

顔画像認識のための仮想部分空間における照明条件推定 A estimation of lighting condition in virtual subspace for face recognition

松尾 賢治†
Kenji MATSUO

橋本 真幸†
Masayuki HASHIMOTO

小池 淳†
Atsushi KOIKE

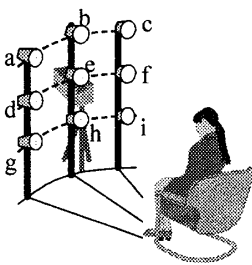
1. まえがき

近年、モバイルバンキングやオンライントレードなど、携帯電話を介したオンライン決済が可能となった。一方、より堅牢なセキュリティ確保の手段として、個人の普遍的な生体情報を用いたバイオメトリクス認証に注目が集まっている。特に昨今のカメラ付き端末の普及により、指紋センサ等の特別なデバイスが必要とせず、顔画像によるバイオメトリクス認証を実現できる可能性が出てきた。しかし、携帯電話は屋内・屋外とシーンを限定せず利用されるため、撮影環境が一定ではない。そのため、携帯電話で顔画像認識を行う場合、照明変動の影響により認識精度が極端に低下するという問題があった。このような問題を解決する顔画像認識技術の一つとして部分空間法が挙げられる。部分空間法では、あらかじめ様々な条件の下で顔画像を撮影し、それらの分布を最も良く近似できる低次元の部分空間を求め、辞書として登録する。様々な照明変動の要素を含んだ部分空間との類似度を計算して判定を行うことにより、照明変動に耐性のある顔画像認識が行える。

しかし実際には、特別な施設でもない限り、照明条件を様々に変更して顔画像を撮影することは困難である。したがって、我々はこれまでに、照明変動を特徴空間上でモデル化し、そのモデルを使用して、撮影された顔画像に付加された照明変動が一種類に限定された場合でも、様々な照明変動の要素が含まれた部分空間を仮想的に作成する方法を提案し、認識精度に一定の改善効果を得た^[1]。ただし、これまでの提案法は、顔画像を撮影する際に、ある特定の照明条件に設定しておく必要があった。そこで本論文では、顔画像を撮影する際の照明条件を特定せず、撮影された顔画像に付加された照明条件を推定し、入力画像ごとに照明変動のモデルに補正を加える方法を提案する。

2. 仮想部分空間法

本論文では、全て大きさと位置に関して既に正規化済みの正面顔画像が得られた場合を仮定する。また、本論文では図1に示す $\ell=0\sim 8$ の9種類と、それらに含まれない $\ell=9\sim 20$ の12種類の照明条件を用いる。このうち正面から照射された $\ell=0$ を基準となる照明条件と定義する。



ℓ	sw	ℓ	sw	ℓ	sw
0	e	9	a,b,c	15	c*
1	c	10	d,e,f	16	f*
2	f	11	g,h,i	17	i*
3	i	12	c,f,i	18	a*
4	h	13	b,e,h	19	d*
5	g	14	a,d,g	20	g*
6	d				
7	a				
8	b				

* means long distance between person and lighting

図1 実験環境と照明条件

Fig.1 Experimental environment and lighting conditions

2.1. 照明基準空間

照明変動をモデル化するために、あらかじめ L 種類の照明条件下で P 人の顔画像 $y_{p\ell}$ ($p=1, 2, \dots, P, \ell=1, 2, \dots, L$)を撮影する。 $y_{p\ell}$ に付加された照明変動成分は人物 p の基準照明画像 $y_{p\ell=0}$ との差分で表される。この照明変動成分 $y_{p\ell} - y_{p\ell=0}$ を P 人 L 種類集め、そこから全員に共通する主成分を取り出すことによって、照明変動を表現した照明基準空間が低次元で作成される。具体的には、次式で定義される共分散行列 C_p とその人物間平均 C を求める。

$$C = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P C_p, \quad C_p = \frac{1}{L} \sum_{\ell=1}^L (y_{p\ell} - y_{p\ell=0})(y_{p\ell} - y_{p\ell=0})^T \quad (1)$$

C から求まる固有ベクトルを列ベクトルとする行列を Φ_n ($n < PL$)とする。それらが照明基準空間を張る正規直交基底となる。実際に、 $P=10, L=8$ とし、図1に示す $\ell=1\sim 8$ の照明条件を使用して照明基準空間を作成した。前の実験において、8種類程度の照明変動を用いて照明基準空間を作成することで、そこに含まれない $\ell=9\sim 20$ の照明変動が付加された顔画像であっても精度良く認識可能であることが確認されている^[1]。これはスポット光等を除き、大局的な照明変動が単一照明の線形和で表現できることを意味する。また、照明条件 $\ell=1\sim 8$ で撮影された顔画像をそれぞれ照明基準空間上に投影すると、その特徴ベクトルの配置関係は人物の違いに依存せず類似した形状を示す^[1]。図2に示すように、ある人物(a), (b)の特性と、(c)は $P=10$ 人の平均について、固有値が大きい軸から順に三次元の特徴ベクトルで示した照明基準空間の中心 $\bar{y}_{\ell=0}$ を各人物の基準照明画像 $y_{p\ell=0}$ の平均とすると、 $y_{p\ell=0}$ を基準とする照明変動の成分 $\Delta y_{p\ell}$ は次式で表せる。これを照明変動モデルとする。

$$\Delta y_{p\ell} = \{\Phi_n \Phi_n^T (y_{p\ell} - \bar{y}_{\ell=0}) + y_{p\ell=0}\} - y_{p\ell=0} \quad (2)$$

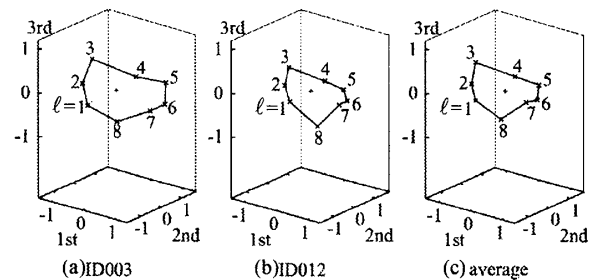


図2 照明基準空間上の照明変動モデル

Fig.2 Lighting model on lighting canonical space

2.2. 照明変動モデルを使った仮想部分空間作成法

従来の部分空間法は N 枚の顔画像 x_i ($i=1, 2, \dots, N$)を撮影し、その自己相関行列 R から低次元の部分空間を導出する。

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i x_i^T \quad (3)$$

これまでに提案した方法では、基準照明条件 $\ell=0$ に設定して、その下で顔画像を N 枚撮影する必要がある。そのそれぞれの顔画像 x_i から、 P 人各人の照明変動モデル $\Delta y_{p\ell}$ を用

†株式会社 KDDI 研究所

KDDI R&D Laboratories Inc.

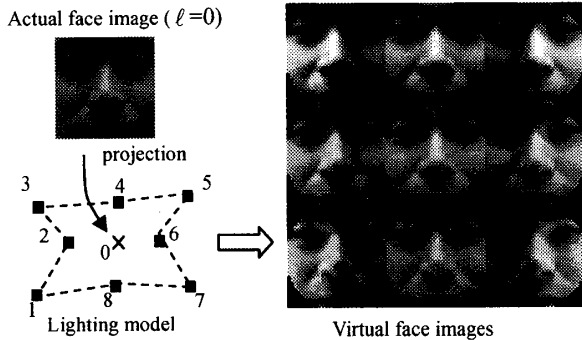


図3 仮想的に作り出された別照明条件下の顔画像
Fig.3 Virtual face images deduced with lighting model

いて、次式に示す通り別の照明条件下の顔画像 x_{ipt} を L 枚ずつ仮想的に作り出すことができる。

$$x_{ipt} = x_i + \Delta y_{pt} = x_i + \Phi_n \Phi_n^T (y_{pt} - \bar{y}_{\ell=0}) \quad (4)$$

結果の一例を図3に示す。別の照明条件下の顔画像を精度良く再現できていることが確認できる。これらの仮想的に作り出された顔画像から自己相関行列を求め、その固有ベクトルを導出することによって、様々な照明変動の要素が仮想的に付加された部分空間が作成される。

3. 提案方式

高度なセキュリティを目的としたシステムでは、ユーザが認証機関に向向き、特定の基準照明条件下で顔画像を撮影して辞書を登録することが考えられ、これまでの提案法は有効に働く。しかし、お遊び感覚の簡易なアプリケーションに対しては、認証機関に向向きする必要は無く、ユーザ各人が携帯電話で顔画像を撮影し、辞書を遠隔で登録するシステムが適している。後者の場合、基準照明とは異なる照明変動が付加された顔画像が撮影されるため、これまでの提案法は照明変動モデルの基準からずれ有効に働かない。したがって、入力画像の照明条件を特定せず、どのような照明条件下で撮影された顔画像が入力された場合でも、精度が高い仮想部分空間を作成するために、照明変動モデルの基準からのズレを補正する方法を提案する。

撮影された顔画像 x_i を照明基準空間へ投射し、その正射影 x_i^* を求める。このとき、 Δx_i は照明基準空間に直交する成分であり、照明変動成分は含まず個人の特徴を含んだ成分であると考えられる。ここで、照明基準空間上で顔画像 x_i は $x_i^* + y_{pt=0}$ に位置するため、式(2)で定義した照明変動成分の中心 $\bar{y}_{\ell=0}$ ではなく、新たにその正射影の位置を基準とした照明変動成分 Δy_{pt} を求め、照明変動モデルとする。

$$x_i^* = \Phi_n \Phi_n^T (x_i - \bar{y}_{\ell=0}) \quad (5)$$

$$\Delta y_{pt} = \left\{ \Phi_n \Phi_n^T (y_{pt} - \bar{y}_{\ell=0}) + y_{pt=0} \right\} - (x_i^* + y_{pt=0}) \quad (6)$$

最終的に、顔画像を撮影する際の照明条件が特定されない場合の仮想顔画像 x_{ipt} は次式で求められる。

$$x_{ipt} = x_i + \Delta y_{pt} = x_i + \Phi_n \Phi_n^T (y_{pt} - x_i) \quad (7)$$

4. シミュレーション

計算機シミュレーションを行い、提案法の有効性を検証した。図1に示す21種類の異なる照明条件 $\ell=0 \sim 20$ で21人の人物の顔画像を撮影し、 32×32 の解像度に正規化した。これらを照明基準空間モデル化用10名のグループAと認識精度測定用11名のグループBに分けた。グループAの

表1 実画像と仮想画像との二乗誤差

ℓ	Prop.	Conv.	ℓ	Prop.	Conv.
0	164825	105208	9	293902	2531481
1	154491	753753	10	239756	1371009
2	140995	843773	11	375312	5708135
3	160720	1197986	12	300500	3276147
4	166906	2060097	13	279678	4658270
5	151930	693216	14	299841	2260916
6	140814	638405	15	234152	269989
7	143401	405242	16	217396	357463
8	164496	1284506	17	235854	507816
			18	224491	283155
			19	214819	300094
			20	258031	539574

$P=10$ 人、 $L=8$ 種類の照明条件 $\ell=1 \sim 8$ の下で撮影された顔画像を用い、式(1)の照明基準空間の共分散行列 C を導出した。次に、照明基準空間に含まれないグループBの各人物について、照明条件 $\ell=0 \sim 20$ の下で撮影された各顔画像を用いて、式(4)に示したこれまでの提案法(従来法)と式(6)に示した今回新たに照明変動モデルに補正を加えた提案法(提案法)のそれぞれにより、仮想顔画像 x_{ipt} を作成した。仮想顔画像 x_{ipt} が実際に撮影された顔画像をどの程度忠実に再現されているかを調べるために、実際に撮 $\ell=1 \sim 8$ の下で撮影された顔画像との二乗誤差を測定し、表1にまとめた。表より、従来法で基準照明となる $\ell=0$ を除いて、従来法によって作成された顔画像よりも、提案法によって作成された顔画像の方が、二乗誤差の値が小さく、より忠実に実際の顔画像を再現できていることが確認できる。

仮想画像が実画像に近づいたとは言え、それが識別精度に結びつかない可能性がある。そこで次に、従来法と提案法で識別精度を測定した。照明基準空間に含まれないグループB11名の各人物について、照明条件 $\ell=0$ の下で撮影された $N=50$ 枚顔画像を用い、式(3)により自己相関行列 R を、同時に従来法および提案法により仮想的に作成された顔画像を用いて自己相関行列 R' を導出した。これらの自己相関行列 R 、 R' のそれぞれから固有ベクトルを求め、従来の部分空間、仮想的な部分空間を作成する。グループB11名について、21種類の照明条件 $\ell=0 \sim 20$ 下で各5枚ずつ撮影された、一人当たり合計105枚の認識実験用画像に対して、各部分空間が示す類似度 S を測定し、識別精度を求めた。部分空間が8次元までの識別精度を表2にまとめた。提案法は従来法と比較して特に低次元で良好な識別精度を示す。

表2 識別精度 [%]

	1	2	3	4	5	6	7	8
R' (Prop.)	80.4	81.1	80.7	80.3	80.0	80.8	81.2	81.6
R' (Conv.)	46.1	63.0	75.4	81.1	79.7	81.0	82.2	80.9
R	44.7	45.5	47.0	47.3	48.3	47.8	48.7	48.7

5. まとめ

これまでに提案した仮想部分空間法は、ある特定の照明条件下に設定して顔画像を撮影する必要があった。本論文では、顔画像を撮影する際の照明条件を特定せず、入力画像ごとに照明変動のモデルに補正を加える方法を提案した。シミュレーションの結果、従来法およびこれまでに提案した方法よりも高精度で顔画像認識が行えることを確認した。

参考文献

[1] 松尾, 橋本, 小池, “仮想部分空間による照明変動を抑制した顔画像認識,”信学技報 PRMU2004-37 pp.25-30 (2004).