

3D 物体表面上での見えモデル構築による 姿勢と照明の変動に頑強な顔照合

石山 壘 濱中 雅彦 坂本 静生
NEC マルチメディア研究所

本論文では、正面から横向きまでの広範囲の姿勢において、任意の照明変動に頑強な顔照合手法を提案する。提案手法は、3D 物体表面各部の輝度の照明変動を記述する測地照明基底を計算し、姿勢に独立な物体表面の見えモデルを構築する。測地照明基底は、任意の姿勢における画像の照明変動を記述する基底画像を生成できる。3D モデル上で構築された見えモデルは、与えられた大まかな姿勢推定値から最適化によって自動的に画像に位置合わせされ、最終的なモデル当てはめ誤差を尺度として個人識別を行う。提案手法は、正面から上 45 度、横 60 度までの広い姿勢範囲において極端な照明変動を含む 200 名の大規模な顔画像データベースを用いた照合実験において、一位照合率 92.7% と高い照合性能を示した。

Constructing an Appearance Model on 3D Surface for Face Recognition under Pose and Lighting Variations

Rui Ishiyama Masahiko Hamanaka Shizuo Sakamoto
Multimedia Research Laboratories, NEC Corporation

This paper proposes a face recognition method that is robust against image variations due to arbitrary lighting and a large extent of pose variations, ranging from frontal to profile views. Our method constructs an appearance model of a 3D object on its 3D surface, and it generates the illumination subspace that can describe illumination variations of an image in arbitrary pose. Our appearance model is automatically aligned to the target image by pose optimization starting from a rough pose, and residual error of this model fitting is used as the recognition score. We tested the recognition performance of our method with an extensive database that includes images of 200 individuals under drastic illumination changes and pose variations up to 60 degrees sideward and 45 degrees upward. Our method achieved 92.7% of a first-choice success ratio.

1 はじめに

顔画像による個人識別は、他のバイオメトリクス識別に比べ、非接触で高速に画像が撮れ、使い勝手がよいのが利点である。しかし、顔は三次元物体であるため、その見え方が姿勢や照明条件といった画像の撮影条件によって大きく変動する。この撮影条件による画像変動が顔認識システムの識別性能の低下要因となっており [15]、性能を上げるため姿勢・照明を固定とすれば逆に上述した顔を使うことの利点を失ってしまう。

たとえば照明だけが変動する場合においても、それによる画像変動が人物間の個性による差異を上回って識別が困難となり [1]、安定した撮影条件では高い性能を示す顔照合システムであっても、照明変動により性能が大幅に劣化することが示されている [4]。したがって、撮影条件に影響されない頑強な顔照合システムを実現するためには、姿勢や照明条件の変動による画像変動をコンパクトに記述し、その影響を取り除くためのモデルが必要であると考えられる。

姿勢の変動は 6 自由度のパラメタとして、明解な物理モデルによって記述可能である。一方、照明条件の変動については、実世界には様々な種類の光源が無数に存在し無限の自由度を持つため、物理モデルにより少数のパラメタで記述することは困難である。しかし、従来の研究により、顔の場合には特に、画像の照明変動は見え方のモデルとして少数のパラメタで記述可能であることが示されている。

Hallinan らは、姿勢を固定して様々な照明条件での顔画像を撮影し、それらが低次元の線形空間で十分近似可能であることを実験的に示した [9]。Belhumeur らは、表面の反射特性が Lambertian である物体の固定された姿勢での任意の照明条件下での画像が、画像空間内で凸錐体 (照明錐) をなしており、その大部分が低次元の線形空間に含まれることを示した [3][7]。Basri らは、Lambertian モデルが光源の分布に対するローパスフィルタとして働き、画像の照明変動が低次元の線形空間で記述可能なことを示した。 [2]。

[3][7] では、画像の照明変動を記述する基底画像を、照合対象となる画像の姿勢において計算していた。しかし、姿勢変動を伴う顔照合を考える場合、このままでは多数の学習画像の撮影・生成と主成分分析演算を全ての可能な姿勢毎について行わなければならない、モデル構築に多大な計算が必要となる。また、姿

勢を十分細かく分割しなければ、認識性能が低下する可能性がある。

照明変動に加えて姿勢変動にも対応するため、Hager らは正面画像において照明基底を計算して見えモデルを構築し、任意の姿勢の画像をこの基準画像へ 2 次元運動モデルを用いて変形する顔追跡手法を提案した [8]。オクルージョンは統計的な異常値として処理した。Cascia らは、円筒を顔の 3 D 形状モデルの近似として用い、円筒表面座標において近似的な照明モデルを構築する顔追跡手法を提案した [6]。追跡対象となる顔画像は、テクスチャ画像座標系に射影され照明条件を補正される。

これらの手法では、姿勢・照明の補正のために、対象画像が基準となる画像空間へ射影される。これは、姿勢の変動が 20~30 度以内の場合には問題が小さいが、さらに大きい変動のある場合には、オクルージョンが生じたり、輪郭形状が大きく変わり背景との分離が困難となるなどの問題がある。

本稿では、著者らの提案した正面から横向きまでの広範囲の姿勢における、任意の照明条件下で頑強な顔照合を実現可能な手法について述べる。従来手法 [3][7][8] が画像座標系で見えモデルを構築するのに対し、本手法は 3 D 物体の表面上で画像輝度値の照明変動を記述する見えモデルを構築する [10]。3 D 表面上で計算された測地照明基底は、任意の姿勢での画像の照明変動を記述する線形部分空間の基底を生成する。 [6] とは異なり、背景分離とオクルージョンに対応するため、本手法では個人ごとの精密な 3 D 形状データを使用する。3 D 表面上に構築された見えモデルは、あらかじめ与えられた大まかな姿勢推定値を元に、自動的に照合対象画像に位置合わせされる。

本手法の用いる測地照明基底と 3 D 形状からなる見えモデルは、反射特性が Lambertian である物体の表面の各部位の画像の輝度値が、シャドウを含めて、姿勢によらず一定であることに基づいている。本手法では、3 D 形状の表面上で姿勢に依存しない座標系を定義し、表面各部位の輝度の照明変動を記述する基底 (測地照明基底) を計算しておくことで、任意の姿勢での照明錐を近似する線形部分空間を生成できる。照合対象画像の正確な顔の姿勢が未知であっても、照合対象画像とこの線形空間との距離を最小化するように姿勢パラメタを探索することにより、精密な姿勢パラメタを自動推定できる。最終的に残った距離を照合誤差として用いることで、個人識別を行う。

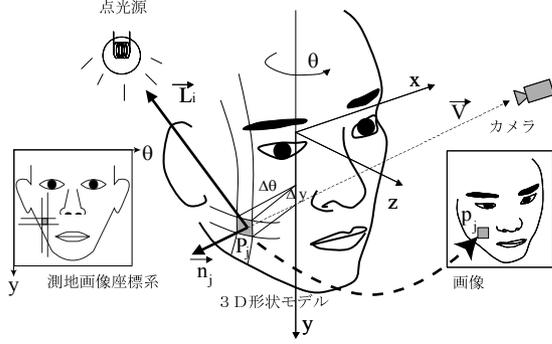


図 1: 3D表面上での見えモデルの構築

本手法の有効性を示すため、著者らは大人数かつ大幅な姿勢・照明変動を含む顔画像と3Dデータのデータベースを構築した。本データベースは200名の人物からなり、横60度、上45度までの姿勢変動を含む。本手法は、事前に精密な姿勢パラメタがわからなくても、一位照合率92.7%と高い照合性能を達成できた。

本稿ではまず、2節において本手法の用いる見えモデルである測地照明基底がどのように画像の照明変動を記述するかについて述べる。3節では、見えモデルの構築方法と、姿勢探索による顔照手法について述べる。4節では、本手法の性能を示す実験結果を示す。

2 測地照明基底

照明条件の変動による画像の変動について考察する。[3]と異なり、ここでは特定の姿勢での画像の輝度値ではなく、姿勢に独立な物体表面の輝度について考える。

物体表面を十分小さい密な小領域 $\{P_j\}$ に分割する。図1に示すように、小領域 P_j の輝度を D_j 、反射率と法線ベクトルをそれぞれ A_j 、 n_j 、無限遠点光源 i の強度と方向をベクトル L_i とその長さ、視線方向を V とする。輝度 D_j は次式でモデル化できる[12]。

$$D_j = A_j \sum_i C_j(L_i) \{ \max(0, L_i \cdot n_j) + S(L_i, n_j, V) \}. \quad (1)$$

ここで、 $\max()$ の項は完全散乱すなわち Lambertian 成分を示し、 $S()$ は鏡面反射成分を示す。 $C_j(L_i)$ はキャストシャドウを表す項で、光源 i に対し P_j が遮蔽されるなら0、そうでなければ1の値を取る。

全ての小領域 $\{P_j\}$ の輝度を縦に並べた輝度ベクトルを D 、 j 列が反射率と法線の積 $A_j n_j^T$ である行列を N とする。もし、鏡面反射 $S()$ とキャストシャドウ $C()$ の影響を無視すれば、任意の照明条件での物体表面の輝度 D は次式のように一つの照明ベクトル L^* で表すことができる。

$$D = NL^* \quad (L^* = \sum_i L_i). \quad (2)$$

これは凸形状で表面反射が Lambertian である物体の場合であり、この式は照明条件による輝度ベクトルの変動が、3次元線形空間の正の領域に包含されていることを示している[13]。

キャストシャドウ $C()$ および陰影の効果 $\max()$ を考慮すると、これらは照明による輝度 D の変動をさらに複雑なものにしてしまうが、依然として低次元の線形空間内に大部分が包含されている。これは、 D が画像と全く同じ式で表されることから、姿勢を固定した画像座標系での[3]の分析や[2]と全く同様に示すことができる。

そこで、その線形空間の n_G 個の基底を $\{G_i\}$ とすると、照明条件を表すパラメタである係数ベクトル λ によって式(1)は次式のように近似できる。

$$D = [G_1 \ G_2 \ \dots] \lambda = G\lambda. \quad (3)$$

G_k を測地照明基底と呼ぶ。式(1)の完全散乱成分は視線方向 V に非依存であるので、鏡面反射成分を無視すれば、照明変動は物体の姿勢と独立に測地照明基底 $\{G_i\}$ によって記述できる。このことから、姿勢に独立に測地座標系で見えモデルを構築することが可能である。

I を要素 k が画素 k の輝度値を表す画像ベクトルとすると、任意の姿勢における画像は次式で表せる。

$$I = \Gamma D = \Gamma G\lambda, \quad (4)$$

ここで、 Γ は姿勢と3D形状によって決まる投影行列であり、要素 (k, j) が画素 p_k における領域 P_j の占める割合を示すものとする(ただし $\sum_j \Gamma_{(k, j)} = 1$)。

ここで、ある姿勢での画像 I は、明らかに、次式で定義される行列 B の縦ベクトルによって張られる n_G 次元線形空間に包含されていることがわかる。

$$B = \Gamma G. \quad (5)$$

これらの画像ベクトル $\{B_1, \dots, B_{n_G}\}$ を、姿勢依存な照明基底と呼ぶ。これらが従来の研究[3][7]で考察された照明基底に相当する。

我々の手法では、任意の姿勢における姿勢依存な照明基底が、あらかじめ計算された測地照明基底に透視投影の座標変換を適用することで生成できる。こうして生成された姿勢依存な照明基底の張る線形空間が、照合対象画像の姿勢における照明錘を近似する。この線形空間を照明変動部分空間と呼ぶ。

3 モデル当てはめによる顔照合

本節では、前節で述べた3D形状と測地照明基底からなる見えモデルを照合対象画像に対して当てはめる、モデルフィッティングによる顔照合手法について述べる。

本手法は、照合する各個人の3D形状データと反射率データのみを学習データとして用いる。3D形状データを簡単に得るために、著者らは十分に高解像かつ高精度な(解像度 0.4 mm^2 以下、奥行き計測誤差 0.2 mm 以下)計測が可能なレンジファインダを開発した[11]。現在の型では1秒未満で3D計測が可能であり、画像を撮影するのと同様な手軽さで運用することができる。反射率の近似となる一様照明下でのテクスチャ画像も同時に撮影することが可能である。

本手法は、3D形状データと反射率データを用いて測地照明基底を計算し、各個人の顔の見えモデルを構築する。照合処理において、各個人のモデルは姿勢探索により自動的に照合対象画像に位置合わせされる。この姿勢探索処理は、照合対象画像とモデルから生成される照明変動空間の距離を最小化するパラメタ探索である。最終的な残距離を照合ペナルティとして用い、個人識別を行う。

3.1 見えモデルの構築

本節では、測地照明基底の計算について述べる。まず、3D表面上に測地座標系を定義する。測地座標系は、物体形状全体を、オクルージョンなしに均一に分割するべきであるが、ここでは簡単のため一例として円筒座標系を用いることにする。顔の場合には円筒座標系によりほとんどオクルージョン無しに顔表面全体を記述できる。

図1と式(6)に示すように、3Dデータ (x, y, z) の表面をその円筒座標 (θ, y) を量子化することにより小領域 $\{P_{s,t}\}$ に分割する。ただし、 $\theta = \tan^{-1} \frac{z}{x}$ である。

$$P_{s,t} = \{(x, y, z) \mid s\Delta\theta \leq \theta < (s+1)\Delta\theta, \\ t\Delta y \leq y < (t+1)\Delta y\} \quad (6)$$

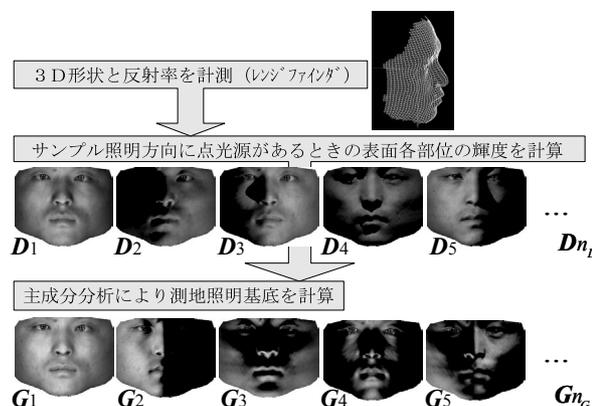


図2: 見えモデル構築処理の流れ

図2に見えモデルの構築手順を示す。ここで、 D は全ての小領域 $\{P_{s,t}\}$ の輝度を集めた列ベクトル(測地画像)とする。照明の方向 $\{L_i\}$ を一様にサンプリングして無限遠点光源を仮定することにより n_L 種類の照明条件を設定し、式(1)およびキャストシャドウ生成処理によって各照明条件での輝度ベクトル $\{D_i\}$ を計算する。鏡面反射成分 $S()$ については、本手法では無視する。ここで用意する照明サンプル数 n_L は十分大きくする必要があるが、後述する予備実験により必要十分な値を決定した。

生成した n_L 個の輝度ベクトルに対して主成分分析を適用し、共分散行列 $W = [D_1 \ D_2 \ \dots \ D_{n_L}]$ の固有ベクトルとして測地照明基底 $\{G_i\}$ を計算する。最後に、必要十分な数 n_G 個の測地照明基底を、固有値の大きい順に選択し、記憶しておく。 n_G の値は、後述する実験のように固有値の累積寄与率を目安として決定することができる。

3.2 照合対象画像へのモデル当てはめ

提案手法では、構築された各個人の顔の見えモデルを照合対象画像に当てはめ、そのモデル当てはめ誤差によって個人識別を行う。このモデル当てはめ処理は、照明補正および姿勢探索の2段階で行う。照明補正処理は、与えられた姿勢における画像の姿勢に依存した照明基底を生成し、照明変動部分空間と照合対象画像の距離を計算する処理である。姿勢探索は、その距離を最小化する姿勢パラメタを探索する処理である。画像中の顔の位置姿勢が正確に既知である場合にはこの姿勢探索は不要であるが、一般の状況では精密な姿勢パラメタは未知であるため、前処理として行う顔検出において得られる大まかな姿

勢パラメタを元に、精密な姿勢推定を行う。各人物のモデルに対する姿勢探索後の最終的な距離をマッチングのペナルティとして、個人識別を行う。

3.2.1 照明補正

図3に照明補正処理の流れを示す。照合対象画像 I_q の姿勢パラメタ r が与えられれば、画素 p_k と3D表面の小領域 P_j の対応関係がカメラモデル(透視投影)により容易に得られる。この対応関係を求める処理は、照光処理を省いたコンピュータグラフィクスによる一枚の画像生成に等しい。この対応関係として行列 $\Gamma(r)$ が得られ、姿勢 r における画像空間の姿勢依存な照明基底が式(5)により計算できる。

$$B_i(r) = \Gamma(r)G_i \quad (7)$$

ここで、 $\{B_i(r)\}$ は直交基底になっていないため、式(4)において線形最小二乗法により係数ベクトル $\lambda(r)$ を求め、照明条件の補正された画像 $I_c(r)$ を生成する。

$$I_c(r) = \sum_i \lambda_i(r)B_i(r), \quad (8)$$

$$\lambda_i = \arg(\min |I_q - I_c(r)|). \quad (9)$$

ここで、 $I_c(r)$ は照明変動部分空間内で照合対象画像に最も近い画像である。残誤差 $e(r) = |I_q - I_c(r)|$ が照合対象画像と姿勢 r において生成される照明変動部分空間の間の距離である。姿勢の変動に伴い照明補正画像中の顔領域の画素数は変動するため、この距離は画素数で正規化する。本手法では、各画素の輝度値の平均絶対誤差を正規化距離 $d(r)$ として用いる[14]。

3.2.2 姿勢探索

実応用場面では、照合対象画像中の顔の姿勢を、あらかじめ正確に知ることはできないため、顔照合システムは姿勢と照明を同時に補正しなければならない。本手法では、照明補正が簡単な線形演算で行えることから、繰り返し処理によるパラメタ探索により精密な姿勢推定を行う。

顔照合の前段階で行われる顔検出処理によって、顔の大まかな姿勢の推定値 r_0 が与えられていると仮定する。この大まかな推定値 r_0 から始めて、照合対象画像と、モデルから生成される照明部分空間の間の正規化距離 $d(r)$ を最小にする6自由度の姿勢パラメタ探索を行う。この最適化処理は姿勢パラメタ r を変えながら前節で述べた照明補正処理を繰り返す

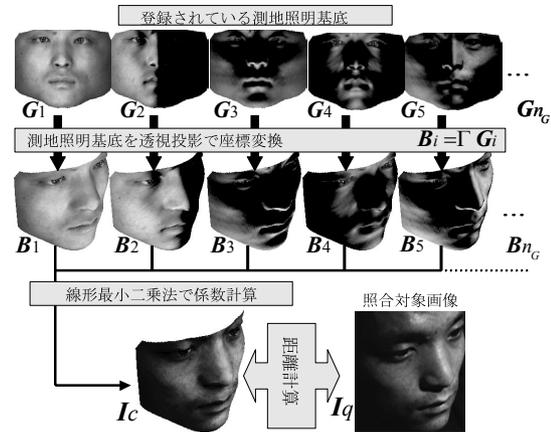


図3: 照明補正処理の流れ

処理である。本手法では以下のような単純な探索アルゴリズムを用いる。

1. 与えられた初期姿勢 r_0 での距離 d を式(8)により計算する。
2. 3-9の処理を $d(r)$ が収束するまで繰り返す。
3. 6自由度の r のパラメタ j を選び4から9を繰り返す ($j = 1, \dots, 6$)
4. δ_j を、 j 要素にあらかじめ決めたステップ幅、他はゼロの値を持つベクトルとして $d(r + \delta_j)$ を計算する。
5. $d(r + \delta_j) \geq d(r)$ であれば7へ。
6. $d(r + \delta_j) < d(r)$ であれば、姿勢 r を $r + \delta_j$ で更新し、 d が減少する間、4から繰り返す。 d が減少しなくなったら3へ戻る。
7. $d(r - \delta_j)$ を計算する。
8. $d(r - \delta_j) \geq d(r)$ であれば、3へ。
9. $d(r - \delta_j) < d(r)$ であれば、姿勢 r を $r - \delta_j$ で置き換え、 d が減少する間、7から繰り返す。減少しなくなったら3へ。

この姿勢探索が姿勢 r^* で収束した場合、その姿勢での距離 $d(r^*)$ を、その人物の対象画像に対するマッチングのペナルティとして用いる。

4 性能評価実験

本節では、実験により、測地照明基底と3D形状からなる見えモデルの有効性と、モデル当てはめによる顔照合手法の照合性能を評価する。

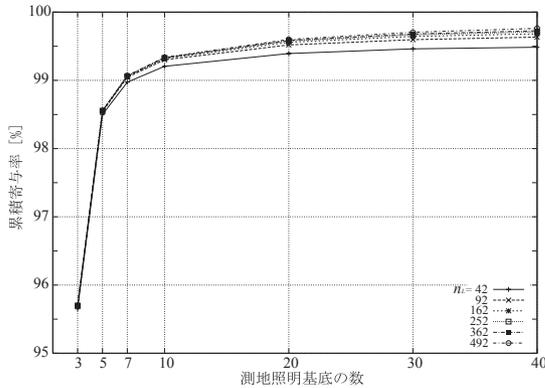


図 4: n_L を変えたときの照明変動に対する測地照明基底の累積寄与率

4.1 画像変動の記述性能の評価

測地照明基底の計算過程において、無限の数の輝度ベクトル（照明方向のサンプル）を用意する代わりに、どの程度の数のサンプル数があれば十分かを実験的に評価した。3.1 節で述べた測地照明基底の計算を、照明サンプル数 n_L を変えながら繰り返し行い、結果が安定するのに十分な最小の n_L の値を評価した。図 4 に、各 n_L の値において計算された測地照明基底の固有値の、492 方向の照明下での輝度ベクトル群に対する累積寄与率を示す。それぞれのプロットが $n_L = 42, 92, 162, 252, 362, 492$ での結果を示している。

本実験により、162 方向のサンプルをとればそれ以上の数のサンプルを用いた場合とほぼ同じ結果が得られることがわかった。また、測地照明基底は 10 次元程度まで記憶しておけば、輝度の照明変動の 99% 以上を記述可能なことがわかった。

次に、測地照明基底から生成された姿勢依存な照明基底が、十分な精度でその姿勢での画像変動を記述できるかどうかを評価した。実験では、実応用で考えられる限り最大の姿勢変動の場合について評価した。

図 5 に、実験を行った横 60 度、上 45 度までの姿勢変動を示す。これらそれぞれの姿勢について、コンピュータグラフィクスにより 492 方向の照明の下での画像をキャストシャドウを含めて生成し、それらの画像全体に対する、生成された姿勢依存な基底群によって張られる照明変動部分空間の寄与率を求めた。

図 6 に、用いた測地照明基底の数と、そこから生成された照明部分空間のテスト画像に対する寄与率を示す。どの姿勢の画像においても、寄与率は測地

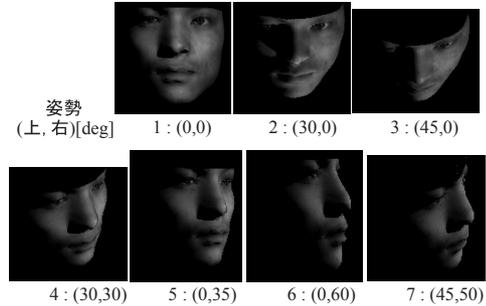


図 5: 見えモデルの性能評価に用いた各姿勢でのテスト画像

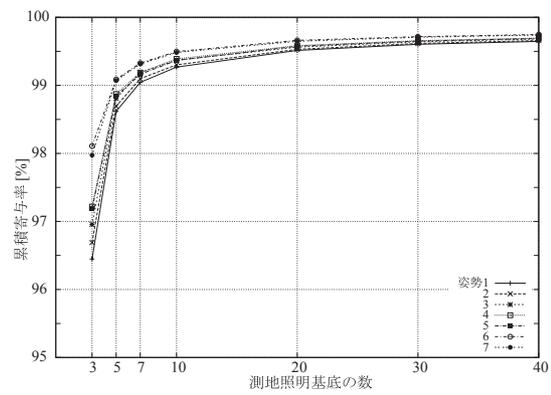


図 6: 各姿勢において生成される照明変動部分空間のテスト画像群に対する累積寄与率

画像座標系で評価した測地照明基底の輝度に対する寄与率より減少しておらず、10 次元の測地照明基底があれば、任意の姿勢でキャストシャドウを含む照明変動の 99% 以上を記述可能なことが示された。

4.2 顔照合性能の評価

200 名の人物からなる 14000 枚のテスト画像と 3D データを含む大規模データベースを用いて、本手法の顔照合性能の評価実験を行った。テスト画像は図 7 に示すように 10 種の大幅な照明変動と、正面から横 60 度・上 45 度までの大幅な姿勢変動下で撮影した画像である。3.1 節で述べたように 200 名の各人物について見えモデルを構築し、各テスト画像へのモデル当てはめを行い、画像の再現誤差が最小となる人物を本人として判定した。

4.2.1 姿勢探索の初期値

姿勢探索の初期値は次のようにして与えた。両目・鼻・口の端点および中央を基準点として、その 2 次元および 3 次元の位置を 3D 形状データとテスト画

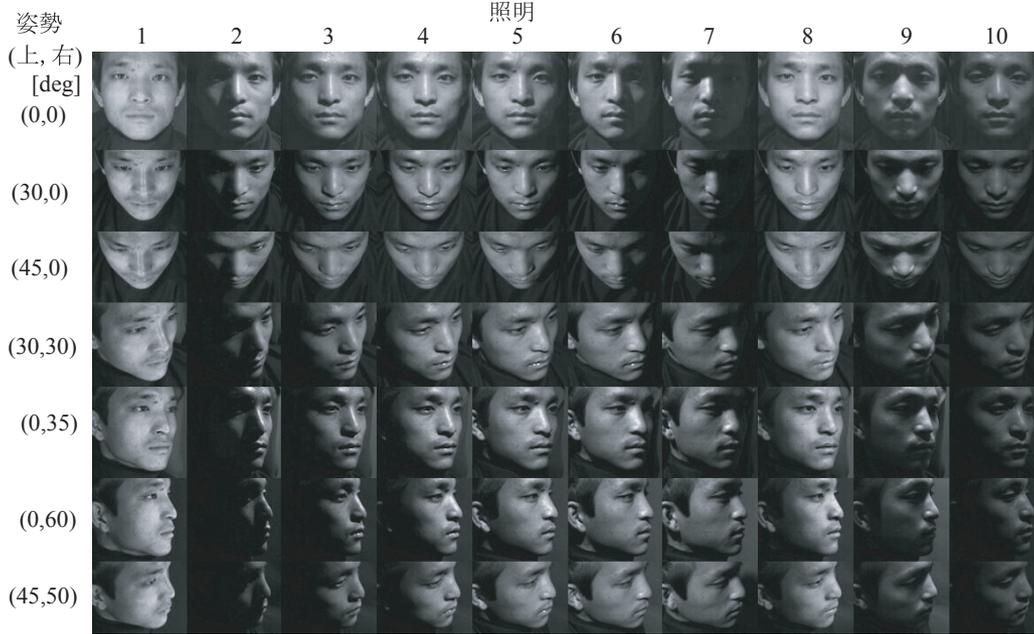


図 7: 実験用データベースに含まれる 200 人中の 1 人分の照合テスト画像 70 枚。

像上に、姿勢により見えない点を除き手で入力した。これらの点の位置は、数画素程度の入力誤差を含んでいる。このデータから、[5] の透視 n 点問題の解法を用いて計算した姿勢パラメタを、姿勢推定の初期値として用いた。この姿勢計算法は、対応点から任意の 3 点の組み合わせを選んで姿勢を計算し、残りの基準点について、計算で求めた画像上の位置と入力された位置の誤差の総和が最小となる解を選択する。このようにして求めた姿勢パラメタは、手で正確に画像が一致するように求めた正解姿勢データと比較して平均 4.2 度の誤差を持っていた。このパラメタを初期値として、姿勢探索を行い、照合を行った。

4.2.2 照合実験結果

前節で与えた初期姿勢推定値をそのまま用いて照合した場合と、姿勢探索を行った結果で照合した場合の照合実験結果を表 1 に示す。測地照明基底は 10 次元まで使用した。初期値の姿勢は正しい姿勢に対し平均で 4.2 度の誤差があり、1 位照合率は 75.1% と低かったが、姿勢探索により姿勢誤差は平均 1.7 度に減少し、照合率も 92.7% と高い性能が得られた。

姿勢のずれは、本人のモデルを用いた照明補正の精度を悪化させ、照合スコアの低下を招く。図 8 に示す例では、初期姿勢では背景が顔領域に含まれてしまい、照明補正結果の画像に不正な影が現れてい

表 1: 顔照合実験結果

姿勢	1 位照合率 [%]	平均姿勢誤差 [deg]
初期推定値	75.1	4.2
姿勢探索後	92.7	1.7



図 8: 初期姿勢推定値および姿勢探索後の姿勢において生成された照明補正画像

る。しかし、姿勢探索処理を行うことで、右の画像のように正しい照明補正が可能となった。

5 まとめ

本稿では、著者らの提案した 3D 形状上での見えモデル構築とそれを用いた顔照手法について述べた。本手法は、3D 物体の表面上において、表面各部位の輝度値の照明条件による変動を記述する測地照明基底を計算し、姿勢に独立な見えモデルを構築する。本モデルは 3D 形状データと測地照明基底からなり、任意の姿勢で撮影された照合対象画像に対

し、その画像空間での照明錘を近似する姿勢依存な照明基底を生成し、照合対象画像の任意の照明変動を補正できる。実応用においては、照合対象画像の正確な顔の姿勢は未知であるが、本手法は大まかな初期値から自動的に正確な姿勢パラメタを求め、高い照合性能を得ることができる。

実験により、本モデルにおいて測地照明基底をわずか 10 次元程度まで求めておけば、任意の姿勢での 99%以上の照明変動を記述可能であることが示された。また、本手法は 200 名の人物からなり、横 60 度・上 45 度の大幅な姿勢範囲で極端な照明変動を含む 14,000 枚のテスト画像に対し、92.7%と高い照合性能を示した。

本手法の見えモデルでは、物体表面の反射特性のうち姿勢によって大きく変動する鏡面反射成分を無視している。また、照明基底を表面全体に対して求めているため、鼻の下にできるキャストシャドウなど、特定の照明条件で生じる局所的な強い影が再現できないといった課題が残っている。また、姿勢探索処理や画像比較方法の改善による照合性能向上を今後行っていきたい。

謝辞 本研究のために実験用の顔画像をご提供いただいた皆様に感謝します。

参考文献

- [1] Y. Adini, Y. Moses, and S. Ullman. Face recognition: The problem of compensating for changes in illumination direction. *IEEE Trans. PAMI*, 19(7):721–732, 1997.
- [2] R. Basri and D. Jacobs. Lambertian reflectance and linear subspaces. *Proc. of ICCV 2001*, pp. 383–390.
- [3] P. N. Belhumeur and D. J. Kriegman. What is the set of images of an object under all possible illumination conditions? *Int. J. Computer Vision*, 28:245–260, 1998.
- [4] D. M. Blackburn, M. Bone, and P. Phillips. Evaluation report. *Facial Recognition Vendor Test 2000*, February 2001. <http://www.dodcounterdrug.com/facial-recognition/default.htm>.
- [5] P. Blicher and S. Roy. Fast lighting/rendering solution for matching a 2d image to a database of 3d models: "lightsphere". *IEICE Trans. Fundamentals*, E82(1), 1999.
- [6] M. L. Cascia, S. Sclaroff, and V. Athitsos. Fast, reliable head tracking under varying illumination: An approach based on registration of texture-mapped 3d models. *IEEE Trans. PAMI*, 22(4):322–336, 2000.
- [7] A. S. Georghiadis, P. N. Belhumeur, and D. J. Kriegman. From few to many: Generative models for recognition under variable pose and illumination. *Proc. of 4th Int. Conf. on Face and Gesture Recognition*, pp. 277–284, 2000.
- [8] G. D. Hager and P. N. Belhumeur. Efficient region tracking with parametric models of geometry and illumination. *IEEE Trans. PAMI*, 20(10):1025–1039, 1998.
- [9] P. W. Hallinan. A low-dimensional representation of human faces for arbitrary lighting conditions. *Proc. CVPR*, pp. 995–999, 1994.
- [10] R. Ishiyama and S. Sakamoto. Geodesic illumination basis: Compensating for illumination variations in any pose for face recognition. *Proc. of ICPR2002*, 4:297–301, 2002.
- [11] R. Ishiyama, S. Sakamoto, and J. Tajima. A new face recognition system with robustness against illumination changes. *Proc. of IAPR Workshop on Machine Vision Applications*, pp. 127–131, 2000.
- [12] S. K. Nayer, K. Ikeuchi, and T. Kanade. Surface reflection: Physical and geometrical perspectives. *IEEE Trans. PAMI*, 13(7):611–634, 1991.
- [13] A. Shashua. On photometric issues in 3D visual recognition from a single 2D image. *Int. J. Computer Vision*, 21(1):99–122, 1997.
- [14] 濱中, 石山, 坂本. 測地照明基底を用いた顔照合における陰影部の影響について. *FIT 2002*, (I-33), 2002.
- [15] 赤松. コンピュータによる顔の認識—サーベイ—. *電子情報通信学会論文誌*, J80-D-II(8):2031–2046, 1997.