回転を求めるには、回転中心を中心として画像を極座標展開し、回転を平行移動に置き換え、平行移動量から回転角度を求めるこ

とが多い。しかし、画像間には回転と平行移動が同時に存在するため、回転中心を求めることが困難である。そこで、画像を離散フーリエ変換して得られる振幅スペクトル間の回転中心が必ず原点となることを利用する。振幅スペクトルを極座標展開することで、画像間の回転を平行移動に置き換えることができる。そして、この平行移動量を POC で求め、画像間の回転角度を算出することができる。

以下では、回転角度推定の処理について示す (詳しくは、文献 [5] を参照されたい)。

Step 1: コントラスト強調された画像 $f_e(n_1, n_2)$ と $g_e(n_1, n_2)$ の 2 次元離散フーリエ変換を計算し、それぞれ $F_e(k_1, k_2)$ と $G_e(k_1, k_2)$ とする。

Step 2: それぞれの振幅スペクトル $|F_e(k_1, k_2)|$ と $|G_e(k_1, k_2)|$ を求める (図 5(b))。自然画像では、そのエネルギーの大部分が低周波領域に集中し、高周波成分のエネルギーは相対的に小さいことが知られている。そのため、 $|F_e(k_1, k_2)|$ と $|G_e(k_1, k_2)|$ の代わりに、振幅スペクトルの平方根である $\sqrt{|F_e(k_1, k_2)|}$ と $\sqrt{|G_e(k_1, k_2)|}$ を用いる (図 5(c))。

Step 3: 振幅スペクトルを極座標変換し、 $F_P(l_1, l_2)$ と $G_P(l_1, l_2)$ を求める (図 5(d))。

Step 4: $F_P(l_1, l_2)$ と $G_P(l_1, l_2)$ との間の平行移動量を BLPOC 関数 $r_{F_P G_P}^{K_1 K_2}(n_1, n_2)$ のピーク的位置より求め、画像間の回転角度 θ を算出する。ただし、 $K_1/M_1 = K_2/M_2 = 0.5$ とする。求めた θ を用いて回転を補正した画像 $g_{e\theta}(n_1, n_2)$ を求める (図 4(c))。

次に、画像間の平行移動量を求める。 $f_e(n_1, n_2)$ と $g_{e\theta}(n_1, n_2)$ との間の BLPOC 関数 $r_{f_e g_{e\theta}}^{K_1 K_2}(n_1, n_2)$ を計算し、ピークの座標から平行移動量を求める。ただし、 $K_1/M_1 = K_2/M_2 = 0.5$ とする。そして、得られた平行移動量から画像間の平行移動を補正する。最終的に得られた画像を $f'(n_1, n_2)$ と $g'(n_1, n_2)$ とする。図 4(d) に、回転・平行移動を補正した画像を示す。

3.3 共通領域抽出

次に、正規化した画像 $f'(n_1, n_2)$ と $g'(n_1, n_2)$ の共通領域を抽出する。BLPOC 関数において、画像間で重なっていない領域は無関連なノイズとして働くので、照合性能を向上させるために画像間の共通領域を抽出する必要がある。 $f'(n_1, n_2)$ と $g'(n_1, n_2)$ の共通領域抽出には、 n_1 方向と n_2 方向に対する画素値の投影を利用する。抽出された共通領域は同じ大きさであり、それぞれ $f''(n_1, n_2)$ と $g''(n_1, n_2)$ とする。図 4(e) に抽出された共通領域を示す。

3.4 照合

共通領域 $f''(n_1, n_2)$ と $g''(n_1, n_2)$ に対して、BLPOC 関数 $r_{f'' g''}^{K_1 K_2}(n_1, n_2)$ を計算し、相関ピークの最大値を照合スコアとする。ただし、 $K_1/M_1 = K_2/M_2 = 0.1$ とする。

4 実験・考察

提案アルゴリズムの位置合わせ精度を評価するために、歯の X 線写真を用いた照合実験を行った。実験で

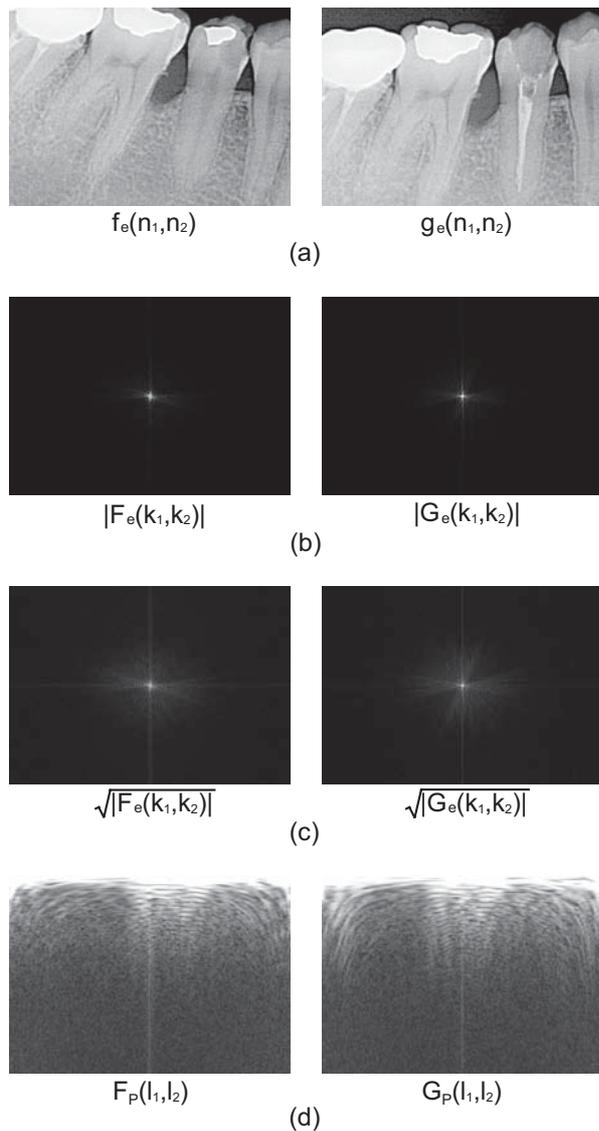


図 5: 振幅スペクトルを利用した回転角度の推定: (a) コントラスト強調後の登録画像と入力画像, (b) 振幅スペクトル, (c) 振幅スペクトルの平方根, (d) 極座標展開した振幅スペクトル

は、身元確認に使われる歯の X 線写真の代わりに、治療前後の歯の X 線写真を用いた。治療前後の歯の X 線写真は、撮影条件 (X 線の照射量や撮影位置など) が異なっていたり、歯の形状が大きく変化していたりするため、身元確認に使われる X 線写真以上に位置合わせが困難な画像である。今回の実験では、25 人分の治療前後の X 線写真 (367 × 485 画素) 計 50 枚 (25 人 × 2 枚) を用いた。図 6 に、本実験で使用した歯の X 線写真の例を示す。

一般的に、バイオメトリクス認証システムの性能は、verification (1 対 1 の照合) または identification (1 対 n の照合) で評価される [12]。ここでは、identification で性能を評価した。具体的には、治療後の歯を撮影した X 線写真を入力画像とし、治療前の歯を撮影した X 線写真を登録画像とする。そして、1 枚の入力画像と 25

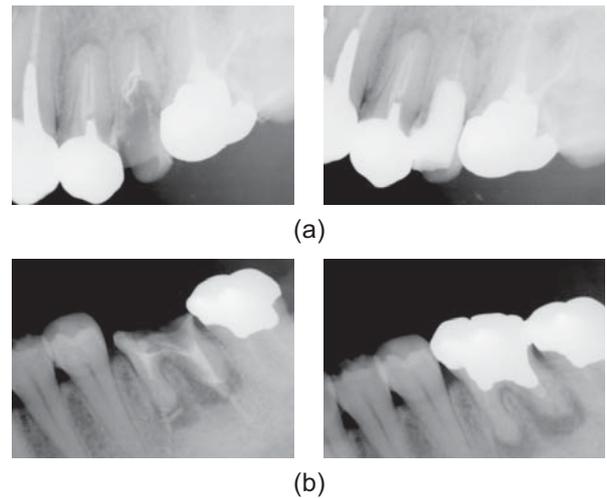


図 6: データベースに格納されている歯の X 線写真の例: 左側の画像が治療前に撮影された画像, 右側の画像が治療後に撮影された画像

枚の登録画像とを照合し、照合スコアを求める。本実験では、625 (25 × 25) 回の照合実験を行った。得られた照合スコアのうち、最大の照合スコアとなったペアを本人ペアとしたときに、すべての入力画像に対して正確に照合できた割合により性能を評価する。

本論文では、identification の実験から得られた結果より、正しい本人ペアが何番目に高い照合スコアであるかを用いて評価する Cumulative Match Curve (CMC) を使って性能を調べた。図 7 は、本実験により得られた CMC である。横軸が順位、縦軸が正しく認証された割合である。この図より、上位 1 位に正しい本人ペアが含まれる割合は 80%、上位 5 位までであれば 100% であることがわかる。この実験結果は、上位 5 位までの照合スコア、すなわち全照合ペアのうち上位 20% 分だけを考慮すれば、正しい本人ペアが含まれていることを示している。

図 8 は、位置合わせをした結果の例である。図の (a) は治療前の画像、(b) は治療後の画像である。図の (c) は治療前の画像を位置合わせした画像、(d) は治療後の画像を位置合わせした画像である。図の (e) は、提案アルゴリズムにより位置を合わせ、差をとった画像である。この結果より、ほぼ正確に位置が合っているため、治療痕が白く浮き出ていることがわかる。このように、提案アルゴリズムは、身元確認だけではなく、歯の治療の確認にも有効に活用することが可能である。

以上の実験結果より、提案アルゴリズムを用いることで、低画質な歯の X 線写真でも正確に位置合わせできることを示した。

5 むすび

本論文では、位相限定相関法を用いた歯の X 線写真の位置合わせアルゴリズムを提案した。提案アルゴリズムは、位相限定相関法の有する高精度な画像マッチング

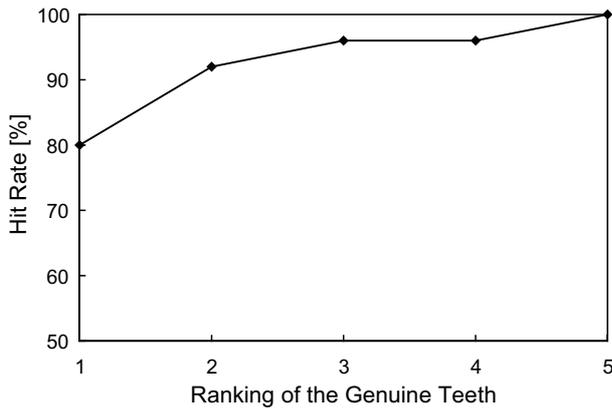


図 7: 提案アルゴリズムの Cumulative Match Curve

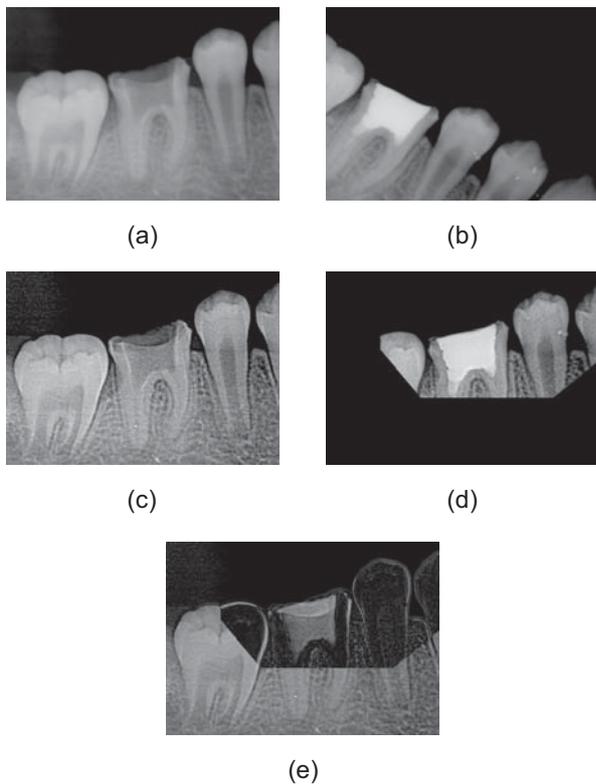


図 8: 位置合わせした画像の例 : (a) 登録画像, (b) 入力画像, (c) 登録画像の位置合わせ後の画像, (d) 入力画像の位置合わせ後の画像, (e) 位置合わせした画像の差分

能力を利用することで, 画像間の回転角度と平行移動量を高精度に求めることができる. 歯の X 線写真を用いた性能評価実験を通して, 提案アルゴリズムが状態のよくない歯の X 線写真に対して有用であることを示した.

今後は, 大規模なデータベースを作成し, バイオメトリクス認証として歯の X 線写真にどれくらいの識別能力があるかを調べるとともに, 実際の身元確認へ応用する予定である. また, 本論文の実験結果より, 撮影のタイミングによって画像が大きく変形している場合は, 正確に位置を合わせることができなかった. さまざまな

撮影条件に対応するために, 今後は, X 線写真間のひずみを考慮して位置を合わせるアルゴリズムを検討する予定である.

参考文献

- [1] G. Fahmy, D. Nassar, E. Haj-Said, H. Chen, O. Nimir, J. Zhou, R. Howell, H. H. Ammar, M. Abdel-Mottaleb, and A. K. Jain, "Toward an automated dental identification system," *J. of Electronic Imaging*, Vol. 14, No. 4, pp. 043018-1-043018-13, October 2005.
- [2] A. K. Jain and H. Chen, "Matching of dental X-ray images for human identification," *Pattern Recognition*, Vol. 37, No. 7, pp. 1519-1532, July 2004.
- [3] H. Chen and A. K. Jain, "Dental biometrics: Alignment and matching of dental radiographs," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 27, No. 8, pp. 1319-1326, August 2005.
- [4] C. D. Kuglin and D. C. Hines, "The phase correlation image alignment method," *Proc. Int. Conf. Cybernetics and Society*, pp. 163-165, 1975.
- [5] K. Takita, T. Aoki, Y. Sasaki, T. Higuchi, and K. Kobayashi, "High-accuracy subpixel image registration based on phase-only correlation," *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E86-A, No. 8, pp. 1925-1934, August 2003.
- [6] K. Takita, M. A. Muquit, T. Aoki, and T. Higuchi, "A sub-pixel correspondence search technique for computer vision applications," *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E87-A, No. 8, pp. 1913-1923, August 2004.
- [7] K. Ito, H. Nakajima, K. Kobayashi, T. Aoki, and T. Higuchi, "A fingerprint matching algorithm using phase-only correlation," *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E87-A, No. 3, pp. 682-691, March 2004.
- [8] Products using phase-based image matching, <http://www.aoki.ecei.tohoku.ac.jp/research/poc.html>.
- [9] K. Miyazawa, K. Ito, T. Aoki, K. Kobayashi, and H. Nakajima, "A phase-based iris recognition algorithm," *Lecture Notes in Computer Science (ICB2006)*, Vol. 3832, pp. 356-365, December 2005.
- [10] K. Ito, T. Aoki, H. Nakajima, K. Kobayashi, and T. Higuchi, "A palmprint recognition algorithm using phase-based image matching," *Proc. the 2006 IEEE Int. Conf. Image Processing*, October 2006 (to be published).
- [11] G. X. Ritter and J. N. Wilson, *Handbook of Computer Vision Algorithms in Image Algebra*, CRC Press, 1996.
- [12] R. M. Bolle, J. H. Connell, S. Pankanti, N. K. Ratha, and A. W. Senior, *Guide to Biometrics*, Springer, 2004.