

位相限定相関法を用いた歯の X 線写真の 個人認証システムの検討 A Study on a Dental Radiograph Identification System Using Phase-Only Correlation

二階堂 旭* 伊藤 康一* 青木 孝文* 小菅 栄子†
Akira NIKAIDO Koichi ITO Takafumi AOKI Eiko KOSUGE

川股 亮太†
Ryota KAWAMATA

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 線写真とを専門家が個々の歯科的特徴を比較することで行われている。そのため、災害の規模によっては、膨大な時間がかかり、誤りが多くなる危険性がある。そこで、歯の X 線写真を用いた身元確認を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。その要求に対して、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 線写真の個人認証システムについて検討する。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、提案システムにおける照合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し、専門家の負担を大幅に削減可能な照合システムが実現できることを示す。

キーワード 歯の X 線写真, 個人認証システム, 位相限定相関法, バイオメトリクス

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、さまざまな個人認証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は、一般的に有用とされている生体特徴を利用することができない場合が多い。そのため、このような場合には、身体的な特徴の中でも特徴を失にくい歯を利用して身元を確認している。

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 写真とを照合することで行われている。一般に、歯の X 線写真を使った身元確認は、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、誤りが多くなる危険性がある。そこで、処理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 線写真を用いた個人認証システムは、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 [1, 2, 3]。画像から抽出した特徴を用いる場合は、画像のひずみに口バラストであるが、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い。また X 線の照射量も撮影のタイミングで異なるため、画像全体がぼけたり、明るさが異なったりすることも多い。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、高精度画像マッチング技術

* 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, Graduate School of Information Sciences, Tohoku University, 6-6-05, Aramaki Aza Aoba, Sendai-shi 980-8579, Japan (nikaido@aoki.ecei.tohoku.ac.jp)

† 神奈川歯科大学放射線学教室, 〒 238-8580 横須賀市稲岡町 82, Department of Oral and Maxillofacial Radiology, Kanagawa Dental College, 82, Inaoka-cho, Yokosuka-shi 238-8580, Japan

である位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) を用いた歯の X 線写真の認証システムを提案する。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, 5, 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、虹彩認証や掌紋認証と同様に、画像の位相情報を用いた照合手法が歯の X 線写真の高性能な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、提案システムが低品質な画像を正確に認証できることを示す。

2 歯の X 線写真を用いた個人認証システム

本論文で提案する歯の X 線写真の個人認証システムについて述べる。図 1 は、歯の X 線写真を用いた個人認証システムである。提案するシステムは、入力された歯の X 線写真に対して、データベース全体から候補を絞りこみ、専門家の負担を軽減させる認証システムである。従来の専門家のみによる照合に比べ、照合時間の短縮だけでなく、より正確な結果が得られる。提案するシステムは、(i) X 線写真のコントラストを強調する前処理、(ii) 登録画像と入力画像の回転角度と位置を合わせる処理、(iii) 位相限定相関法を用いた照合、(iv) 専門家による最終的な照合で構成される。ステップ (i) からステップ (iii) は、位相限定相関法を用いた照合システムであり、データベース中から候補となる歯の X 線写真のリストを作成することを目的としている。ステップ (iv) は、専門家による候補となる画像と入力画像との照合であり、正確な個人認証を目的としている。対応する歯の X 線写真がデータベース中に存在しなかった場合は、その入力画像をデータベースへ格納する。

身元確認という処理の性質上、いっさい間違いのない正確な照合が求められるため、最終的な照合は専門家が行う必要がある。そのため、システムの性能は、専門家の負担をどのくらい軽減できるか、すなわちデータベース中からどのくらい候補を絞れるかで決定される。

以下では、提案するシステムの性能を大きく左右する照合アルゴリズムについて述べる。本論文では、照合アルゴリズムとして、これまでにバイオメトリクス認証の分野で有効性が確認されている位相限定相関法を用いる。

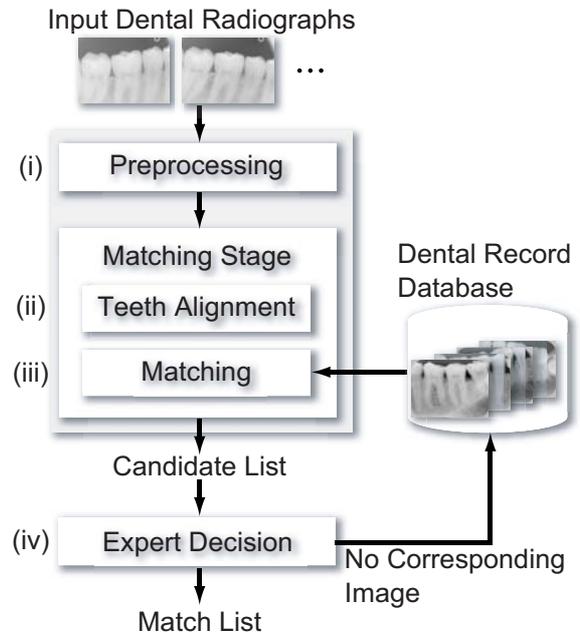


図 1: 歯の X 線写真を用いた個人認証システム

3 歯の X 線写真を用いた照合アルゴリズム

位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC) を用いた歯の X 線写真の照合アルゴリズムについて述べる。まず、画像間の回転、位置合わせと照合に用いる POC について述べる。POC は、画像を離散フーリエ変換したときに得られる位相情報を用いた高精度な画像マッチング手法である。続いて、本論文で提案する歯の X 線写真の照合アルゴリズムについて述べる。

3.1 位相限定相関法

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、次式で与える。

$$\begin{aligned}
 F(k_1, k_2) &= \sum_{n_1 n_2} f(n_1, n_2) W_{N_1}^{k_1 n_1} W_{N_2}^{k_2 n_2} \\
 &= A_F(k_1, k_2) e^{j\theta_F(k_1, k_2)} \quad (1) \\
 G(k_1, k_2) &= \sum_{n_1 n_2} g(n_1, n_2) W_{N_1}^{k_1 n_1} W_{N_2}^{k_2 n_2} \\
 &= A_G(k_1, k_2) e^{j\theta_G(k_1, k_2)} \quad (2)
 \end{aligned}$$

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

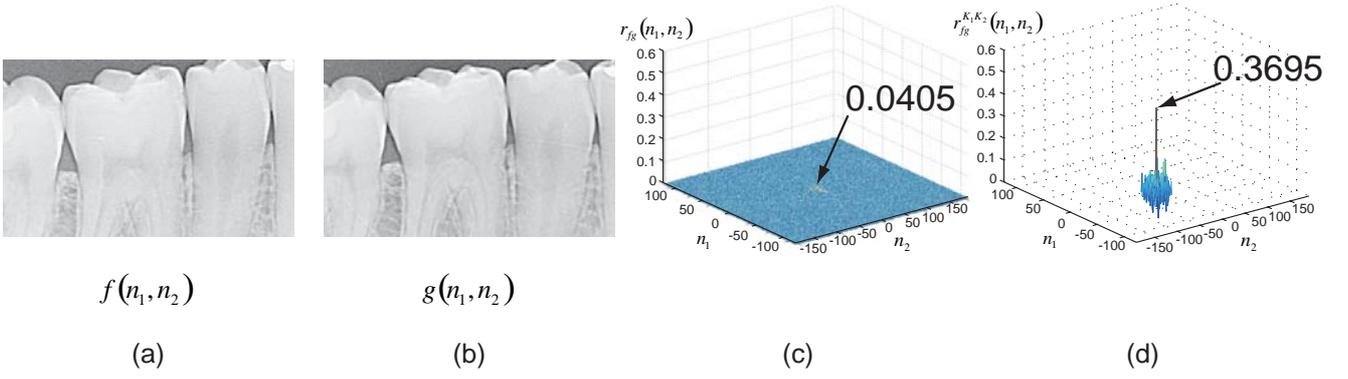


図 2: POC と BLPOC を使って本人ペアを照合した例 : (a) 登録画像 $f(n_1, n_2)$, (b) 入力画像 $g(n_1, n_2)$, (c) POC 関数 $r_{fg}(n_1, n_2)$, (d) BLPOC 関数 $r_{fg}^{K_1, K_2}(n_1, n_2)$ ($K_1/M_1 = K_2/M_2 = 0.1$)

相スペクトル $R_{FG}(k_1, k_2)$ は次のように定義される .

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

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] .

3.2 帯域制限位相限定相関法

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 .

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

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 .

3.3 位相限定相関法を用いた回転角度の計測

続いて, POC を用いた画像間の回転角度推定について述べる [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: 2 枚の画像 $f(n_1, n_2)$ と $g(n_1, n_2)$ の 2 次元離散フーリエ変換を計算し, それぞれ $F(k_1, k_2)$ と $G(k_1, k_2)$ とする .

Step 2: それぞれの振幅スペクトル $|F(k_1, k_2)|$ と $|G(k_1, k_2)|$ を求める (図 3 (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,

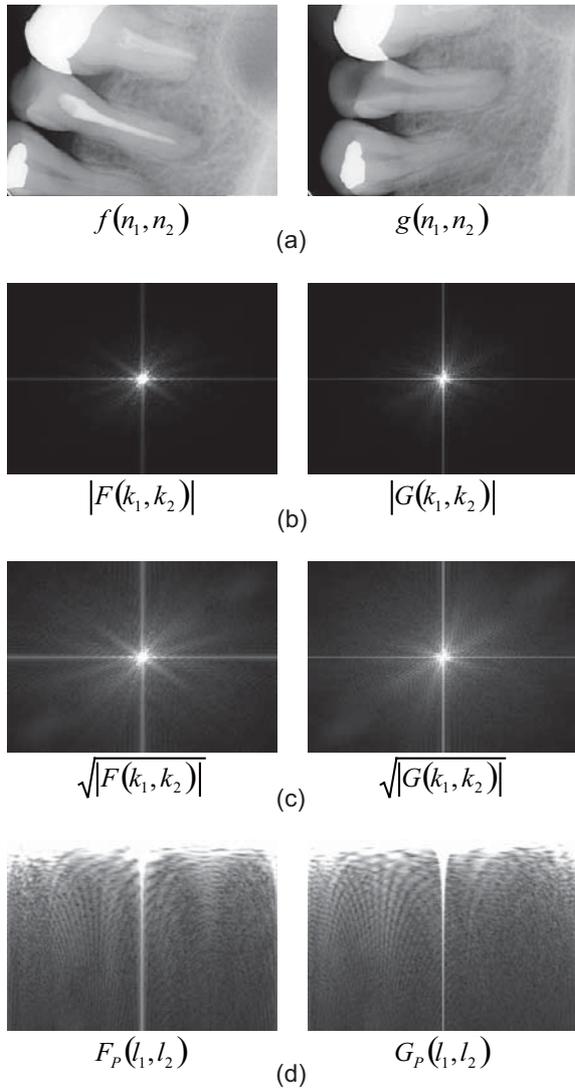


図 3: 振幅スペクトルを利用した回転角度の推定 : (a) コントラスト強調後の登録画像と入力画像, (b) 振幅スペクトル, (c) 振幅スペクトルの平方根, (d) 極座標展開した振幅スペクトル

$|F(k_1, k_2)|$ と $|G(k_1, k_2)|$ の代わりに, 振幅スペクトルの平方根である $\sqrt{|F(k_1, k_2)|}$ と $\sqrt{|G(k_1, k_2)|}$ を用いる (図 3 (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 3 (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 $r_{F_P G_P}^{K_1 K_2}(n_1, n_2)$ のピークの位置より求め, 画像間の回転角度 θ を算出する. ただし, $K_1/M_1 = K_2/M_2 = 0.1$ とする. 求めた θ を用いて回転を補正した画像 $g_\theta(n_1, n_2)$ を求める.

3.4 歯の X 線写真の照合アルゴリズム

位相限定相関法を用いた歯の X 線写真の照合アルゴリズムについて述べる. 本論文で提案する照合アルゴリズムは, 位相限定相関法を用いた高速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

位置合わせを行った後, 照合を行う. 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.

(i) 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] と top-hat フィルタと bottom-hat フィルタを用いたコントラスト強調 [1] を利用した. 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.

(ii) 回転・平行移動補正

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, $f_e(n_1, n_2)$ と $g_e(n_1, n_2)$ との間の回転角度 θ を BLPOC を用いて求める. 次に, $f_e(n_1, n_2)$ 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.

(iii) 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相関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.

(iv) 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照合性能を評価するために, 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 線写真以上に照合が困難な画像である. 今回の実験では, 60 人分の治療前後の X 線写真 (256 ×

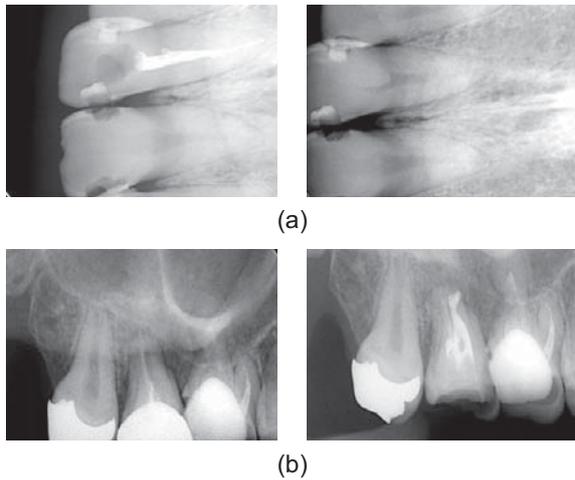


図 4: データベースに格納されている歯の X 線写真の例: 左側の画像が治療後に撮影された画像, 右側の画像が治療前に撮影された画像

460 画素) 計 120 枚 (60 人 × 2 枚) を用いた。図 4 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、治療前の歯を撮影した X 線写真を入力画像とし、治療後の歯を撮影した X 線写真を登録画像とする。そして、1 枚の入力画像と 60 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、3,600 (60 × 60) 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 5 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 72%、上位 4 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 4 位までの照合スコア、すなわち全照合ペアのうち上位 6.7% 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 6, 7, 8 は、位置合わせをした結果の例である。図の (a) は治療後の画像、(b) は治療前の画像である。図の (c) は治療後の画像を位置合わせした画像、(d) は治療前の画像を位置合わせした画像である。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

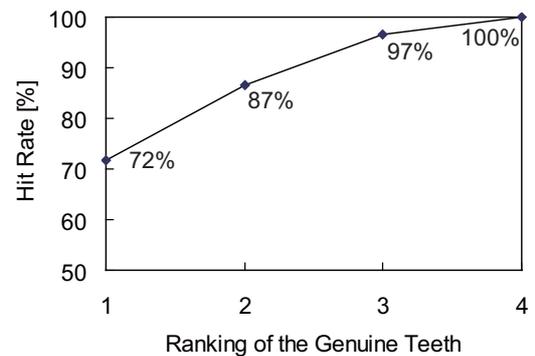


図 5: 提案アルゴリズムの Cumulative Match Curve

で、低画質な歯の X 線写真でも正確に照合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 線写真の照合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ため、高性能な照合性能が実現できる。また、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、正確な照合を行う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た照合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. Nomir, 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, Oct. 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, Aug. 2005.

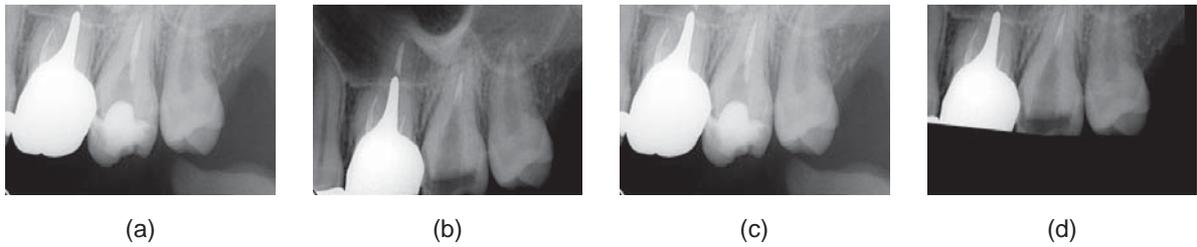


図 6: 位置合わせした画像の例 : (a) 登録画像 , (b) 入力画像 , (c) 登録画像の位置合わせ後の画像 , (d) 入力画像の位置合わせ後の画像

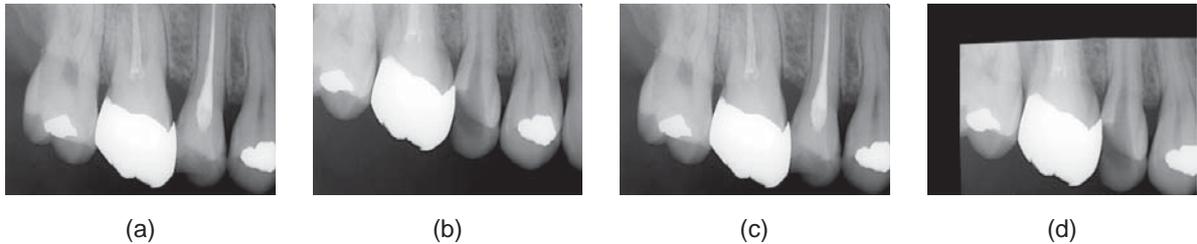


図 7: 位置合わせした画像の例 : (a) 登録画像 , (b) 入力画像 , (c) 登録画像の位置合わせ後の画像 , (d) 入力画像の位置合わせ後の画像

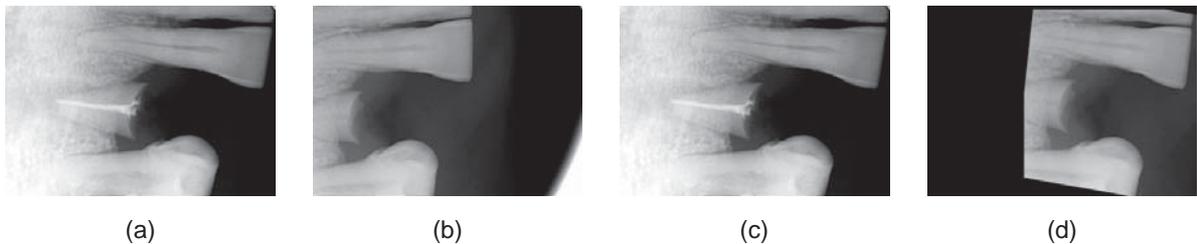


図 8: 位置合わせした画像の例 : (a) 登録画像 , (b) 入力画像 , (c) 登録画像の位置合わせ後の画像 , (d) 入力画像の位置合わせ後の画像

- [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, Aug. 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, Aug. 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," Feb. 2001.
- [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, Dec. 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, Oct. 2006.
- [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.