

Title	appearance ベースとmodel ベースによる眼鏡顔画像からの眼鏡なし顔画像の推定
Author(s)	齋藤, 康之
Citation	
Issue Date	2002-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/924
Rights	
Description	Supervisor:小谷 一孔, 情報科学研究科, 博士

博 士 論 文

appearance ベースと model ベースによる 眼鏡顔画像からの眼鏡なし顔画像の推定

指導教官 小谷 一孔 助教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報処理学専攻

齋藤 康之

2002 年 3 月 15 日

目次

1	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	顔の個人性と表情	5
1.3	顔画像研究の現状	12
1.4	顔画像研究における問題点（顔領域に眼鏡などの不要領域がある場合）	19
1.5	画像内の遮蔽された物体の原パターンを推定する方法の研究例	22
1.6	本研究の目的	25
1.7	本論文の構成と各章の概要	28
I	appearance ベースによる眼鏡なし顔画像の推定	31
2	基底ベクトルを用いた眼鏡なし顔画像の推定	33
2.1	序言	33
2.2	基底ベクトルを用いた眼鏡なし顔画像の推定方法	35
2.2.1	PCA による基底ベクトルの導出	35
2.2.2	眼鏡なし顔画像の推定	35
2.3	基底ベクトルを用いた眼鏡なし顔画像推定実験	36
2.3.1	実験条件	36
2.3.2	眼鏡なし顔画像推定実験結果	40
2.3.3	推定顔画像への下部領域合成	43
2.3.4	表情顔画像への適用	45
2.4	本手法による眼鏡なし顔画像の推定精度の評価	52
2.4.1	求めた基底ベクトルの妥当性の評価	52
2.4.2	推定した眼鏡なし顔画像による推定精度の定量的評価	56

2.5	結言	61
3	非線形射影による眼鏡なし顔画像の推定	63
3.1	序言	63
3.2	非線形射影による眼鏡なし顔画像の推定方法	67
3.3	眼鏡フレーム領域の抽出	71
3.4	非線形射影による眼鏡なし顔画像推定結果	71
3.4.1	画像平均輝度による置換	72
3.4.2	線形補間による置換	72
3.5	結言	82
II	model ベースによる眼鏡なし顔画像の推定	84
4	パラメトリック眼鏡フレームモデルを用いた眼鏡なし顔画像の推定	86
4.1	序言	86
4.2	パラメトリック眼鏡フレームモデル	88
4.3	眼鏡フレーム領域の抽出	94
4.3.1	眼鏡フレームの傾き推定	94
4.3.2	ブリッジおよびプロップの抽出	98
4.3.3	リムの抽出	100
4.3.4	エンドピースおよびテンプルの抽出	102
4.4	眼鏡フレーム領域内画素の輝度値の置換	103
4.4.1	線形補間	103
4.4.2	偏差の加算	105
4.4.3	平滑化	109
4.5	実験結果および考察	109
4.6	結言	113
5	対称構造物体に収束する複数の動的輪郭モデルを用いた眼鏡なし顔画像の推定	116
5.1	序言	116
5.2	対称構造物体に収束する Snakes の設計	117

5.2.1	Snakes の初期輪郭	117
5.2.2	Snakes のエネルギー関数	117
5.2.3	制御点の移動と収束判定	120
5.2.4	例外処理	121
5.3	Snakes による眼鏡フレーム領域抽出実験	123
5.3.1	Snakes の収束結果	123
5.3.2	眼鏡フレーム領域抽出特性の改善	131
5.4	GA による最適荷重係数の探索	134
5.5	GA を適用した場合の Snakes の収束結果	136
5.6	結言	145
III	各方法の特性と応用	147
6	各方法の特性	148
6.1	序言	148
6.2	各方法での特性比較	148
6.2.1	眼鏡フレーム輪郭の途切れ	149
6.2.2	リムなし眼鏡への対応	149
6.2.3	眼鏡フレームの影の影響	150
6.2.4	眼鏡フレームと目領域の重なり	151
6.2.5	眼鏡フレームの輝度値の影響	152
6.2.6	顔画像の正規化	152
6.2.7	顔の水平方向の回転	155
6.2.8	眼鏡以外の遮蔽物体への対応	158
6.3	各方法の用途	168
6.4	結言	169
7	眼鏡なし顔画像推定の応用例	171
7.1	序言	171
7.2	表情眼鏡顔画像の合成	171
7.2.1	眼鏡顔画像を入力とした場合の表情眼鏡顔画像の合成	171
7.2.2	眼鏡フレーム処理による忠実な表情眼鏡顔画像の合成	172

7.3	顔部品抽出（目領域の抽出）	175
7.3.1	フラクタル次元値	175
7.3.2	眼鏡顔画像に対するフラクタル分析結果	176
7.3.3	眼鏡なし顔画像推定結果に対するフラクタル分析結果および目領域抽出結果	176
7.4	顔画像を用いた個人識別	180
7.4.1	重判別分析法による個人識別法	180
7.4.2	個人識別結果	181
7.5	結言	182
IV	結論	185
8	本論文の結論	186
8.1	本論文の総括	186
8.2	今後の検討課題	194
A	眼鏡 ～その歴史と機能～	196
B	眼鏡による顔画像への影響	200
B.1	眼鏡による顔の見え方の物理的影響	200
B.2	眼鏡による顔の見え方の心理的影響	206
	謝辞	210
	参考文献	212
	本研究に関する発表論文	222

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

人と人とのコミュニケーションにおいて人の顔が重要な役割を果たすことは日常経験しているし、心理実験を通じても確認されている [1]。また、後に例示するように表情合成や顔画像解析を用いたシステムが実用に供されているものもあり、人の顔を用いたユーザインタフェースやコミュニケーション、グラフィックス生成、セキュリティなど、人の生活に役立つ応用が急速に広まってきている。これら顔画像による合成や分析を機械によって自動的に行うには、人の顔からどのような情報を引き出さなければならないのか？ 思いつくままに列挙してみる [2]-[12]。

- 顔の個人性
 - * その人が誰であるか、どういう人か
- 個人の属性
 - * 性別、年齢、人種など
- 顔の表情
 - * 心理状態、感情、健康状態など
- 相手に伝えようとする意図
 - * 非言語による意図の伝達など

顔を機械で処理するには，顔画像を撮影して画素情報を得るか，レーザーなどを使用して 3 次元的な形状情報を得るのが一般的であるので，これらと上記情報との関係を明らかにすることにより，目的とする顔画像応用が実現できる．では，どのようにすれば関係を明らかにできるであろうか．顔画像について考えてみる．画像解析や認識では輝度や色のパターンの統計的性質を求めて，その特徴との関係を求めたり意味づけしたりしている．あるいは，画像処理によって輪郭や特徴点を抽出して画像自身の特徴を求め，それと上記特徴との関係を求めることもできる．「関係」を明らかにできれば，顔画像から上記に列挙した情報を推定できるので，必要な顔画像応用を実現できる．これらは顔画像処理や顔画像解析，顔画像合成などと呼ばれている．

顔画像解析の例

顔に現れている情報を解析し，その特徴量を用いたシステムの例として，顔画像を用いた個人識別によるセキュリティ管理や login interface などがある．例えば，コンピュータの本人以外の使用を制限するための退席・着席によるキーボードロック制御（図 1.1）や，コンピュータの使用開始時に使用頻度の高いアプリケーションを自動的に起動することができる [17, 18, 19, 20] ．



図 1.1: 個人識別によるコンピュータの使用制限（アルファデータ社：メールガードマン）

顔画像合成の例

画像内の顔形状を変形したり，輝度変換を施すなど，合成した顔画像を用いたシステムの一つに，遠隔コミュニケーションの円滑化支援を目的とした顔画像を用いた human interface がある．これは，顔画像そのものを送るのではなく，顔表面の動き成分だけを送信し，受

信側で目や口などの形状や表情を合成する，いわゆる「知的符号化通信」あるいは「分析合成符号化通信」と呼ばれている [13, 14]．また，商品内容の問い合わせや予約案内などの顧客対応の機器の interface においては，応対用の標準顔画像を用いることで，顧客側も応対側も常にほぼ同一のサービスを授受できる．合成する顔画像は，リアリティのある人物顔画像だけでなく，コンピュータグラフィクス，アニメキャラクタ，似顔絵を用いるなど，用途やコストなどに応じて選択されている [15, 16]．

図 1.2 に顔画像の表情合成例を示す．

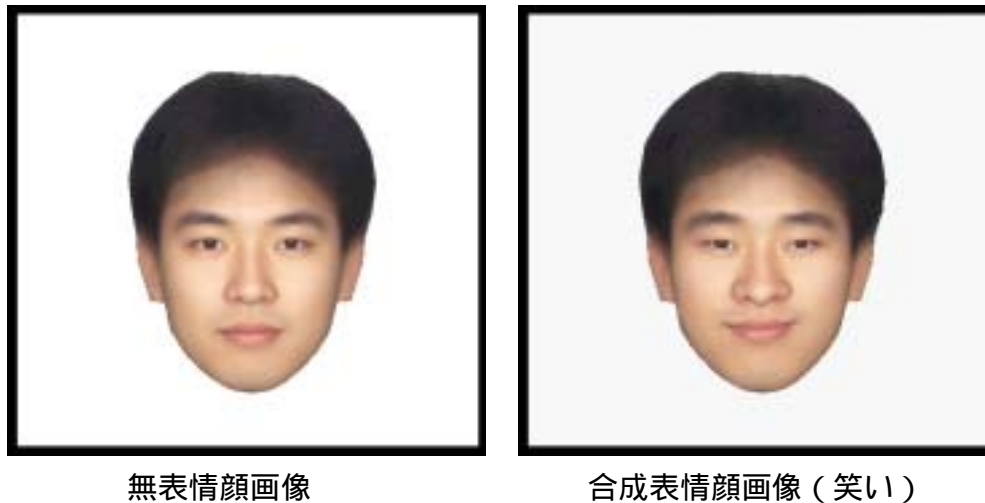


図 1.2: 表情顔画像の合成例

ところで，画像内の顔の領域は上記の情報を与える部分ばかりであろうか？ また，顔の領域全てが寄与するのであるだろうか？ 我々が日常，顔をどのように見ているかなどを参考に考えてみる．

- 「目は口ほどにものを言い」といわれるように，目の部分は表情や個人性など顔情報の多くを有している．
- 口は喋るときに動くだけでなく，とがらせたり開けたりして感情や心理状態も現れる．
- 鼻は興奮すると鼻翼が広がったり，嫌悪感を示すときにしわが現れる．また，鼻が高い，あるいは団子鼻など個人性の情報を有している．
- 耳は動かないので表情は現れない．耳介形状には個人性がある．

- 頬は感情が高ぶったときに赤らむし、笑顔などでは変形するので表情の情報を有している。
- 顎や頬の輪郭は、丸顔や細長い顔というように個人性の情報を有している。
- 頭、頭髪は個人性の情報を有しているが、長髪の人でも散髪をすれば変形するので、人の個人性あるいは固有性はあまり強いとは言えない。

今度は顔画像処理において、上記の情報の取得を邪魔するものを考えてみる。

- 眼鏡は目の周辺を覆い、目の部分の特徴抽出の邪魔となる。
- 髭は口や頬、顎を覆うので、これらの形状や色の抽出を妨げる。
- 顔の大きな傷は個人性を与えるし、傷による顔の印象など表情にも影響を与えるが、目や口、頬などの近くにあると、これら重要な顔部品の形状や色の検出に悪影響を及ぼす場合がある。
- 頭髪は目や耳を覆うことがあり、目や耳の部分の特徴抽出の邪魔となる。

髭や傷、頭髪は顔の一部分であり、これらを除いて顔画像情報を得ると、個人性の情報を除いてしまうことになり、顔画像処理や顔画像解析、顔画像合成の意図（目的）が損なわれる危険がある。一方、眼鏡は付け外しや付け替えが可能であるので個人性は低く、除いても個人性や表情特徴が失われることはない（厳密に言うと、眼鏡によって表情の印象が変わることがあるので、眼鏡を除去すると表情特徴の一部が変化するが、これは顔本来の表情ではなく、道具を用いて作られた表情と見なして除いて考える）。

本研究は眼鏡をつけた顔画像（眼鏡顔画像）から眼鏡のない顔画像を推定する方法を与える。ただし、上述のように眼鏡除去により顔の個人性や表情特徴が失われてはならないので、これらを保存しつつ顔画像処理や顔画像解析、顔画像合成の妨げとなる眼鏡成分を除去することを条件とする。また、サングラスのように目の領域を完全あるいはほぼ完全に遮蔽して見えなくしている場合は、目の領域の情報は既にほぼ失われてしまっており、眼鏡を除去して眼鏡なし顔画像を推定しても必要な情報は生まれないので眼鏡除去の意味はないと考えて検討の対象から外している。

一方，個人性が多少失われることは許容して髭や傷などを除いてほしい場合もある。例えば，お見合い写真などいわゆる「よそ行き」の顔画像を得たい場合である。これについても本研究では言及し，与えた手法が顔画像中のより一般的な不要部分をどの程度除去できるか試みる。

本章では，本論文の序論として，続く節において上述した顔の個人性と表情についてさらに詳述し，顔画像情報としてこれらが最も重要であることを主張する。さらに，顔画像研究の現状と，問題点について示し，本研究の目的および目指す目標を示す。

1.2 顔の個人性と表情

人の顔から得られる情報のうち，我々が日常的に用いている主要なものは個人性と表情である。例えば，対話において，個人性は，相手が誰であるかを知る手がかりとなり，表情は，相手の感情を知る手がかりとなる。

まず，顔の個人性を次の2つに大別する。

- 静的個人性（静止している顔の見え方としての個人性）

- ＊ 顔の輪郭や顔部品の形状および配置など

- 動的個人性（顔表面の動きの個人性）

- ＊ 口，頬，眉などの動き，くせなど

前者は，顔の造作によるものであり，後者は顔表面の動かし方によるものである。いずれも人の顔の個人性として重要であるが，順序として静的なものを検討した後に動的なものを検討するのは順当であるので，本研究では前者の静的個人性を考える。動的個人性については，本研究の次の段階に考えたい。

では，顔の個人性の特徴が，どの部分にどのように現れるのか考えてみる。

1. 顔の外形状（顔輪郭）

縦横幅： 顔の大きさ，細長さ

えら形状： 丸型，三角型，四角型，五角型

顎形状： 丸み（尖り）

2. 顔部品の形状

眉：	長さ，太さ，丸み
目：	横幅，細さ，一重／二重まぶた，丸み
鼻：	高さ，横幅，鼻翼形状
口：	横幅，縦幅（厚さ），隆起形状
頬：	隆起形状
額：	縦幅，横幅，髪が生え際形状
耳：	縦幅，横幅，耳介形状

3. 顔部品の配置

- 顔輪郭からの距離
- 他の顔部品との相対距離

4. 色

眉：	濃さ，色
目：	瞳の色，充血
口：	しわ，色
肌：	肌の色，ほくろ，傷，あざ，しみ，そばかす（鼻，頬，耳，額）

5. 髪，髭

- 頭髪
- 口髭，顎髭

6. 装飾品

- 眼鏡，ピアス，イヤリングなど

これらのうち，1 から 3 までは，一部は整形外科手術により変えることができるものの，子供の成長期を除けば短期間にはほとんど変化しない．4 については，化粧や手入れになどにより変化させることができる．5 については，付け髭やかつらによっても変化させることができる．6 については，自由に付け外しができるばかりか，他人のものを着用することもできるため，個人固有の特徴とは言えない面がある．したがって，厳密な意味で人物特

有の顔の個人性と位置づけることができるのは，1 から 3 までの特徴であり，これらの個人性は人物を特定する場合に重要な要素となる．

しかし，4 から 6 の特徴は，個人特有の特徴ではないと安易に切り捨てることはできない．特に，あざや傷などは同一のものが他の人物に含まれることはほとんどないため，意図的に隠さない限り，個人特有の特徴を十分表すと言える．

頭髪は本人が生やしているものであり一定期間は類似した状態に保つ．かつらは常用することが多く，付け替えることはほとんどない．また，付け髭を用いることはまれで，ほとんどの場合は髭はその人物が実際に生やしており，顔の一部を形成している．

装飾品は，一定期間は同じものを使い続けるということからすると，それは一つの個人の特征となり得る．しかしその一方で，自由に付け外しができるばかりか，他人のものを用いることもできるため，この特徴は個人性を示す一つの手がかりに過ぎず，その特徴から個人を特定することは正確さに欠け，顔から装飾品を除外して扱っても個人性は損なわれない．

以上をまとめる．

- 厳密な意味で顔の個人性と言えるのは，顔輪郭の形状，顔部品の形状，顔部品の配置である．
- 色，頭髪，髭，装飾品の特徴は，個人を同定する上での手がかりとなるが，正確性には欠ける．特に，装飾品を顔から除外しても個人性は損なわれない．

対話をする上では，相手が誰であるかを知る必要がある場合とない場合がある．例えば，必要な情報を知りたいとき，要求が満たされさえすれば，相手が誰であるかは問わない．一方，ある情報のある人物に伝えなければならない場合は，当然ながら，本人と対話しなければならないので，相手が件の人物であることを確認する必要がある．今日において情報伝達手段は多様化しているが，Mehrabian らの研究によると，言語，音声，表情のうち，感情の 55 % は表情によって表現され，次いで音声は 38 %，そして言語は 7 % としており，直接対話の重要性が示されている [1]．そして，発話内容と表情で伝えようとした意図に食い違いがある場合，人は表情によって伝えられる意図の方を優先的に選択する．このように，表情は相手の真意を知る手がかりとなるため，非常に重要である．

顔の表情について，次の 3 つに大別する．

1. 顔表面の変形

- 顔面筋の伸縮，息の蓄積，舌の押し，手などによる顔表面の変形

2. 肌の色

- 赤らんでいる（興奮していたり恥じている，発熱）
- 青ざめている（心配・恐怖，悪寒）

3. 汗

- 苦痛（肉体的刺激）
- 焦り（精神状態）

これらの表情のうち，最も頻繁に生じるのは顔表面の変形（特に顔面筋によるもの）であるので，本研究ではまず顔表面の変形を考える．肌の色や汗による表情については今後検討していく予定である．

では，顔表面の変形による表情の特徴は，どの部分にどのように現れるのだろうか．

眉：	位置，傾き
目：	輪郭形状，開き方，周辺皮膚の隆起およびしわ
鼻：	しわ
口：	輪郭形状，縦幅，横幅，圧力
頬：	隆起形状，しわ
額：	しわ

なお，耳，頭髮，髭，傷，装飾品そのものには表情は現れない．

これら顔部品の変形は，感情に強く関連していることは日常的に経験していることであり，Ekman らは，表情に関して次の 3 つの重要な提唱・検討を行っている [4] ．

1. FACS による顔の記述

Ekman らは，顔の各部位の動作内容を AU(Action Unit) と呼ばれる表情制御の基本単位により定義し，AU の組み合わせとその強度により表情を記述する FACS(Facial Action Coding System) を提案した．表情の記述の指針がなかったため，表情は「～のような顔」

のように抽象的に記述せざるを得なかったが、FACS により表情を定性的に記述できるようになった。

2. 基本 6 表情の提唱

各個人において表情の表出の仕方には個性があるが、その表出には類似した傾向がある。Ekman らは、人の表情の分類や記述方法を検討しており、「基本 6 表情」を提唱した。人の表情は、喜び、驚き、悲しみ、怒り、恐れ、嫌悪の 6 つの感情カテゴリに分類することができ、また、他の感情カテゴリの表情との混合によって表情が作られていると考えた。例えば、思いがけない吉報を聞いたときの表情は、驚きの目と笑い口との混合によって形成される。表情の分類を行うときは、表情表出の個人性ではなく、感情カテゴリに共通する特徴が表出しているか否かにより判断される。

3. 表情表出の人類普遍性の検討

Ekman らは、西洋文化圏と文化的接触のないニューギニア高地の住民の表情の表出の仕方が自分たちと同様であることを確かめることにより、表情の表出の仕方は、民俗に依らず普遍性が高いと結論づけた。

もし仮に、各人物毎に、あるいは民俗などのグループ毎に表情の意味が異なっているならば、表情を画一的に扱うことはできないが、Ekman らのこれらの研究から、表情は記述・分類することができ、かつ、その方法は普遍性があると考えられる。そして、表情の分類可能性と普遍性があるからこそ、人は相手の表情から感情を推定することができる。

先に、装飾品そのものには表情は現れないと述べたが、果たして表情に影響は全く与えないのであろうか。イヤリング、ピアスなどは、表情の印象よりも性格的な印象（明るさ、朗らかさなど）に対して影響すると考えられる。一方、眼鏡の形状や色につられて目の印象が変化することは日常的に経験していることである。図 1.3 は、眼鏡をかけていない笑い顔の画像に、眼鏡フレームを合成したものである。眼鏡があることにより、表情がより柔和に見えるだろう。このように、眼鏡は表情に影響を与えるが、人物の表情そのものを変えるのではなく、表情表出の度合いに対して作用する。すなわち、例えば、笑っている顔に眼鏡を付加しても、怒っているようには見えず、笑いの度合いがより強調される。そして、眼鏡の付け外しによって人物本来の表情は何ら変化しない。

眼鏡をかけた顔について，人物本来の表情を得たい場合と，眼鏡込みでの顔の表情を得たい場合の2通りが考えられる．前者の場合には眼鏡を外しても差し障りは生じないし，後者の場合も，まず本来の表情そのものを分析し，その結果に対して眼鏡の影響を補整すれば良いと考えられる．ただし，後者の場合は，眼鏡の表情に対する影響の特性を解析しておく必要がある．



図 1.3: 眼鏡フレーム形状による表情の印象変化

上記した顔の個人性や表情の情報は，髪，髭，装飾品などにより隠されたり，特徴の現れる部位の周囲が覆われることにより，取得しにくくなることがある．

- 髪により影響を受ける部位
 - * 額，眉，目，耳，顔の輪郭
- 髭により影響を受ける部位
 - * 口，顔の輪郭，鼻（鼻下の輪郭）
- 化粧により影響を受ける部位
 - * 眉，目，口，頬
- 眼鏡により影響を受ける部位
 - * 目，眉，鼻（鼻筋），頬
- ピアス，イヤリングにより影響を受ける部位

* 耳

これらは、顔に対して不要なもの（不要領域）と考えて良いか？ これらを顔画像内から除去するとどのようなことが生じるか考えてみる。

頭髪や髭は、これらそのものには表情が現れないため、除去しても表情には影響しない。しかしながら、かつらや付け髭を用いる特殊な場合を除いて本人が生やしているものなので、これを除去すると個人性が失われてしまう。

また、化粧は顔の表面に直接塗られているため本来の肌の色と化粧とを分離することは困難である上、化粧をする範囲は目蓋、頬、口唇など広範囲に渡るため、化粧をしている部分を除去すると顔の大部分の領域が失われる。

眼鏡、ピアス、イヤリングは本人の顔の一部ではなく付加物であり、顔に対して部分的に影響し、これを取り除くことによって、本人の個人性・表情そのものは変化せず、人物本来の特徴が浮き彫りになる。したがって、これら装飾品は顔情報に影響することなく除去できる。

眼鏡などの装飾品は除去しても顔の情報に対して影響は与えないが、他のものについては顔の情報も失われてしまうため、本来獲得したい情報が得られなくなる危険性がある。したがって、これら不要領域のすべてを画一的に顔画像から除去することはできない。しかしながら、顔の情報も失われることを許容してまでもこれらの不要領域を除去したい場合がある。例えば、お見合い写真などいわゆる「よそ行き」の顔画像を得たい場合や、個人性を失ってまでも表情情報だけを取得できればよい場合である。このため、どの不要領域を除去して良いかは、目的に応じて選択しなければならない。

本節の内容を以下にまとめる。

- 顔の個人性と表情は我々が日常的に用いている主要な顔情報であり、相手が誰であるか、どのような感情であるかなどを知る重要な手がかりとなる。

* 個人性：厳密な意味で本人の顔に特有な特徴と言えるのは、顔輪郭形状、顔部品の形状、顔部品の配置である。色、頭髪や髭、装飾品はある程度変化させることができるため人物固有とは言えず、個人を同定す上では手がかりになるが正確性に欠ける。

- * 表情：表情は分類可能であり，普遍性があるため，相手の感情を読み取る手がかりとなる．眉や目などの顔部品に表出し，頭髮や装飾品には表情は現れないが，装飾品は表情表出の度合いを変化させうる．
- 顔情報の獲得を妨げるものは顔の不要領域と考えられるが，除去することにより個性・表情までも失われてはならない．ただし，目的によっては除去による影響を許容する場合がある．

1.3 顔画像研究の現状

前節では，人の顔から得られる個性や表情などの情報が何に役立つか，そしてそれが顔のどの部分から得られるかなど，顔情報の本質と特性を述べた．本節ではこれら顔画像情処理の研究を

- 顔画像合成
- 個人識別・顔画像検索
- 顔部品抽出
- 表情解析

の4つに整理，分類し，これまでどのような顔画像研究が重要で多くの興味を集めているかなど，研究の現状を調べ，紹介する．

表情合成

顔や頭部の形状は3次元構造モデルによって表現するのが一般的であり，このモデルを変形させることにより表情を合成する．表情合成を行う方法は，2つに大別できる．

- 物理モデルによる方法
 - * スプリングフレームモデルを用いる方法 [21]
 - * ホモトピー掃引法による方法 [22]
- 幾何学モデルによる方法
 - * ワイヤースケルトンモデルに規則的な幾何学的変形を直接施す方法 [13, 14, 23]

橋本らは、スプリングフレームモデルを用いた表情合成を提案している [21]。これは、顔の皮膚下にある表情筋と呼ばれる筋肉およびそれに連動して動く皮膚表面を物理的なモデルとして取り扱い、筋肉・骨の動きを基に運動方程式を解くことによって皮膚表面にあたるワイヤースケルトンモデルを動かす方法である。この物理モデルでは、忠実度の高い表情顔画像が作成可能であり、筋肉の配置を変更することでさまざまな顔形状に対応することができる。その一方で、筋肉の配置や各種パラメータの調整が難しく、また計算量が膨大になる。

足立らは、ホモトピー掃引法により、3次元口唇表情を合成する方法を提案している [22]。ホモトピー掃引法は、位相幾何の分野で定義されたホモトピーと、CAD の分野で使われる掃引の技術を統合した一般化円筒生成法であり、これにより輪郭の連続変形を制御し、実時間口唇表情システムを構築した。

崔ら、金子らは、ワイヤースケルトンモデルに規則的な幾何学的変形を直接施して表情を作成する方法を提案している [13, 14, 23]。この幾何学モデルでは、意図する表情を合成するための規則はワイヤースケルトンモデルの三角形パッチの頂点の移動によって定義されるため扱いが容易であるが、個人独特の表情を作成することが難しい。

表情筋は互いに連動して動くため、三角形パッチを個々に独立して変形させると実際の顔の表情とは大きく異なったものとなる。また、ワイヤースケルトンモデルの三角形パッチの頂点数は 800 点以上もあるため、それら頂点を個別に扱うことは現実的ではない。そのため、表情変化を起こさせるためのワイヤースケルトンモデルの変形には、ある規則を持たせ、三角形パッチをグループ化する必要がある。このような表情の記述は、Ekman らの提案した FACS(Facial Action Coding System) を用いることが一般的である [4]。FACS における表情制御の基本単位は、AU(Action Unit) と呼ばれ、例えば、AU1 は「眉の内側を上げる」、AU2 は「眉の外側を上げる」などのように各 AU 毎に動作内容が定義されている。Ekman らは、AU の組み合わせとその強度により表情を記述した。この AU に対し、ワイヤースケルトンモデルの変形規則を対応づけ、AU の各パラメータを操作することにより、容易に表情合成を行うことができる。

その他、マウスによるワイヤースケルトンモデルの顔へのフィッティングや、スライダー操作による AU パラメータの変更を実装したアプリケーションが公開されている [24]。

個人識別・顔画像検索

顔画像を用いた個人識別では、入力パターンを特徴ベクトルで表現し、人物カテゴリの各々を代表する辞書ベクトルとの距離が最も小さくなるカテゴリをもっともらしい人物と

判定するアプローチを良く見かける．各個人識別方法の違いや特徴は，顔パターンをどのような特徴で表現するかによるところが大きい．方法を特徴によって分類し，代表的な研究例を挙げる．

1. 顔造作の幾何学的特徴の記述（造作ベース）

- 顔部品の特徴点を抽出することにより，各顔部品の形状や位置関係を数量化した特徴ベクトルを用いる方法 [25, 26, 27, 28]

2. 大局的なパターン特徴の照合（パターン整合法）

- 顔画像全体の輝度パターンのマッチングにより識別する方法 [29, 30]
- 重判別分析法およびクラス特徴に基づく固有空間法により識別する方法 [31]

3. パターンの変動に対する不変特徴量の抽出

- 輝度パターンを，平行移動に対して不変なフーリエスペクトルに変換した後に主成分分析によって空間周波数領域パターンに対する次元圧縮を行って識別に用いる特徴ベクトルを求める方法 [32]

4. 局所的な部分パターンの照合およびその配置

- 顔部品を抽出し，顔部品ごとのマッチングおよびその位置関係により識別する方法 [33]

金出は，顔画像の輪郭線を求め，スリット内の投影曲線の分布により顔部品の抽出を行い，顔の幅と目の間隔の比など 16 個の顔の特徴パラメータにより識別を行っている [25, 26, 27, 28]（この研究は日本における顔画像処理の草分けと言われている）．その結果，20 人の人物の異なる時，異なる場所で撮影した 2 枚ずつの顔画像に対して 75 % の正答率を得ている．ただし，前段の顔部品抽出において，顔に眼鏡や髭を含む場合には解析が失敗する．

小杉は，顔画像をブロック分割して各々の輝度値を平均化したモザイク画像をニューラルネットワークに入力して識別を行わせている [29]．表情変化，年齢変化，取得画像の焦点ぼけに強いが，特に眼鏡の縁が太い場合に識別誤りを生じる．

上野らは，等濃度の画素が連結されて表現される閉ループの集合として等濃線を求め，その分布に基づく顔画像の識別を行っている [30]．不精髭程度ならば識別結果にはほぼ影響しないが，髭が濃くなったり髪型が大きく変化した場合にはその影響を受ける．また，眼

鏡についても対応しているが、手法の性質からすれば眼鏡フレームの縁の太さやレンズの照明反射に影響を受けるものと思われる。

黒住らは、重判別分析法 (MDA) による個人識別を行っている [31]。各人物の複数の表情顔画像により人物クラスを構成し、MDA により他の人物クラスとの距離 (級間分散) と対象人物クラス内での距離 (級内分散) の比を最大にする条件の下で基底ベクトルを求め、入力画像を基底ベクトルで張られる部分空間に射影して最も距離の近いクラスを識別結果とした。また、級間分散と級内分散の差を最大にする条件の下で基底ベクトルを求めるクラス特徴に基づく固有空間法を新たに提案している。いずれも 96 % を越える正答率となっているが、眼鏡顔画像については正答率は 20 % 程度に低下する。

赤松らは、濃淡画像のマッチングによる正面顔画像の認識について、顔の造作を基準点として切り出された照合パターンを、識別に有効な低次元の特徴ベクトルとして表現して識別を行っている [32]。この方法は、照合パターンの切り出し、頭部の姿勢変化、照明条件の変化に対して頑健である。その一方で、眼鏡の有無に対して脆弱という面がある。

Brunelli らは、顔部品抽出は金出の方法 [25] と同様であるが、幾何学的特徴だけでなく、顔部品を部分パターンとして切り出してマッチングを取る方法についても検討している [33]。テストデータに対し、幾何学特徴に基づく方法では 90 % の正答率、テンプレートマッチングでは全てについて正答した。後者については、正規化を必要とするので 2 つの手法は一長一短と言える。

顔画像検索も、個人識別と同様な方法により実現される。ただし、顔画像データベース内に対象人物の顔画像が複数含まれている場合は、データベース中の画像のうち入力画像に最も近いものだけではなく、ある閾値の範囲内の画像も解とする必要があるが、この閾値の設定によっては対象人物ではない顔画像も抽出される。そのため、閾値は、

- 利便性重視 (できるだけ多くの画像を解とする)
- 正確性重視 (対象人物の画像だけを抽出する)

のように、目的に応じて設定する必要がある。

顔部品抽出

顔画像から目や口などの顔部品を抽出する方法は探索に用いる部品特徴の種類により、次の 3 つに分類される。

- 顔部品の輝度パターンを探索する方法

* テンプレートマッチングによる方法 [34]

- 画像特徴により探索する方法

* 画像輪郭の水平・垂直方向への可算投影法による方法 [25, 26, 27, 28]

* フラクタル分析による方法 [35]

- 顔部品形状を探索する方法

* Snakes を用いる方法 [36]

土居らは、画像内の顔領域を抽出した後に、探索領域を限定して目の輝度パターンを探索する方法を提案している [34]。画像全体から探索するよりも効率良く顔部品の抽出を行った。照明やカメラと被検者との距離をある程度揃えることにより、正規化の問題を緩和して3段階の顔領域テンプレートを用いて切り出しを良好に行っている。

金出らは、顔画像の画像輪郭を水平・垂直方向に可算投射し、スリット内の投影曲線の出現位置により顔部品を探索する方法を提案している [25, 26, 27, 28]。正面を向いている顔（眼鏡なし、髭なし）の場合、91%の正答率を得ている。

本田らは、画像の輝度値によって形成される濃淡面の複雑さの尺度としてフラクタル次元値を求め、次元値の大きな領域を顔部品領域と推定して抽出している [35]。顔部品の配置関係を考慮することにより誤抽出を防いでいる。しかし、方法の特性から、眼鏡や傷などの影響を受けやすく、顔部品同士が融合することがある。

横山らは、水平・垂直方向への可算投影法により顔部品の位置決定を行った後に、画像輪郭へ収束する2本の開いたSnakesを用いて顔部品の形状抽出を詳細に抽出する方法を提案している [36]。顔部品の位置決定までが良好に実施されれば概ね抽出は成功するが、髭、ほくろ、にきび、しわなど顔表面の局所的な輝度値の変化の影響を受けて誤抽出が起こる。

表情解析

表情解析を行う方法は、以下の4つに分類される。

1. 表情筋の動きに着目して表情の分析を行うもの

- オプティカルフローにより表情筋の動きを検出する方法 [37]

- FACSのAUパラメータを推定して表情を分析する方法 [13]

2. 顔の特徴点の抽出を行い、その移動量から表情を推定するもの

- 顔部品形状から表情を分析する方法 [38]
- 顔表面に貼付したマーカの移動量を求める方法 [39]

3. 顔部位の変化を大局的に記述するもの

- ポテンシャルネットを用いる方法 [40]
- 空間周波数に基づく方法 [41]
- テンプレートマッチングによる方法 [42]

4. 時系列を導入したもの

- HMM(Hidden Markov Model) を用いて時系列情報を扱う方法 [43]
- リカレントニューラルネットワークを用いる方法 [44]

Prochazka らは、皮膚の動きをオプティカルフローにより表現し、表情筋の動きを推定して表情認識を行っている [37]。10 人の被検者について、無表情から 5 つの表情（喜、哀、驚、恐怖、怒）の満面表情の顔までの 10 フレームをオプティカルフローの計算に用い、KL 展開により求めた 8 つの基底ベクトルから分離度を求め、オプティカルフローを 3 層のニューラルネットワークにより識別実験を行い、全体で 85 % の識別率を得ている。

崔らは、顔画像から頭部全体の動きと表情による顔部品の動きとを分離し、顔部品の動きに基づいて AU パラメータを推定し表情識別・合成を行っている [13]。各 AU の特徴に着目して AU を順次判別する方法と、形状近似に注目して AU の組み合わせを一括して推定する方法について検討している。額のしわなどテクスチャの変化が大きすぎると、合成表情の印象が変化してしまう。

小林らは、自動的に顔部品の輪郭を抽出する方法を提案している [38]。従来研究では、表情が変化した場合には対応していなかったが、弾性輪郭モデルを用いて基本的な顔部品の輪郭形状を保ちつつ、画像エネルギーにより輪郭を追跡する方法を開発している。また、教師なし自己組織化ニューラルネットワークである CALM(Categorizing and Learning Module) に無表情時の形状に対する移動量を与え、表情の分類および認識は最大で 75 % の正答率を得ている。

石川らは、顔に貼ったマーカの移動量をニューラルネットワークに入力し、その出力として表情を推定している [39]。顔表情の定量的に測定するために顔面上にマーカを貼付し、そのマーカの無表情時からの移動量を求めた。怒りの表情などのように、口唇を閉じたま

ま唇全体を上げるなど、筋肉モデルでは対応できない表情があるものの、規則に乗っ取っている場合には良好な推定および表情合成を行って行っている。

松野らは、ノードが2次元グリッド状に相互にばねで連結されたポテンシャルネットを用い、画像からの力によるネットの変形を表情と対応づけた[40]。主観評価実験を通じて、表情モデルネットは表情情報を表現していることを示した。そして、認識率は4表情（笑い、驚き、怒り、悲しみ）全体で90%を得ている。

武藤らは、空間周波数成分を用いて顔表情の認識と再合成を実時間で行うシステムを提案している[41]。画像から自動的にトラッキングされた目・口周辺の正方領域について、FFTにより空間周波数成分を求め、この低域成分から顔器官の形状（FACSに基づくAUのパラメータ値）をニューラルネットワークを用いて推定した。顔表情を再合成して原画像との印象を比較した結果、学習には用いていない表情に対しても原画像と類似した印象を再合成できている。

村田らは、顔の向きや傾き、瞬きによる形状の変化や環境変化に強い目、口領域の抽出方法を提案した[42]。これは、まず環境に応じて基準となる肌色の色相値を決定し、肌色領域の抽出を行う。抽出された領域内にて、4方向面特徴と色情報によるテンプレートマッチングを行うことにより目、口を抽出する。また、テンプレートを自動更新することで形状の変化に対応している。

大塚らは、隠れマルコフモデル（HMM）を用いて基本表情ごとに特徴ベクトルの時間変化のパターンを学習させて認識のためのモデルを作成している[43]。平均で93%を超える識別率を得たが、特に個人差の大きい表情の場合は認識率が低下している。

小林らは時系列表情情報も扱うことのできるリカレントネットワークを構築し、表情認識を行っている[44]。まず、無表情からある表情、または、ある表情から無表情への顔表情の連続表示シーケンスを被検者により評価してもらい、評価結果にヒステリシス性があることを示し、構築したリカレントネットワークの認識結果も人間の場合と同様にヒステリシス性があることを示している。

1.4 顔画像研究における問題点（顔領域に眼鏡などの不要領域がある場合）

前節に挙げたように顔画像より情報を抽出，分析，合成，検索する研究は多岐に渡っており，各研究における問題点も様々ある．それらを整理，分類して列挙することは重要であるが，本研究は冒頭の背景の部分でも述べたように顔画像中にある不要領域が顔画像処理に問題を起こし，これを除くことを目指しているため，本節では顔画像処理研究における不要領域の問題を中心に論じる．これは，

- 眼鏡着用者が人口の半数を越えており，眼鏡などの不要領域の問題はレアケースとしては扱えない [45, 46] ．
- 髭や傷，頭髮などによる顔領域の遮蔽も問題となる ．
- 顔画像処理において顔画像中の不要領域は顔情報そのものを遮蔽するから，顔情報を抽出，分析，合成，検索するのに共通かつ直接的に影響し，問題となる ．

などの理由から，これを議論することは重要であり，十分妥当であると考えている．ただし，背景の部分でも論じたように，髭や傷，頭髮などは個人性に関する情報を持っているとも見なすことができ，安易に除去できるものではないので，眼鏡とは別に考える ．

以下に各顔画像研究分野において眼鏡などの不要領域がどのように影響，問題となっているかを示す ．

表情顔画像の合成

表情顔画像の合成には，多数の三角形パッチから構成されたワイヤースケルトンモデルを用いて無表情顔画像から表情顔画像を合成する方法がよく用いられている [13, 14, 47] ．ただし，各三角形パッチの頂点数は 800 点以上もあるため，各々を個別に変形させていくのは現実的ではなく，顔の動きから外れたものとなるので，顔の表情動作を記述するために心理学者 Ekman らの考案した，Action Unit[4] に基づいて複数の三角形パッチをグループ化することで操作性を向上させている ．

表情合成をするとき，顔画像内に眼鏡があると，図 1.4 に示すように本来変形するはずのない剛体の眼鏡フレームまで顔表面の動きに伴って変形してしまい，合成した表情顔画像には違和感が生じてしまう．これを回避するためには，表情合成の前に眼鏡フレーム領域を抽出・除去するのが最も直接的で近道である．すなわち，あらかじめ眼鏡フレーム領

域を抽出しておき，その領域内画素の輝度値を肌の輝度値に置き換えて眼鏡フレーム領域を除去した後に表情合成を行う．そして，表情合成顔画像に抽出しておいた眼鏡フレーム領域を合成することで，眼鏡フレームの変形などを生じない表情眼鏡顔画像が得られる．



図 1.4: 眼鏡顔画像から直接的に合成した表情眼鏡顔画像

髭や傷，頭髪が顔を遮蔽する場合はどうであろうか．傷や髭は表情の変化により顔の形状が変化すれば，それに合わせて変形させるのが自然であろう．したがって，眼鏡の場合のような支障は生じないと考えられる．一方，顔形状が変形しても頭髪は変形しないので，これを変形させると眼鏡の場合と同様に違和感のある顔画像となるかもしれない．髪の毛の短い人の場合は，目や口，顎のような表情変化による変形の大きな部分にはかからないので，問題とならないが，女性のように長髪で頭髪が顔の大部分を覆う場合には問題となろう．

顔部品抽出

顔部品（目や口など）のうち，眼鏡フレームにより頬や目蓋が遮蔽されると目領域の抽出が困難となる [25, 26, 27, 28, 35, 36, 48]．本田ら [35] の方法では，眼鏡顔画像の場合，目領域が顔の輪郭などと融合するため，目領域を良好に抽出することが困難になる（図 1.5）．眼鏡フレームの影響を受けずに顔部品を抽出するには，眼鏡の影響を低減するか，抽出方法そのものを改良する必要がある．

顔画像検索，個人識別

眼鏡は顔の特徴の 1 つとして捉えることができるが，サイズさえ合えば誰でもかけることができる．このため，例えば，眼鏡フレームの特徴を基に顔画像を検索すると，対象人

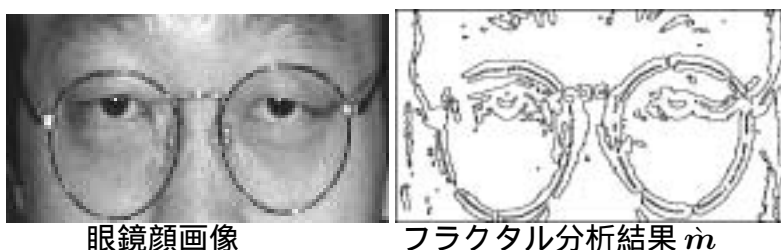


図 1.5: 眼鏡顔画像とフラクタル分析結果

物の顔画像が常に正しく検索できるとは限らない．顔画像検索では対象人物の顔の特徴よりも，眼鏡の特徴が反映される場合がある．また，個人識別では眼鏡フレームの有無により，識別結果に影響を及ぼす [29, 31, 32, 49] ．

表情解析

眼鏡フレームの形状や色，レンズの色は，顔の印象や表情は大きく変化する．そのため，仮に同じ表情であっても，眼鏡をかけているとその感情の表出度が異なって感じる．図 1.6 は眼鏡なし表情顔画像に眼鏡フレーム画像を合成したものである．合成眼鏡表情顔画像 1 はリム（レンズの周囲部分の眼鏡フレーム）の形状がやや角張った眼鏡フレーム，合成眼鏡表情顔画像 2 はリムの形状が丸みを帯びた眼鏡フレームを用いて作成した．いずれの顔画像も人物そのものの表情は同一であるが，合成眼鏡表情顔画像 2 の笑いの度合いが最も強く感じる．



図 1.6: 眼鏡フレーム形状による表情の印象変化

眼鏡顔の場合，人物の表情そのものを扱うのか，眼鏡込みで顔の表情を扱うのかによって表情識別の結果が変わってくる．表情の評価を統一化するために顔の条件を揃える方法

は、2通り考えられる。

- 眼鏡顔画像に変換する。
- 眼鏡なし顔画像に変換する。

前者の方法は、いずれの顔画像にも眼鏡を合成し、眼鏡顔で統一する方法である。しかし、この方法では、合成する標準的な眼鏡フレームを選定するのは難しく、また、眼鏡顔の場合もその標準眼鏡フレームに変換しなければならないため非現実的である。後者の方法は、個人性や表情を含んだ眼鏡なし顔を推定すればよく、目標が絞られるため現実的である。

眼鏡込みでの表情を解析するには、2通り考えられる。

- 表情眼鏡顔画像から直接解析する方法。
- 表情眼鏡なし顔画像の解析結果に眼鏡の影響を付加する方法。

前者の場合は、眼鏡フレーム領域の特徴も含めて検討されるであろう。一方、表情眼鏡なし顔に対して眼鏡の影響を補整することでも実現できると考えられる。ただし、後者の場合は、眼鏡の形状や色がどのように影響するのか、また、その影響が特定の表情にだけ作用するのかを明らかにしなければならず、これを検討するのは要因の組み合わせが膨大であるため容易ではない。

1.5 画像内の遮蔽された物体の原パターンを推定する方法の研究例

顔画像内の不要領域（眼鏡）を除去し、原パターン（眼鏡なし顔）を自動的に推定する試みは本研究が最初であるが、顔画像以外の一般的な画像では、写真のフィルムの傷やゴミ、電線などの不要領域を除去し、原パターンを推定することには多くの研究例がある。代表的なものを挙げ、本研究が目指しているような顔画像推定に適用が可能か考察する。

画像内の物体は、各画素の輝度値により表現されている。この画像の輝度情報を操作して遮蔽物体によりマスクされた対象物体の原パターンを推定する方法を「appearance ベースによる推定方法」と呼んでいる。推定方法の例として、輝度値に対してフィルタリング処理をしたり [50, 51, 52]、入力画像を推定に適した空間に射影・逆射影して遮蔽された物体の原パターンを推定するなどの方法がある [53, 54]。これらの方法は、

- 遮蔽領域が対象物の領域よりも充分小さいこと．
- 空間射影を行う基底ベクトルの適用範囲が広いこと．

という条件・仮定が必要となる．基底ベクトルの適用範囲が小さい場合，複数の基底を準備しておいて切り替えて使用することも考えられるが，各基底ベクトルの適用範囲が小さいと多くの基底を準備しなければならず，また，いくつ準備すれば十分かも解析的には与えられない．これに対して眼鏡顔画像は

- 極端に太い眼鏡フレームでなければ，顔領域よりも眼鏡フレーム領域は充分小さい．
- 眼鏡の形状はほぼある範囲に集中している上，原パターンも顔画像に限ることができるので一つの（あるいは少ない）基底ベクトル集合で広い適用範囲を期待できる．

などの特徴があり，眼鏡なし顔画像を得る基底ベクトルさえ得ることができれば，十分に適用が可能ではないかと期待できる．同様に顔の傷の除去にも適用は容易であろう．しかしながら，髭や頭髮などは領域が顔画像の広い部分を占めるのでこの方法は適用が難しいと考えられる．

ある物体領域内の輝度値は互いに類似していることが多い．そこで，閾値処理によって，ある範囲内の輝度値だけを表現する空間に入力画像を射影すれば，対象物体だけを抽出できる [55]．この方法には，

- 対象物体の輝度範囲があらかじめ与えられていること．
- 対象物体と遮蔽物体の輝度値の分布範囲にオーバーラップがない．

という条件・仮定が必要である．しかしながら，

- 顔の肌の輝度値は個人性が強く，特に男性と女性では大きく異なる．
- 眼鏡フレームの輝度値は広い範囲に分布し，ある閾値で良好に推定が行えた場合でも，他の人物の顔画像でそのまま適用できるとは限らず，安定性に欠ける．
- 鼻筋や顔の輪郭などは陰影により見かけ上の輝度値が変化するために，肌の輝度値と眼鏡フレームの輝度値にオーバーラップが生じる．

ということから，輝度値の閾値処理による眼鏡なし顔画像推定は，適用範囲が狭い上，高い精度は期待出来ない．

フィルタリング処理による方法は、ガウス性ノイズやラインパターンなどの遮蔽物体が小領域で局所的に存在していたり、幾何学的形状が表現しやすい場合にそのパラメータ推定を行い、劣化画像を復元することができる [50, 51, 52]。しかし、眼鏡のように広範囲をマスクするような場合には適用が困難である。顔の傷は小さければフィルタリング処理で容易に除くことができる。フォトタッチソフトなどを使用してフィルタ処理により顔画像のほくろやしわ、シミなどを取り除く処理はポピュラーである。髭と頭髮は領域が大きいのでフィルタリング処理により分離、除去するのは難しい。

また、実空間ではなく、Fourier 変換などの周波数空間への変換を行い、特定の周波数成分を抽出することにより画像中の不要周波数成分を除去して対象物体を抽出できる [56]。しかしながら、眼鏡なし顔は特定の周波数に局在せず、眼鏡フレームの周波数成分とのオーバーラップがあるため適用が難しい。顔の傷、髭、頭髮も同様である。

一方、遮蔽物体の形状をモデル化して抽出・除去する「model ベースによる推定方法」が考えられる。画像内で形状モデルにマッチする領域を抽出し、周囲の輝度値を用いて内挿すれば遮蔽物体領域は周囲の領域に溶け込み見えなくなる。眼鏡顔画像内の眼鏡フレーム領域を抽出するには、眼鏡フレームの形状をモデル化しなければならない。萩原らは、眼鏡を購入する際の支援として、顔画像に眼鏡フレーム形状をモデル化し、モデルにパラメータを与えて眼鏡フレームを生成して顔画像に合成する方法を提案している [57]。このモデルは、ブリッジを直線で表したり、リムを 3 次ベジェ曲線（曲面）で表すなど、生成する眼鏡フレーム形状の柔軟性に欠けるため、顔画像内の眼鏡フレームの抽出には不向きと言える。また、大関らは、眼鏡フレームのおおまかな形状をモデル化した眼鏡フレームモデルを用いて眼鏡フレームの領域の抽出と除去を試みている [58, 59]。しかしながら、知的符号化通信の枠組の中で顔画像の動き情報の抽出を主体として研究しているため、眼鏡フレーム領域を精度良く抽出するために初期値を手動で与えるなど自動化されていないのでコストが高い。このように、眼鏡フレーム領域を自動的に抽出・除去するための model ベースによる方法は、構築されていない。

1.6 本研究の目的

本研究の目的は、眼鏡顔画像から顔の個人性を損なうことなく眼鏡なし顔画像を推定することにある。

顔画像処理や顔画像解析、顔画像合成などの顔画像情報を活用する研究の目的は、人の顔から、

- 顔の個人性
- 顔の属性
- 顔の表情
- 顔に表れる非言語的な意図

を抽出、解析、処理、合成することにある。一方、顔画像にはこれら目的を妨げる成分が存在し、これを本研究では不要領域と呼ぶ。不要領域が存在しても影響を受けない頑健な顔画像処理方法を与えることができれば理想的であるが、前節までに示したように容易ではない。また、顔画像処理方式毎に頑健なシステムを与えるよりも、本研究によって不要領域を除去した後に処理が実行できれば、これまでの研究成果を活用できるし、頑健な顔画像システムの実現が容易となり、实际的であろう。このとき、不要領域を除去する際に顔本来の個人性や表情特徴が失われては顔画像処理の目的が達せられなくなるため、顔画像から不要領域を除去することだけを目標にするのでは条件としては不十分である。したがって、入力顔画像から不要領域を除去し、かつ、その結果が対象人物の顔の個人性や表情を有した顔画像になるという条件が必要である。ただし、個人性と表情を同時に扱うのは困難であり、また、個人性が保存されていれば表情も保存されていることが期待できるため、本研究では顔画像の個人性を保存したまま不要領域を除去することを条件とする。

対象物体（顔）をマスクしている遮蔽物体（不要領域）には眼鏡の他、髭、顔の傷、頭髮なども考えなければならないが、眼鏡とこれらは本質的に異なる。それは、髭や顔の傷などが顔における人の個人性を与える成分の一つであるのに対して、眼鏡は道具として顔につけられた遮蔽物であり、さらに取り外しや取り替えができることから個人性と考えべきでないからである（厳密には眼鏡によって人の表情の印象が異なることや、眼鏡レンズにより目の大きさが変化することなどから個人性にも影響を与える。これは顔本来の表

情ではなく、道具を用いて作られた表情や個人性と見なして除いて考える）。このため、本研究では顔画像に存在する眼鏡領域を不要領域とみなす。顔に眼鏡が含まれると、顔画像を用いたシステム（ユーザインタフェース、セキュリティシステム、コミュニケーションシステム、コンピュータグラフィックス生成システムなど）において画像内の顔部品抽出が困難になったり、眼鏡フレームが変形して違和感のある合成顔画像になるなどの問題が生じるが、本研究で提案する眼鏡領域除去方法（眼鏡なし顔画像推定方法）を適用することによってこれらの問題を解決することができる。

ただし、サングラスのように目の領域を完全あるいはほぼ完全に遮蔽して見えなくしている場合は、目の領域の情報は既にほぼ失われてしまっており、眼鏡を除去して眼鏡なし顔画像を推定しても必要な情報は生まれないので、眼鏡除去の意味はないと考えて検討の対象から外した。さらに、髭や傷については付け髭や化粧によって付け外したり、消したりできるので眼鏡と同様に扱うべきではないかとも考えたが、付け髭などは特殊なものであり、さらに眼鏡ほど頻繁に見られるものではないことから、顔画像研究としてここまで範囲を広げる必要はないと判断してこれらも対象から除外した。しかしながら、個人性が多少失われることは許容して髭や傷などを除いてほしい場合もある。例えば、お見合い写真などいわゆる「よそ行き」の顔画像を得たい場合である。これについても本研究では言及し、眼鏡除去を目的として与えた本研究の手法が顔画像中のより一般的な不要部分をどの程度除去できるかを示す。

顔画像中の不要領域（眼鏡）を除去し、原パターン（顔）を自動的に推定する試みは本研究が最初であり、他に例を見ない。ただし、顔画像以外の一般的な画像では、傷、字幕、風景画像などでの電線の写り込みなどの不要領域を除去し、原パターンを推定する研究例は多くある。これらにおいて用いられている推定方法は、次の2つのカテゴリに大別できる。

- appearance ベースによる推定方法（画像の輝度情報を用いる方法）
- model ベースによる推定方法（対象物体あるいは遮蔽物体の形状情報を用いる方法）

これら2手法には各々長所・短所があり、画像推定研究の分野ではいずれがより優れているか甲乙は結論づけられてはいない。そこで、本研究ではこれら2手法各々による顔画像推定方法を構築し、各々において、その特徴・特性を示す。

これら本研究の目的を総括し、研究の幹となる主要部分を強調すると、

本研究の幹の部分は、眼鏡顔画像から顔の個人性を損なうことなく眼鏡なし顔画像を推定することであり、枝に相当するのは appearance ベースによる推定方法と model ベースによる推定方法の双方により目的を達成するための手段（推定方法）を与えることである。さらにこれらから結実した実として推定結果が目標とする原パターンにどれだけ類似するものが得られたかを示す。

本研究は眼鏡顔画像から顔そのものの個人性を損なうことなく眼鏡なし顔画像を推定することを目的にしているので、推定方法において

- 眼鏡の影響が除去できたか。
- 顔そのものの個人性は保存されているか。

を目標にして評価しなければならない。本研究によって推定した眼鏡なし顔画像は、その後、記録、伝送、表示されるだけでなく、表情合成や個人識別などに用いられるので、推定したパターン（眼鏡を除去した顔画像）の原パターン（眼鏡をつけていない顔画像）との忠実性を評価すべきと考える。ただし、厳密に正解となる原パターンそのものは存在しないので、本研究では別に眼鏡を外して撮影した対象人物の顔画像を原パターンと見なし推定画像との一致度を評価する。

本研究では、顔の個人性と顔画像の輝度パターンを結びつけ、顔画像の個人性を「顔画像の輝度パターンの特徴によって個人が特定できるもの」と定義する。そして、推定結果が目標とする眼鏡なし顔画像の輝度パターンを表現していれば、眼鏡の特徴を含まず、かつ、顔画像の個人性を忠実に表現していると考ええる。推定結果の輝度パターンが、眼鏡なし顔画像の輝度パターンをどれだけ忠実に表現しているかについて、両者の輝度パターンの類似度によって定量的に評価する。類似度は、画像の輝度値の強度差ではなく、輝度パターンをベクトルとして考えたときの2つのベクトルのなす角 θ によってパターンの一致性を評価する。類似度の値 S は、 $\theta = 0$ で極大になり ($S = 1$)、 θ の値が0の近傍で若干変動しても S は1からあまり変化しないという性質がある。この特性は、対象画像が辞書画像から少し変化しても許容するということを示しており、例えば、顔画像の陰影などに少しの変化が生じても人物を正しく特定できるような評価尺度であることを表している。本研究では、推定結果と眼鏡なし顔画像の類似度が、個人識別の研究などで見られる辞書パターンとの類似度と同程度以上得られることを目標にする。

新しく提案する手法の概要を以下に列挙する。

1. appearance ベースによる推定方法において，対象物体である顔画像の輝度パターン空間射影によって眼鏡顔画像から眼鏡なし顔の特徴を抽出する新しい画像推定方法を提案する．
2. model ベースによる推定方法において，遮蔽物体である眼鏡フレームの形状をモデル化し，画像内から抽出・除去する方法を提案する．

各カテゴリの眼鏡なし顔画像推定方法を検討・構築し，入力した眼鏡顔画像を，対象人物の眼鏡なし顔画像の輝度パターンに近づけることを目標とする．眼鏡による顔への物理的な変化を取り除き，後段の顔画像合成・解析に対する眼鏡の物理的影響を抑える．

実画像に対する実験を行って特性を評価し，本研究の応用例として，表情眼鏡顔画像の合成，顔部品抽出，個人識別を行い，眼鏡による顔への物理的な変化を取り除くことによる顔画像解析・処理が良好に行えることを示す．

ただし，本研究では，眼鏡のレンズは透明で，眼鏡フレーム形状は一般的なものとし，デザインに凝った奇抜で複雑な形状は扱わない．また，カメラを注視するように指示することは被撮影者に対して強い制約ではなく，顔の回転や傾きは1度程度に抑えられるという報告もあることから [30]，顔が大きく回転・傾斜することはないと仮定し，扱う顔画像は正面顔画像とする．また，眼鏡の心理的な影響については，間接的に対応できている可能性があるが，人の感性などの心理的特性を解析・検討する必要がある，全てを考慮してはいない．特に，眼鏡により表情などの人の印象が変化することなどは，現時点で本研究の範囲を大きく越えており，将来の研究課題と考える．

1.7 本論文の構成と各章の概要

本論文は全8章により構成されている（付録Aに眼鏡の歴史とその機能について，付録Bに眼鏡による顔画像への影響について述べた）．

以下，2章以降の各章の概要を述べる．

第I部：appearance ベースによる眼鏡なし顔画像の推定

第2章 基底ベクトルを用いた眼鏡なし顔画像の推定

appearance ベースによる方法では，輝度情報を用いて眼鏡なし顔画像を推定する．本章

では、「眼鏡のない顔の特徴」を主成分分析により求めた眼鏡なし顔画像集合の基底ベクトルにより表す．眼鏡顔画像と基底ベクトルとの内積を求めて，この内積値を荷重とした基底ベクトルの線形和により眼鏡なし顔画像を推定する方法を提案する．

第 3 章 非線形射影による眼鏡なし顔画像の推定

本章では，まず，前章の基底ベクトルを用いる方法が眼鏡フレームの輝度値により推定精度が低下することを明らかにする．この推定精度の低下を回避するために，眼鏡フレーム領域を抽出し，輝度値を非線形変換した後に，前章の方法を用いて眼鏡なし顔画像を推定する．系全体として非線形射影を行う方法を確立し，推定精度が改善できることを示す．

第 II 部：model ベースによる眼鏡なし顔画像の推定

第 4 章 パラメトリック眼鏡フレームモデルを用いた眼鏡なし顔画像の推定

本章では，まず，眼鏡フレームの構造を関数近似した，パラメトリック眼鏡フレームモデルを提案する．画像内で本モデルにより生成した眼鏡フレームとマッチする部分を眼鏡フレームと推定して抽出し，眼鏡フレーム領域の周囲の肌の輝度値を用いて輝度変換を行い，眼鏡フレーム領域を除去して眼鏡なし顔画像を推定する方法を構築する．

第 5 章 対称構造物体に収束する複数の動的輪郭モデルを用いた眼鏡なし顔画像の推定

本章では，画像輪郭の途切れに対して robust な方法として，Kass らの提案した Snakes を拡張し，対象構造物体に収束するような Snakes を提案する．眼鏡フレームが対称構造物体であるという特徴を基に，左右の Snakes で対応する制御点のエネルギーを考慮しつつ互いに協調しあいながら眼鏡フレームに収束するように設計する．抽出した眼鏡フレーム領域内の輝度値をその周囲の肌領域の輝度値を用いて輝度変換することにより眼鏡フレーム領域を除去し，眼鏡なし顔画像を推定する．また，遺伝的アルゴリズムにより Snakes の最適なパラメータを大域探索する．

第 III 部 各方法の特性と応用

第 6 章 各方法の特性

本章では，第 I 部および第 II 部で述べた方法について比較検討する．特に，眼鏡なし顔画像の推定がしにくい条件下での各方法の特性について述べる．また，各方法の特徴から，どのような場面に適用できるのかを考察する．

第 7 章 眼鏡なし顔画像推定の応用例

本章では，眼鏡顔画像からの眼鏡なし顔画像推定方法の応用例として，表情眼鏡顔画像の合成，顔部品抽出法，個人識別法について述べ，本論文で示した眼鏡なし顔画像推定方法の有効性を示す．

第 IV 部 結論

第 8 章 本論文の結論

本論文で得られた結果を要約するとともに，今後検討すべき課題について述べる．

第 I 部

appearance ベースによる眼鏡なし顔画像の推定

序

遮蔽物体によりマスクされた対象物体の原パターンを推定する方法は2つのカテゴリに大別できる．その1つは，画像を別空間に射影して対象物体だけを抽出して推定する方法であり，もう1つは，遮蔽物体をモデル化して画像内の遮蔽物体を抽出・除去する方法である．本研究では前者を「appearance ベースによる推定方法」として捉えて眼鏡なし顔の特徴を表現する部分空間に射影し，後者を「model ベースによる推定方法」として捉えて眼鏡フレーム形状をモデル化して抽出を行う．第I部では，appearance ベースによる眼鏡なし顔画像の推定方法を述べる．

第 2 章

基底ベクトルを用いた眼鏡なし顔画像の推定

2.1 序言

画像内の物体は、各画素の輝度値により表現されている。そこで、画像の輝度値を操作することにより、遮蔽物体によりマスクされた対象物体の原パターンを推定する方法がある。このような、画像の輝度情報を扱う方法は「appearance ベースによる推定方法」と呼ばれ、輝度値に対してフィルタリング処理をしたり [50, 51, 52]、入力画像を推定に適した空間に射影・逆射影して遮蔽された物体の原パターンを推定する [53, 54]。

画像内の遮蔽された対象物体を抽出する最も簡単な方法は、輝度値の閾値処理であろう。ある物体領域内の輝度値は互いに類似していることが多い。そこで、ある範囲内の輝度値だけを表現する空間に入力画像を射影すれば、対象物体だけを抽出できる [55]。この方法には、

- 対象物体の輝度範囲があらかじめ与えられていること。
- 対象物体と遮蔽物体の輝度値の分布範囲にオーバーラップがない。

という条件・仮定が必要である。しかしながら、顔画像は、

- 顔の肌の輝度値は個人性が強く、特に男性と女性では大きく異なる。
- 眼鏡フレームの輝度値は広い範囲に分布し、ある閾値で良好に推定が行えた場合でも、他の人物の顔画像でそのまま適用できるとは限らず、安定性に欠ける。

- 陰影により見かけ上の輝度値が変化するために、肌の輝度値と眼鏡フレームの輝度値にオーバーラップが生じる。

ので、輝度値の閾値処理による眼鏡なし顔画像推定は、適用範囲の狭い方法となる。

フィルタリング処理による方法では、ガウス性ノイズやラインパターンなどの遮蔽物体が局所的に存在していたり、幾何学的形状が表現しやすい場合にそのパラメータ推定を行い、劣化画像を復元する方法が研究されている [50, 51, 52]。しかし、眼鏡のように顔の広範囲をマスクするような場合には適用が困難である。

また、実空間ではなく、対象物体の抽出が容易な別の空間への射影・逆射影をする方法もある。例えば、Fourier 変換などの周波数変換では、特定の周波数成分を抽出することにより画像中の不要周波数成分を除去して対象物体を抽出できる [56]。しかしながら、眼鏡なし顔は特定の周波数に局在せず、眼鏡フレームの周波数成分とのオーバーラップがあるため適用が難しい。顔の傷、髭、頭髮も同様である。

上記のいずれも閾値の設定が困難であったり、適用範囲が狭いという問題がある。眼鏡顔画像から眼鏡なし顔画像を良好に安定して推定するためには、閾値に依存せず、かつ、広範囲にわたる遮蔽物体を除去する方法を構築する必要がある。そのためには、眼鏡なし顔画像の輝度パターンの特徴を的確に表現する必要がある。

一方、天野らは、固有空間法を用いて画像中の広範囲にわたるテロップ領域を除去する研究を行っている [54]。この方法は、画像の自己相似性の性質を利用して 1 枚の画像だけを用いて遮蔽された領域の原パターンを推定するものである。天野らの方法を顔画像推定に適用することを考えると、同じ肌領域でも顔の輪郭付近、頬、目蓋などの部位では陰影が異なるため、1 枚の顔画像だけを用いて統計的性質を獲得することは困難と考えられる。

本研究では、複数の顔画像を用いて統計的性質を獲得することを考える。人物の顔の個性により、個々の眼鏡なし顔画像は互いに異なるが、顔部品の形状や配置関係は類似しており、眼鏡なし顔画像は互いに相関がある。このような、相関を持った画像集合の特徴を効率よく表現する部分空間を主成分分析により解析的に求める。本章では、「眼鏡をかけていない顔」の特徴を表現するために、主成分分析により複数人物の眼鏡なし顔画像から構成される集合の基底ベクトルを求め、その基底ベクトルを用いて眼鏡なし顔画像を推定する方法を提案する。眼鏡顔画像をこの基底ベクトルで張られる空間に射影することにより、眼鏡顔画像内に含まれる眼鏡なし顔の特徴だけを抽出することを試みる。なお、顔画像解析・処理の分野では、Sirovich らが顔画像を KL 展開し、互いに直交する基底顔 (Eigenpicture) を求め、少ない次元数で高い累積寄与率が得られることを示しており [60, 61]、永田らはこ

れを發展させ，ワイヤースケッチモデルを用いることにより，輝度成分だけでなく顔の形状成分についても検討を行い，輝度と形状の各々で基底を求めている [62] . Sirovich らや永田らの方法は，情報量削減を念頭においた原画像を近似するための効率的な顔のパラメータ表現であり，本研究では，原画像を近似するのではなく，眼鏡顔画像から眼鏡なし顔画像を，すなわち入力画像とは異なるカテゴリの画像を推定する点がこれら先行研究と大きく異なる [54, 63, 64, 65] .

2.2 基底ベクトルを用いた眼鏡なし顔画像の推定方法

本節では，主成分分析 (PCA; Principal Component Analysis) による複数人物の顔画像から構成される顔画像集合の基底ベクトルを求め，これを用いた眼鏡なし顔画像の推定方法を提案する .

2.2.1 PCA による基底ベクトルの導出

D 次元の列ベクトルで表される N 枚の画像 $\mathbf{n}_i$ ($i=1, 2, \dots, N$) からなる既知の画像集合の正規直交基底ベクトル $\mathbf{u}_j$ を考える . このとき， $N < D$ の場合は次元削減され， $\mathbf{u}_j$ は $(N-1)$ 個だけ求まる . 式 (2.1)(2.2) により画像集合の共分散行列 C を求め，式 (2.3)(2.4) を満足する固有値問題を解いて固有値 λ_j ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{N-1}$) に対応して基底ベクトル $\mathbf{u}_j$ が得られる [66, 67] . ここで， t は転置を表す .

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mathbf{n}_i - \bar{\mathbf{n}})(\mathbf{n}_i - \bar{\mathbf{n}})^t \quad (2.1)$$

$$\bar{\mathbf{n}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{n}_i \quad (2.2)$$

$$C \mathbf{u}_j = \lambda_j \mathbf{u}_j \quad (2.3)$$

$$\mathbf{u}_j^t \cdot \mathbf{u}_j = 1 \quad (2.4)$$

2.2.2 眼鏡なし顔画像の推定

PCA に用いる画像集合の要素を N 人分の眼鏡なし顔画像 $\mathbf{n}_i$ ($i=1, 2, \dots, N$) とすると，前節の式 (2.1) ~ (2.4) により求まる基底ベクトル $\mathbf{u}_j$ は，眼鏡のない顔画像を表現する .

式 (2.5) により求まる q_{ij} は，眼鏡顔画像 $\mathbf{m}_i$ を基底ベクトル $\mathbf{u}_j$ に射影したときの成分，

すなわち， u_j 内に含まれている m_i の特徴量を表す．

$$q_{ij} = u_j^t \cdot (m_i - \bar{n}) \quad (2.5)$$

基底ベクトル u_j および平均顔画像 $\bar{n}$ は，眼鏡なし顔画像集合から求めているので，眼鏡フレーム，レンズ上の照明反射領域，レンズの屈折による三日月状の高輝度領域など，眼鏡顔特有の特徴（図 2.1）は含まれていない．したがって，式 (2.6) により推定した顔画像 $\hat{n}_i|m_i, u_j$ は眼鏡のない顔画像となる（図 2.2）．ここで， $\hat{n}_i|m_i, u_j$ は，「顔画像 m_i を入力として，基底ベクトル u_j を用いて眼鏡なし顔画像 n_i を推定した結果」を示す．

$$\hat{n}_i|m_i, u_j = \sum_{j=1}^{N-1} q_{ij} u_j + \bar{n} \quad (2.6)$$

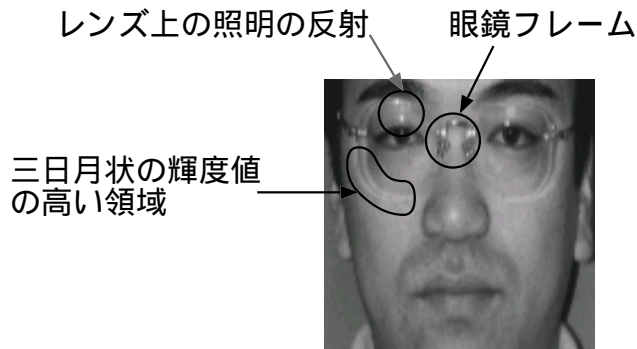


図 2.1: 眼鏡顔に特有な特徴の例

2.3 基底ベクトルを用いた眼鏡なし顔画像推定実験

提案した式 (2.5)(2.6) より眼鏡顔画像 m_i から眼鏡のない顔画像を推定する．また，推定結果への顔画像下部領域の合成と表情顔画像への適用について述べる．

2.3.1 実験条件

本節では，眼鏡なし顔画像の推定実験に先立ち，撮影条件，顔画像の正規化方法，扱う顔画像集合について述べる．

撮影条件

実験には，背景が一様な無表情の正面顔画像を用いた．35mm 一眼レフカメラを用いて撮影し，フィルムスキャナにより 1300×1500 画素の解像度，モノクロ 256 階調でディジ

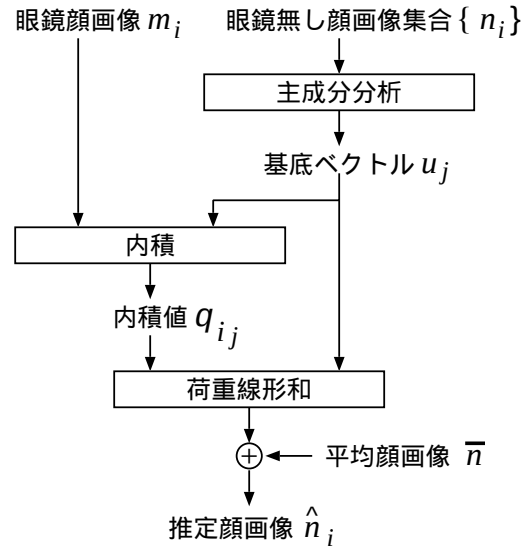


図 2.2: 眼鏡なし顔画像推定の流れ図

タル化した．照明は眼鏡レンズの反射がなるべく生じないように顔の正面よりやや上から照射するように設置し，2回の撮影を行った（表 2.1）．連続して撮影すると顔の肌の状態にほぼ変化がなく，後の項で述べる顔画像集合 F_1 および F_2 の基底ベクトル u_{j_1} ， u_{j_2} の相違が現れにくいと考え，撮影 2 は別の日に照明条件を変えて実施した．

表 2.1: 顔画像の撮影条件

条件撮影	撮影 1	撮影 2
ストロボ	1 灯 (アンブレラ使用)	3 灯
眼鏡なし顔画像	135 枚 (男性 97, 女性 38)	42 枚 (男性 35, 女性 7)
眼鏡顔顔画像	22 枚 (男性 14, 女性 8)	—

顔画像の正規化

取得した顔画像内の顔の傾き，大きさ，位置を手動で正規化しておく．これは，位置ず

れが生じた場合，各顔画像は異なったベクトルとして扱われるため，PCA は集合内の画像の位置ずれに対して敏感であること，また，眼鏡なし顔画像が本手法により本質的に推定可能なかどうかを示すため，ここでの正規化は手動により正確に行う．

標準的な人の顔の比率として，目の幅 w_e ，目と目の距離 w_i ，眉頭の下と鼻下の距離 w_b ，鼻下と顎の距離 w_c の間には式 (2.7)(2.8) のような関係がある [68]．そこで，位置を抽出しやすい瞳の中心と鼻下の位置を用いて図 2.3 に示す各数値を決定した．

$$w_e = w_i \quad (2.7)$$

$$w_b = w_c \quad (2.8)$$

顔の傾きと大きさは式 (2.9) ~ (2.12) の affine 変換により補正する． x_{el} ， x_{er} ， y_{el} ， y_{er} は各々左右の瞳の x および y 座標を示し， y_n は鼻下の y 座標を示す（図 2.3）．

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_x \cdot \cos\theta & z_x \cdot \sin\theta \\ -z_y \cdot \sin\theta & z_y \cdot \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{y_{er} - y_{el}}{x_{er} - x_{el}}\right) \quad (2.10)$$

$$z_x = \frac{48}{x_{er} - x_{el}} \quad (2.11)$$

$$z_y = \frac{48}{y_n - y_{el}} \quad (2.12)$$

そして，眼鏡が顔画像の上部に存在すると仮定し，服の襟，背景，前髪，耳の見え隠れという状態の変化を極力抑制するために 110×60 画素の大きさで顔画像を抽出した（ベクトルの次元 $D = 6600$ ）．図 2.4 に正規化した顔画像の例を示す．

また，照明の影響や男女間での肌の輝度値の差異を簡易的に緩和するため，眼鏡なし顔画像 n_i の輝度値の平均を 0 にするよう，式 (2.13)(2.14) により n_i の l 番目の要素（輝度値） $n_i^{(l)}$ ($l = 1, 2, \dots, D$) を求める．

$$n_i^{(l)} \leftarrow n_i^{(l)} - \bar{n}_i \quad (2.13)$$

$$\bar{n}_i = \frac{1}{D} \sum_{l=1}^D n_i^{(l)} \quad (2.14)$$

顔画像集合の種類と基底ベクトル

本手法による眼鏡なし顔画像推定の精度は，推定に用いる基底ベクトルに依存すると考えられる．眼鏡顔画像 m_i の人物の眼鏡なし顔画像を n_{i_1} （表 2.1 の撮影 1 で取得）および n_{i_2} （同撮影 2 で取得）とすると，本研究では次の 3 種類の顔画像集合の基底ベクトルを用いて検討する．

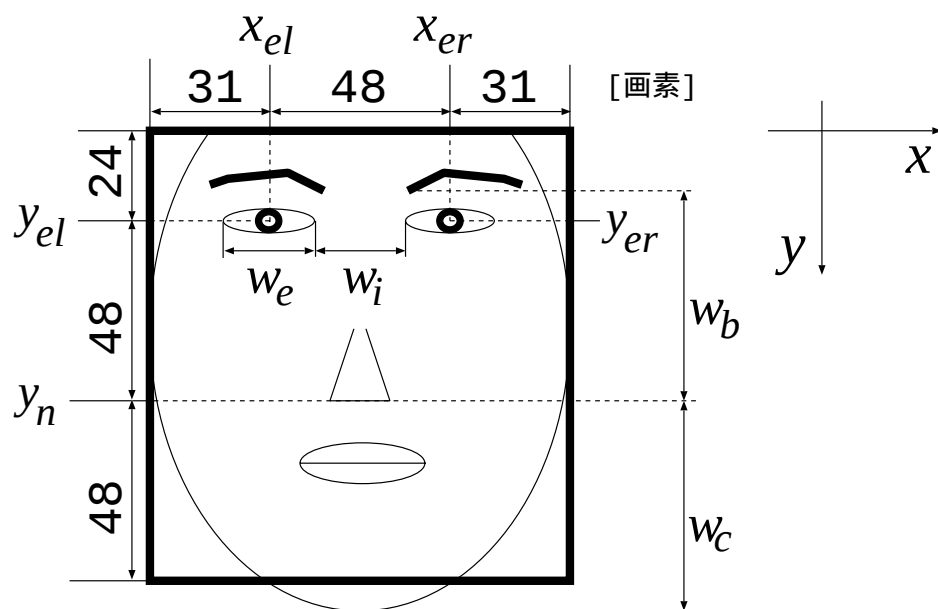
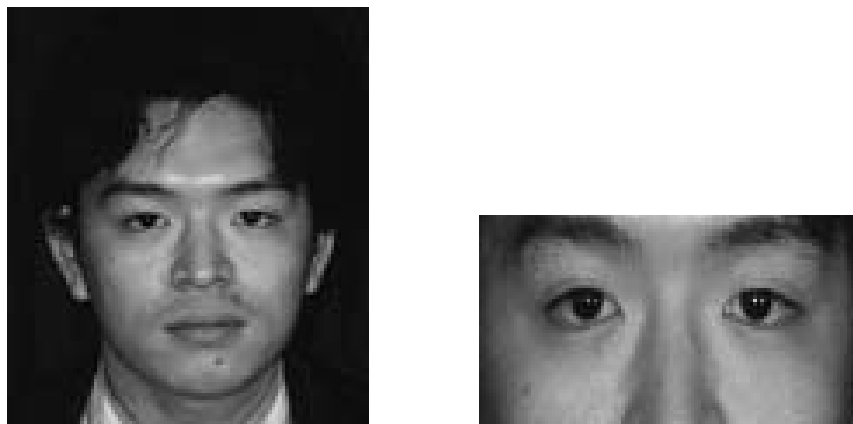


図 2.3: 顔画像の正規化のパラメータ値



正規化前 (1300×1500 画素) 正規化後 (110×60 画素)

図 2.4: 正規化した顔画像の例

1. 顔画像集合 $F_1 : \mathbf{n}_{i_1} \in F_1, \mathbf{n}_{i_2} \notin F_1$ ($N = 176$)
2. 顔画像集合 $F_2 : \mathbf{n}_{i_1} \notin F_2, \mathbf{n}_{i_2} \in F_2$ ($N = 176$)
3. 顔画像集合 $F_3 : \mathbf{n}_{i_1} \notin F_3, \mathbf{n}_{i_2} \notin F_3$ ($N = 175$)

いずれの場合も，(データ数 N) < (ベクトルの次元 D) なので， $(N - 1)$ 個の基底ベクトル $\mathbf{u}_j$ が求まる（以下「顔画像集合 F_k の基底ベクトル」を $\mathbf{u}_{jk}$ ($k = 1, 2, 3$) と示す）．基底ベクトルの例として，各顔画像集合の上位 3 主成分を図 2.5 に示す．可視化のために式

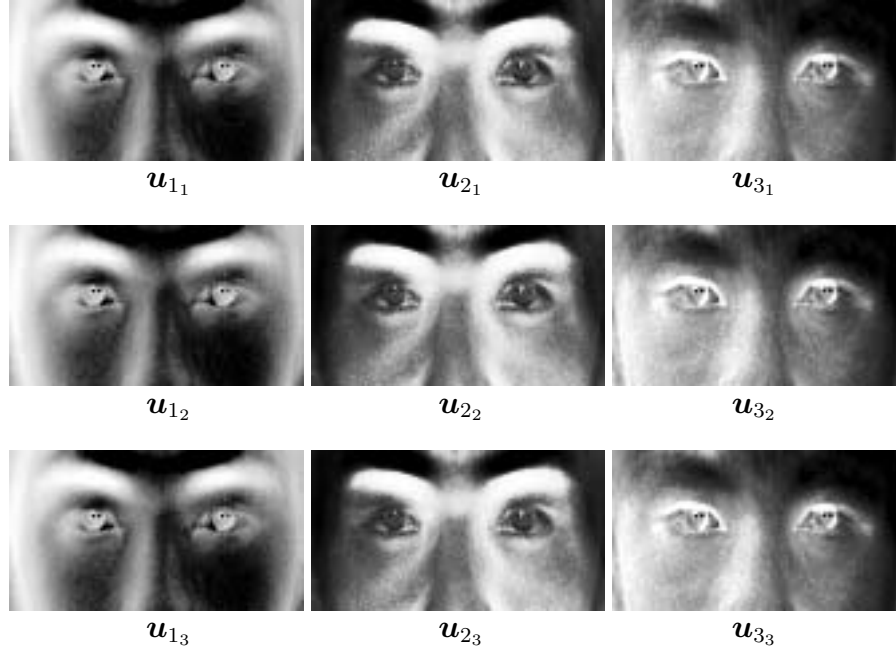


図 2.5: 顔画像集合 F_k の基底ベクトル $\mathbf{u}_{jk}$

(2.15) によりバイアスを加えた $u_{jk}^{(l)}$ を新たに求め，見やすくするために輝度値についてヒストグラム平滑化 [69] を施して図示している．ここで， $u_{jk}^{(l)}$ は基底ベクトル $\mathbf{u}_{jk}$ の l 番目の要素の輝度値を示す．

$$u_{jk}^{(l)} \leftarrow u_{jk}^{(l)} + 128 \quad (2.15)$$

各基底ベクトル $\mathbf{u}_{jk}$ には，視覚的に眼鏡の成分を含んでいないことが判る．

2.3.2 眼鏡なし顔画像推定実験結果

基底ベクトル $\mathbf{u}_{jk}$ を用いて眼鏡なし顔画像を推定した結果 $\hat{\mathbf{n}}_i | \mathbf{m}_i, \mathbf{u}_{jk}$ を図 2.6 に示す．本研究では，情報量削減が目的ではないので，使用する基底ベクトル数の打ち切りによる誤

差が生じないように、いずれの場合も基底ベクトル u_{j_k} を全て用いて推定した（累積寄与率 100 %）。なお、式 (2.16) により推定結果 $\hat{n}_i|_{m_i, u_{j_k}}$ の l 番目の要素の輝度値 $\hat{n}_i^{(l)}|_{m_i, u_{j_k}}$ ($l=1, 2, \dots, D$) が 0 ~ 255 の範囲内に収まるようにした。

$$\hat{n}_i^{(l)}|_{m_i, u_{j_k}} \leftarrow \begin{cases} 0 & (\hat{n}_i^{(l)}|_{m_i, u_{j_k}} \leq 0) \\ \hat{n}_i^{(l)}|_{m_i, u_{j_k}} & (0 < \hat{n}_i^{(l)}|_{m_i, u_{j_k}} < 255) \\ 255 & (\hat{n}_i^{(l)}|_{m_i, u_{j_k}} \geq 255) \end{cases} \quad (2.16)$$

推定結果 $\hat{n}_i|_{m_i, u_{j_k}}$ は、いずれも対象人物の顔の特徴を有した忠実な眼鏡のない顔画像となった。集合 F_3 には対象人物の顔画像が含まれていないので、 F_3 から求めた基底ベクトル u_{j_3} には、対象人物の顔の特徴が含まれていないはずである。しかしながら、対象人物の顔の特徴は表出していることが判る。

もし仮に、基底ベクトルに「眼鏡のない顔の特徴」だけが含まれている場合、推定結果には眼鏡の特徴は現れないであろう。しかしながら、その場合、推定結果に対象人物の顔の特徴が表出するとは限らない。

顔画像集合内には「眼鏡のない顔の特徴」だけでなく、様々な人物の顔の特徴も含まれているため、画像集合の基底ベクトルにより様々な人物の顔を表現することができる。顔画像集合に対象人物の眼鏡なし顔画像が含まれなくとも、式 (2.5) により u_j 内に含まれる対象人物の顔の特徴量が求まる。したがって、式 (2.6) により推定した結果 $\hat{n}_i$ は、各基底ベクトル内に含まれている対象人物の顔の特徴を総て結集したものと捉えることができる。これにより、基底ベクトル u_{j_3} を用いた場合も対象人物の顔の特徴を表現できたと考えられる。

人物 3 の場合は、まぶた周辺に高輝度領域が残っているが、これは眼鏡フレーム上の反射やレンズの影響によるものと考えられる。また、 $\hat{n}_3|_{m_3, u_{j_1}}$ だけでなく $\hat{n}_3|_{m_3, u_{j_2}}$ にもほくろを含んでおり、人物 3 の顔の特徴を良く現している。顔画像集合 F_2 には図 2.7 に示す撮影 2 での眼鏡なし顔画像 n_{3_2} が含まれているために、 $\hat{n}_3|_{m_3, u_{j_2}}$ は人物 3 の顔の特徴をより多く表現できたと言える。

眼鏡の影響が大きい場合（レンズの度が強い、レンズ上の照明反射領域が大きい、縁の太い眼鏡）は、図 2.8 のようにボケが生じる。図 2.8 の人物 4 の場合、レンズに背景が映り込んでいるだけでなく、レンズの屈折によって目の大きさが変化し、眼鏡顔画像と眼鏡なし顔画像との目頭および目尻の位置が左右ともに 2 ~ 3 画素ずれていた。PCA は位置ずれに弱いという特性があるため、度の強いレンズの場合、眼鏡なし顔画像の推定に対して

本手法には限界がある．また，図 2.8 の人物 5,6 の場合，大きなレンズの反射領域や太い眼鏡フレームのように，部分的に顔のマスク領域が大きいことがボケの原因として考えられる．一方，照明反射領域の大きさや三日月状の輝度値の高い領域の大きさおよび輝度変化が図 2.6 の人物 1,3 の程度ならば，それらはほぼ影響しない．

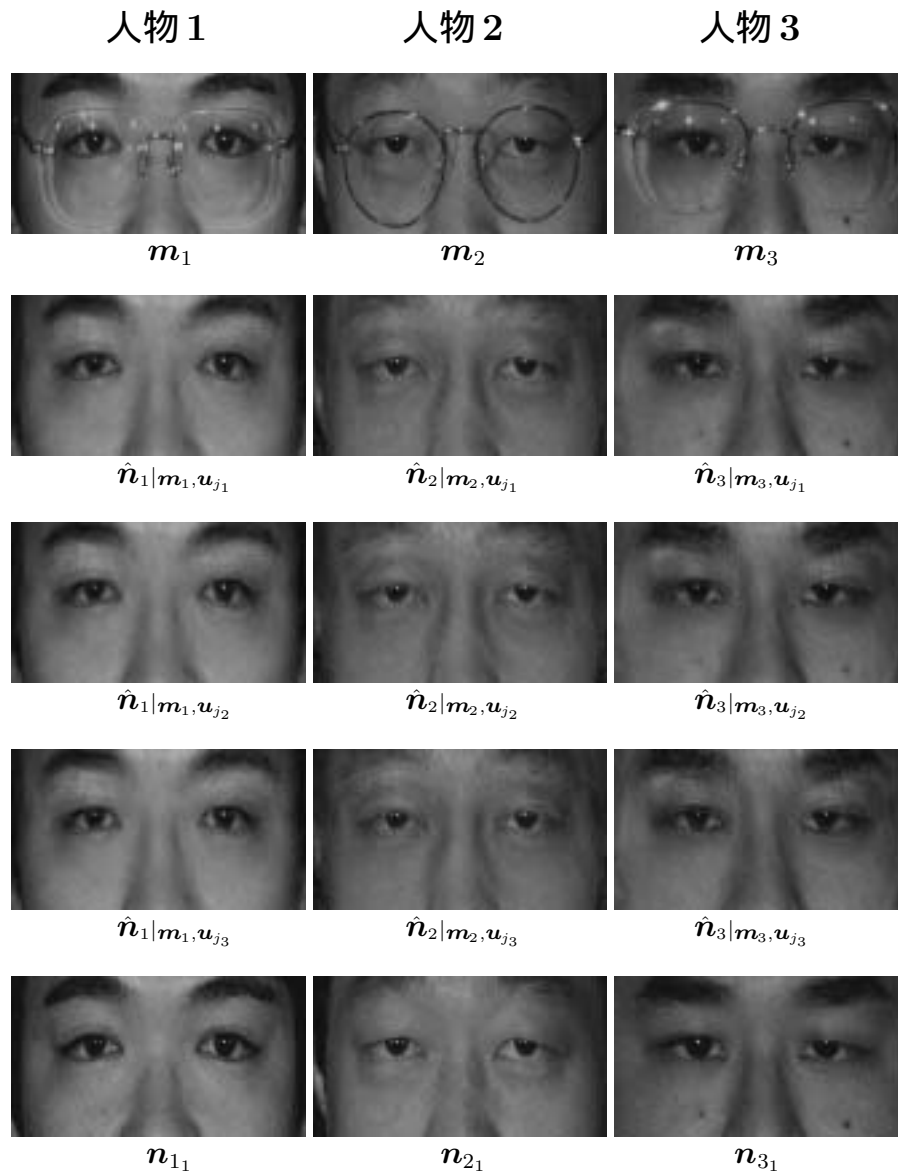


図 2.6: 眼鏡顔画像 m_i に対する推定結果 $\hat{n}_i|m_i, u_{j_k}$ と眼鏡なし顔画像 n_{i1}



図 2.7: 撮影 2 での眼鏡なし顔画像 n_{i_2}

2.3.3 推定顔画像への下部領域合成

前節では服の襟，耳の見え隠れなどの状態の変化を極力抑制するために顔の上部領域を用いて検討した．本節では，顔画像を用いた種々の応用を考え，推定結果に眼鏡顔画像の下部領域（口，顎，服の襟などを含む領域）を付加する方法について述べる．

上部領域（推定結果 $\hat{n}_i$ ）に下部領域（眼鏡顔の下部領域画像 r_i ）を合成するとき，接続部における双方の画像の輝度値の差により接続部に境界線が生じる．そこで，この上下境界線が生じないように，上部領域の輝度値を置換する． $\hat{n}_i$ および r_i を 2 次元画像として扱うときの座標 (x, y) における輝度値を $\hat{N}_i(x, y)$, $R_i(x, y)$ とする．また， $\hat{N}_i(x, y)$ の最下行の y 座標を L とし（図 2.9 ハッチ部分）， $R_i(x, y)$ の最上行を $L + 1$ とし（図 2.9 斜線部分）， $\hat{N}_i(x, y)$ および $R_i(x, y)$ の水平方向の画素数を X とする．式 (2.17)(2.18) により $\hat{N}'_i(x, y)$ を求める．

$$\hat{N}'_i(x, y) = \hat{N}_i(x, y) + \text{diff}_i \quad (y \leq L) \quad (2.17)$$

$$\text{diff}_i = \frac{1}{X} \sum_{x=1}^X R_i(x, L+1) - \frac{1}{X} \sum_{x=1}^X \hat{N}_i(x, L) \quad (2.18)$$

そして， $\hat{N}'_i(x, y)$ の下部に $R_i(x, y)$ を付加し，合成画像 $\hat{n}'_i|_{m_i, u_{j_k}} + r_{m_i}$ を求める（図 2.9）．その結果を図 2.10, 2.11, 2.12 に示す．なお，眼鏡顔画像と眼鏡なし顔画像は顔領域全体の画像 $m_i + r_{m_i}$, $n_{i_1} + r_{n_{i_1}}$, $n_{i_2} + r_{n_{i_2}}$ を示した．比較として示した眼鏡なし顔画像 $n_{i_1} + r_{m_i}$ の目の開きや表情は，照明や眼鏡の有無による視力変化の影響により眼鏡顔画像 $m_i + r_{m_i}$ のものとは若干異なっていることに注意されたい．各推定結果とも顔の特徴を有した忠実な眼鏡なし顔画像となった．ただし，今回は簡易的な方法により画像合成を行ったため上下境界が残る場合や人物 2 のように顔の回転による輪郭のずれの生じる場合



図 2.8: 眼鏡の影響が大きい場合の推定結果 $\hat{n}_i|m_i, u_{j_k}$

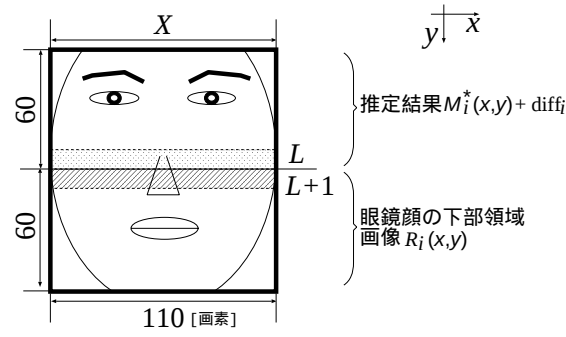


図 2.9: 顔画像下部領域の合成方法

がある．これらの改善については現在検討中である．

2.3.4 表情顔画像への適用

前節までに用いてきた無表情の眼鏡なし顔画像 n_i には表情の特徴は含まれていない．表情が異なると基底ベクトル u_j も大きく異なる．このため，無表情以外の表情顔において本手法が適用できるか確認しておく必要がある．ここでは表情が最も大きく変化する笑い顔を用いて検討する．笑い顔において本手法が有効であれば他の表情へも適用可能であろう．笑い顔に対し，前述した正規化方法で抽出した眼鏡なし表情顔画像 b_i を用い，3種類の顔画像集合 F_k 毎に基底ベクトル v_{j_k} を求めた ($k=1, 2, 3$)．そして，眼鏡表情顔画像 a_i から眼鏡なし表情顔画像 $\hat{b}_i|_{a_i, v_{j_k}}$ を推定した．図 2.13, 2.14, 2.15 には，推定結果 $\hat{b}_i|_{a_i, v_{j_k}}$ に diff_i を加え，下部領域画像 r_{a_i} を合成した結果 $\hat{b}_i|_{a_i, v_{j_k}} + r_{a_i}$ を示した（眼鏡表情顔画像と眼鏡なし表情顔画像も顔領域全体の画像 $a_i + r_{a_i}$ ， $b_{i_1} + r_{b_{i_1}}$ ， $b_{i_2} + r_{b_{i_2}}$ を示した）．無表情の眼鏡顔画像 m_i を入力とした場合と同様，顔の特徴（個人性と表情）を有した良好な推定結果が得られた．ただし，人物 3 の場合は，いずれの推定結果 $\hat{b}_3|_{a_3, v_{j_k}}$ にもほくろは現れなかった．これは，眼鏡表情顔画像 a_3 と眼鏡なし表情顔画像 b_{3_1} ， b_{3_2} の表情の相違によるほくろの位置のずれが原因と考えられる．

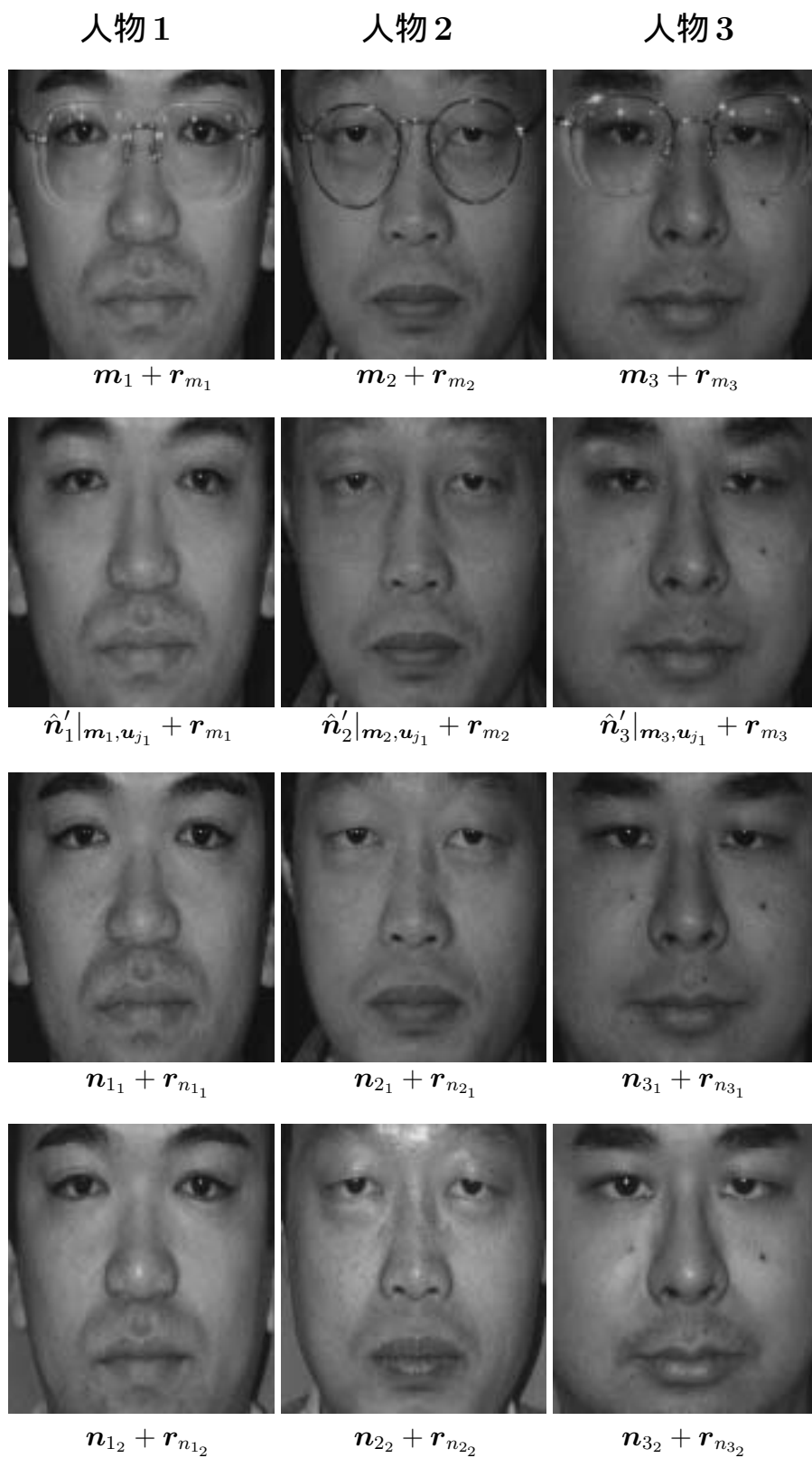


図 2.10: 下半分顔画像を付加した合成画像 $\hat{n}'_i|_{m_i, u_{j_1}} + r_{m_i}$

人物 1

人物 2

人物 3



$$\mathbf{m}_1 + \mathbf{r}_{m_1}$$

$$\mathbf{m}_2 + \mathbf{r}_{m_2}$$

$$\mathbf{m}_3 + \mathbf{r}_{m_3}$$



$$\hat{\mathbf{n}}'_1 | \mathbf{m}_1, \mathbf{u}_{j_2} + \mathbf{r}_{m_1}$$

$$\hat{\mathbf{n}}'_2 | \mathbf{m}_2, \mathbf{u}_{j_2} + \mathbf{r}_{m_2}$$

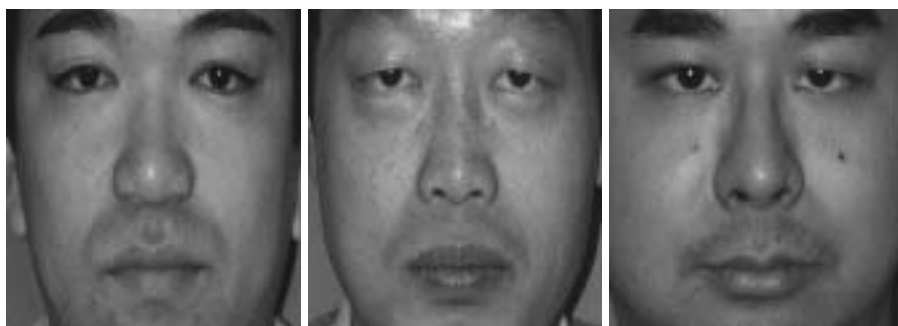
$$\hat{\mathbf{n}}'_3 | \mathbf{m}_3, \mathbf{u}_{j_2} + \mathbf{r}_{m_3}$$



$$\mathbf{n}_{1_1} + \mathbf{r}_{n_{1_1}}$$

$$\mathbf{n}_{2_1} + \mathbf{r}_{n_{2_1}}$$

$$\mathbf{n}_{3_1} + \mathbf{r}_{n_{3_1}}$$



$$\mathbf{n}_{1_2} + \mathbf{r}_{n_{1_2}}$$

$$\mathbf{n}_{2_2} + \mathbf{r}_{n_{2_2}}$$

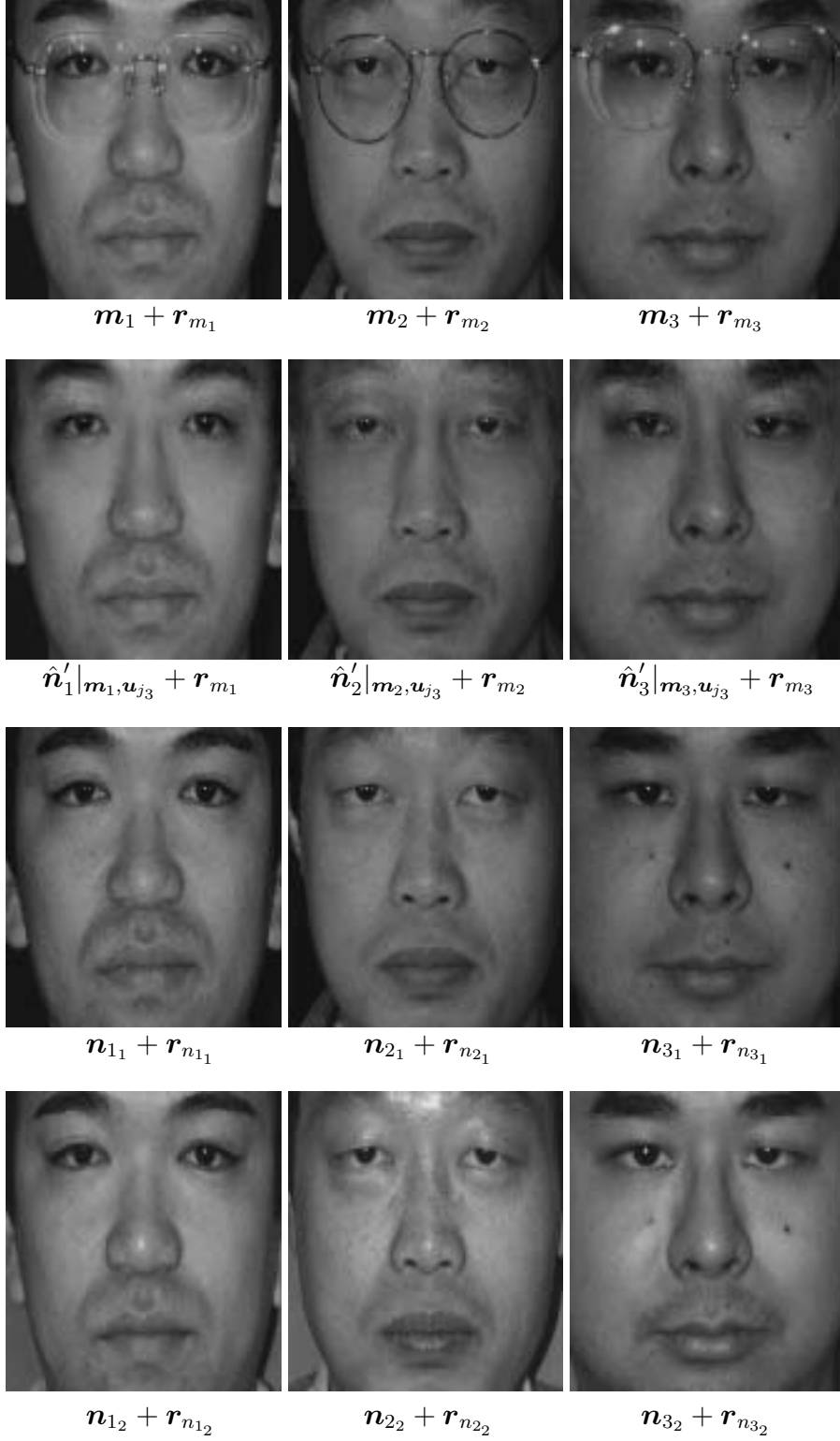
$$\mathbf{n}_{3_2} + \mathbf{r}_{n_{3_2}}$$

図 2.11: 下半分顔画像を付加した合成画像 $\hat{\mathbf{n}}'_i | \mathbf{m}_i, \mathbf{u}_{j_2} + \mathbf{r}_{m_i}$

人物 1

人物 2

人物 3

図 2.12: 下半分顔画像を付加した合成画像 $\hat{n}'_i|_{m_i, u_{j_3}} + r_{m_i}$

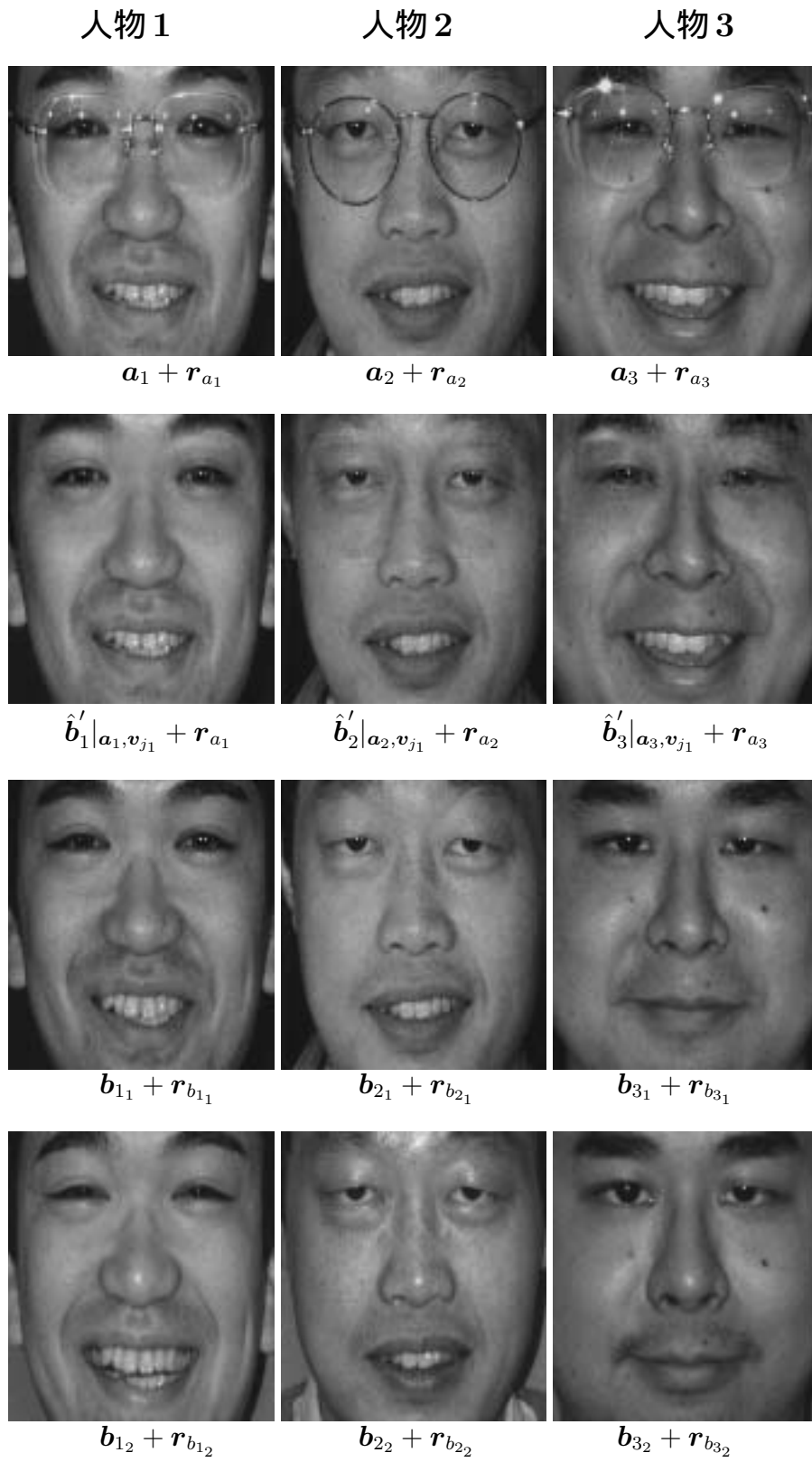


図 2.13: 笑い顔の合成画像 $\hat{b}'_{i|a_i, v_{j_1}} + r_{a_i}$

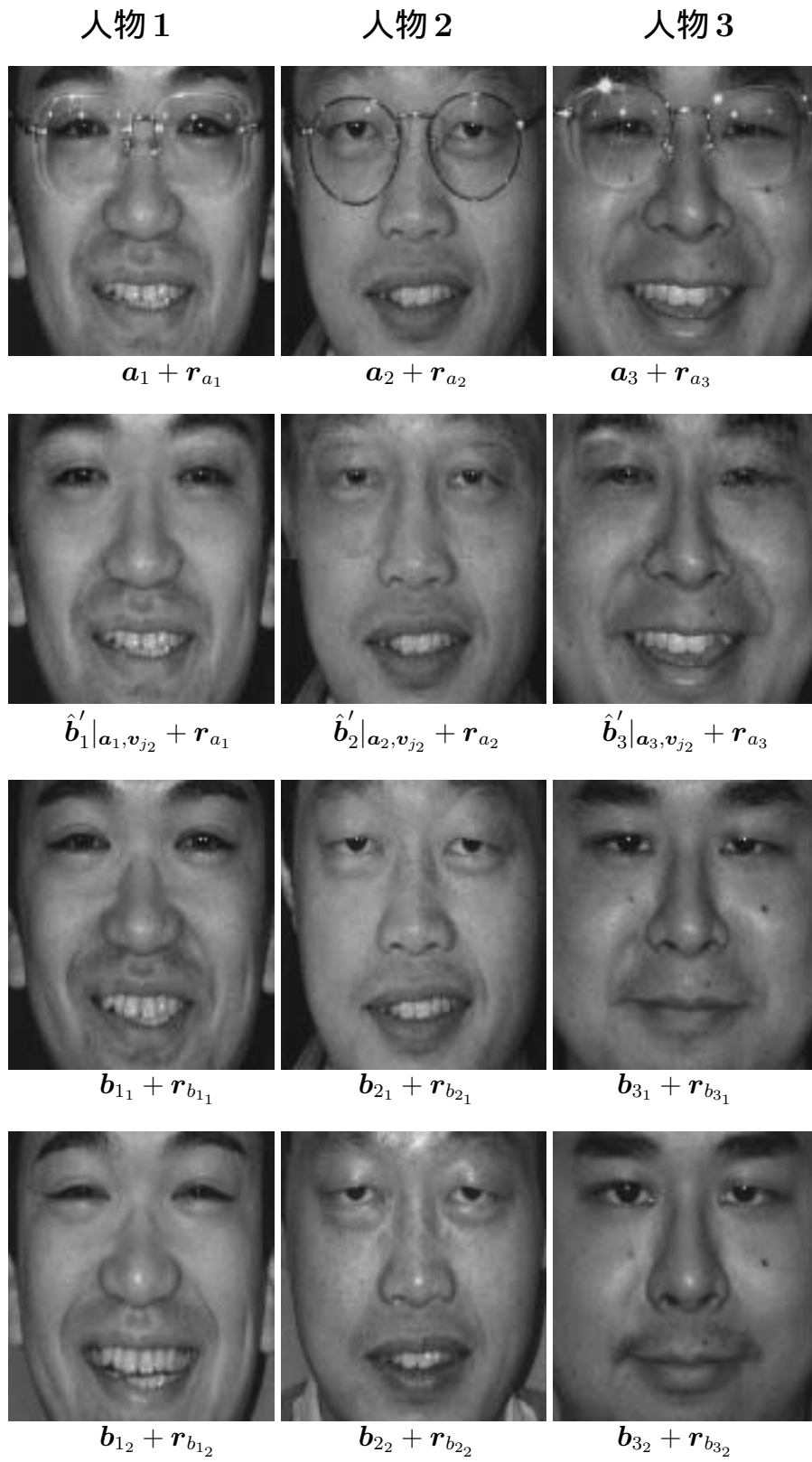


図 2.14: 笑い顔の合成画像 $\hat{b}'_{i|a_i, v_{j_2}} + r_{a_i}$

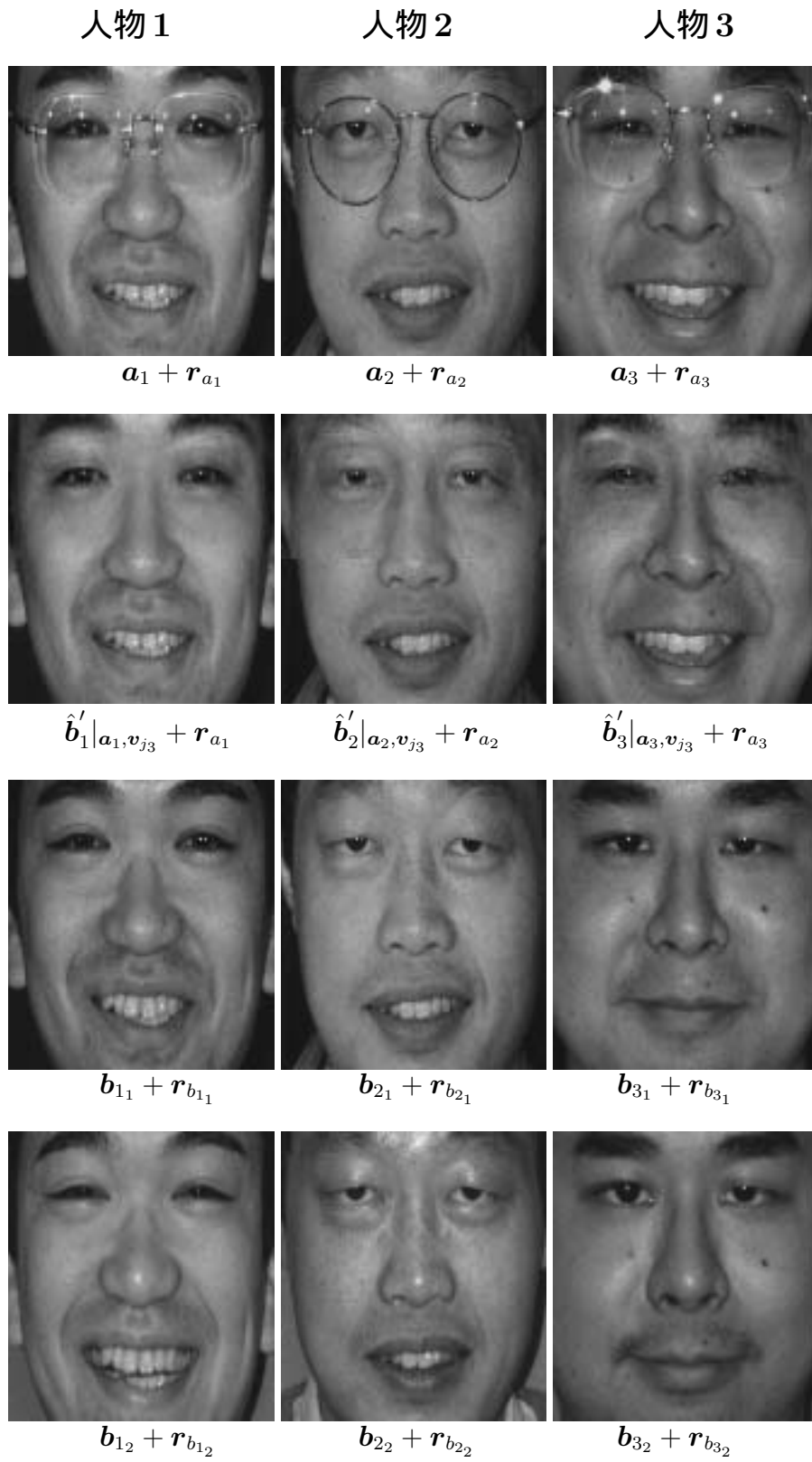


図 2.15: 笑い顔の合成画像 $\hat{b}'_{i|a_i, v_{j_3}} + r_{a_i}$

2.4 本手法による眼鏡なし顔画像の推定精度の評価

本節では，本手法による顔画像推定精度の評価について述べる．まず，PCA で求めた基底ベクトルが式 (2.5)(2.6) で示したように眼鏡顔画像からの眼鏡なし顔画像推定に適切なものであるかを評価し，次いで，眼鏡なし顔画像を推定した結果について推定精度を定量的に評価する．

2.4.1 求めた基底ベクトルの妥当性の評価

本項では，PCA で求めた基底ベクトルが，眼鏡なし顔画像を推定するものとして適切なものかどうか評価する．まず，適切な基底ベクトルとはどのようなものか，その条件を示し，求めた基底ベクトルの特性が条件を満たしているか評価する．

眼鏡なし顔画像の推定に必要な基底ベクトルの条件

ここでは，眼鏡なし顔画像を忠実に推定するために必要な基底ベクトルの条件について考察する．

眼鏡なし顔画像 n_i ($i=1,2,\dots,N$) を平均顔画像 $\bar{n}$ と対象人物の顔の特徴成分 p_i を用いて式 (2.19) のように表す．

$$n_i = \bar{n} + p_i \quad (2.19)$$

同様に，眼鏡顔画像 m_i を眼鏡なし顔画像 n_i と眼鏡成分 e_i を用いて次式のように表す．

$$m_i = n_i + e_i \quad (2.20)$$

$$= \bar{n} + p_i + e_i \quad (2.21)$$

式 (2.21)(2.22) により眼鏡顔画像 m_i 内の対象人物の顔の特徴成分 p_i を推定するには，基底ベクトル u_j は式 (2.23)(2.24) に示すように，眼鏡成分 e_i を表現せずに p_i だけを表現するような条件を満足する必要がある．

$$\sum_{j=1}^{N-1} (u_j^t \cdot (m_i - \bar{n})) u_j = p_i \quad (2.22)$$

$$\sum_{j=1}^{N-1} (u_j^t \cdot p_i) u_j = p_i \quad (2.23)$$

$$\sum_{j=1}^{N-1} (u_j^t \cdot e_i) u_j = O \quad (2.24)$$

眼鏡なし顔画像を入力とした推定実験

眼鏡なし顔画像集合の基底ベクトル u_j が式 (2.23) の条件を満足しているか検討するため，眼鏡なし顔画像 n_i を入力として眼鏡のない顔画像を推定する．

式 (2.5) における眼鏡顔画像 m_i に代えて眼鏡なし顔画像 n_{i_1} を入力として式 (2.25)(2.26) により推定した結果 $\hat{n}_{i_1|n_{i_1}, u_{j_k}}$ を図 2.16 に示す．

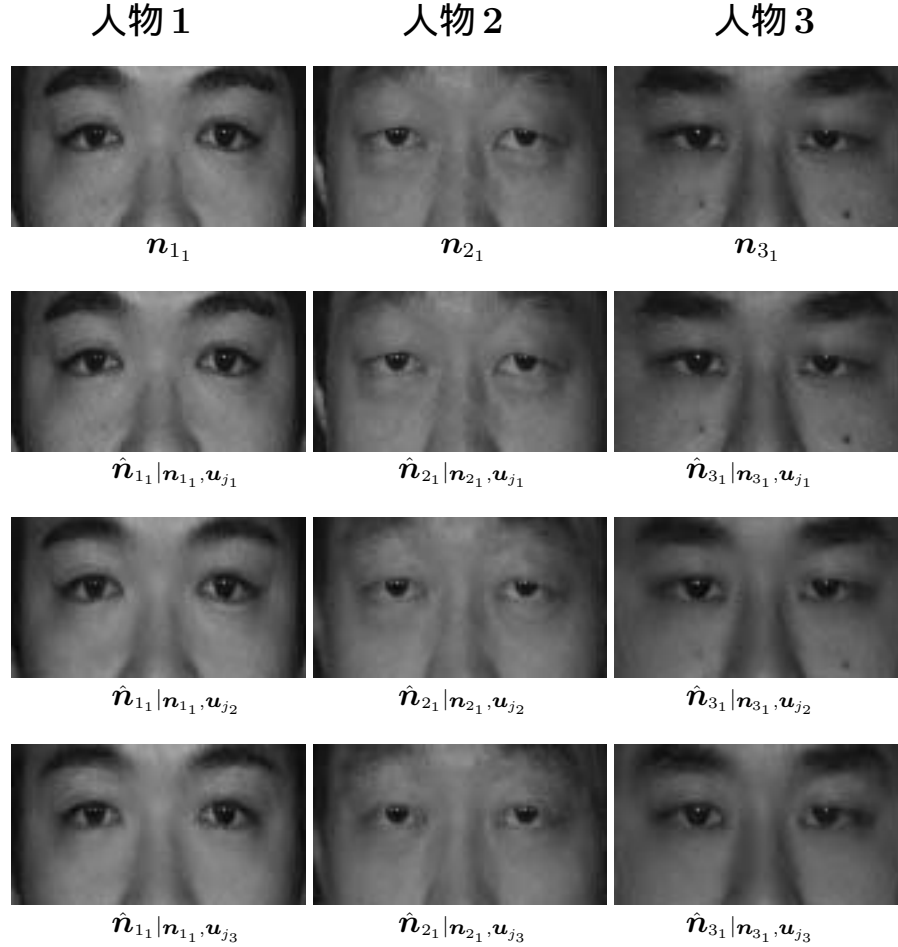


図 2.16: 眼鏡なし顔画像 n_{i_1} に対する推定結果 $\hat{n}_{i_1|n_{i_1}, u_{j_k}}$

$$q_{i_{j_k}} = u_{j_k}^t \cdot (n_{i_1} - \bar{n}) \quad (2.25)$$

$$\hat{n}_{i_1|n_{i_1}, u_{j_k}} = \sum_{j=1}^{N-1} q_{i_{j_k}} u_{j_k} + \bar{n} \quad (2.26)$$

主観的に評価してみると，対象人物の顔の特徴を有した忠実な結果が得られていることから，基底ベクトル u_j は式 (2.23) を満たしていると言える．ただし，人物3の場合，基底ベ

クトル u_{j_3} にほくろの特徴が含まれていない．このため，推定結果 $\hat{n}_{3_1|n_{3_1}, u_{j_3}}$ にはほくろは表出していない．

眼鏡フレーム画像との直交性

基底ベクトル u_j が式 (2.24) の条件を満足しているかどうかを検討する．図 2.6 の眼鏡顔画像 m_2 から手動で抽出した眼鏡フレーム画像 f_2 (図 2.17) を用いて基底ベクトルとの直交性について検討する．

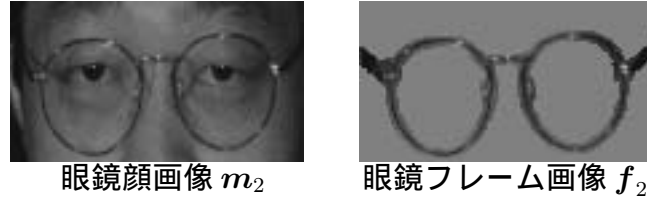


図 2.17: 眼鏡顔画像 m_2 と眼鏡フレーム画像 f_2

眼鏡フレーム画像と基底ベクトルとの内積値を図 2.18 に示す．比較として，眼鏡なし顔画像 (図 2.6 の人物 2) と基底ベクトルとの内積値も同時に示した．

眼鏡フレーム画像と基底ベクトルが直交していれば，その内積値は 0 になるが，図 2.18 を見ると内積値は 0 にはなっておらず，完全には直交していないことが判る．ただし，全体の傾向として，内積値は低次から高次へ進むにつれて減少しており，眼鏡なし顔画像の場合と比較すると，特に低次において内積値が小さくなっている (基底ベクトルの累積寄与率を求めると，第 59 主成分において 0.9 を越えている)．基底ベクトルは，低次のものほど眼鏡なし顔の特徴を良く表し，高次のものは肌の質感などの輝度値の細かなばらつきを表すと考えられる．このことから，眼鏡の成分は基底ベクトルと完全には直交していないものの，眼鏡の成分と顔の特徴をよく表す基底ベクトルとは比較的良く直交していると考えている．

基底ベクトルと眼鏡の成分との非直交性により，推定結果にどのような影響が現れるのかを確認するため，眼鏡フレーム画像を入力として推定実験を行った．図 2.19 に，眼鏡フレーム画像 f_2 を入力として式 (2.27)(2.28) により推定した結果を示す．

$$q_{2_{j_k}} = \mathbf{u}_{j_k}^t \cdot (\mathbf{f}_2 - \bar{\mathbf{n}}) \quad (2.27)$$

$$\hat{\mathbf{n}}_2|_{\mathbf{f}_2, \mathbf{u}_{j_k}} = \sum_{j=1}^{N-1} q_{2_{j_k}} \mathbf{u}_{j_k} + \bar{\mathbf{n}} \quad (2.28)$$

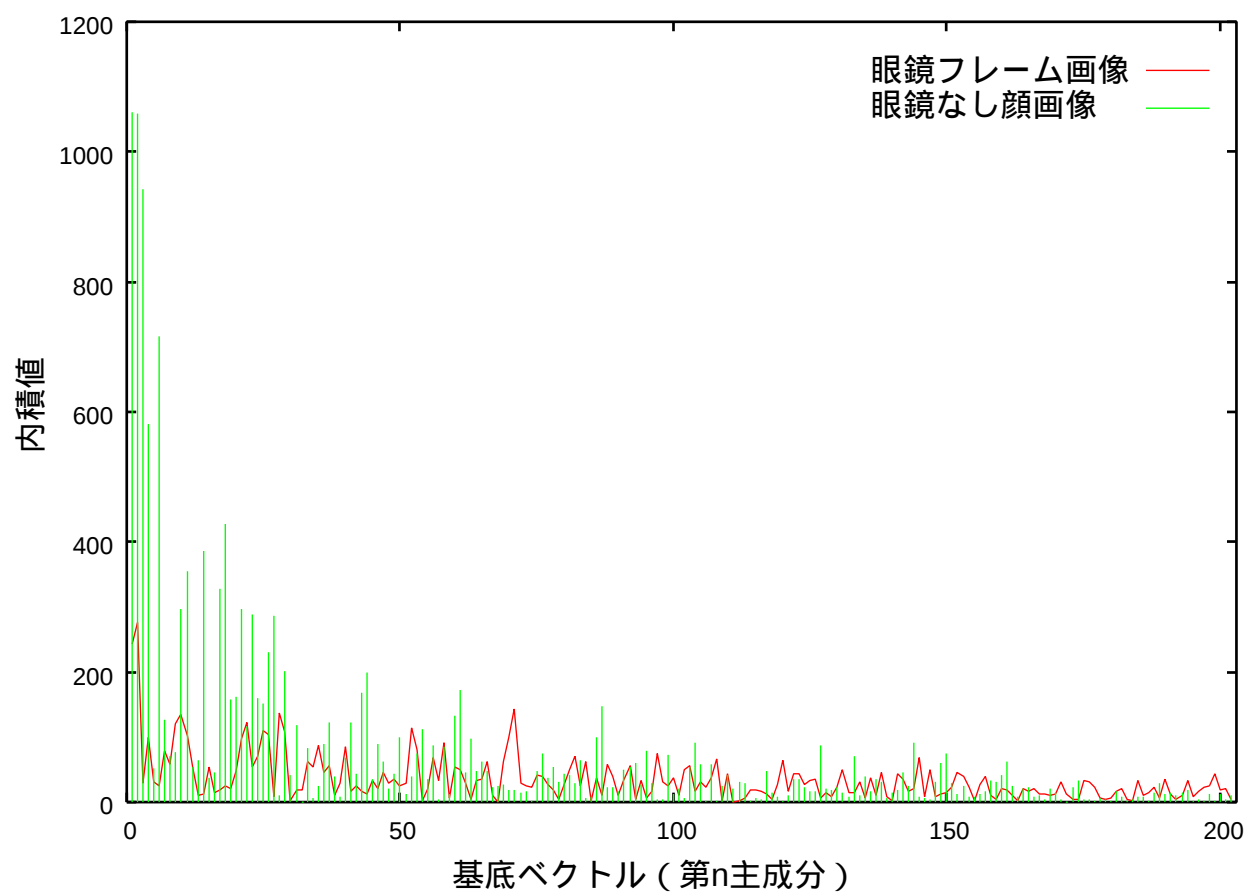


図 2.18: 眼鏡フレーム画像および眼鏡なし顔画像と，基底ベクトルとの内積値の絶対値

推定結果 $\hat{n}_2|_{f_2, u_{j_k}}$ をみると、目や鼻筋などが若干表出しているが、いずれの推定結果にも眼鏡の特徴はほぼ残っていない。

この結果から、眼鏡フレーム画像と基底ベクトルは完全には直交していないものの、推定結果には眼鏡の特徴がほとんど現れないことから、基底ベクトル u_j は式 (2.24) の条件をほぼ満足していると言える。

以上のように、眼鏡なし顔画像の推定と、眼鏡の成分との直交性から、PCA で求めた基底ベクトルは眼鏡顔画像からの眼鏡なし顔画像推定に適したものと言える。

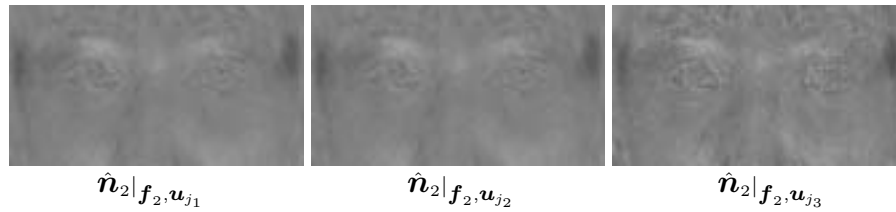


図 2.19: 眼鏡フレーム画像 f_2 に対する推定結果 $\hat{n}_2|_{f_2, u_{j_k}}$

2.4.2 推定した眼鏡なし顔画像による推定精度の定量的評価

眼鏡なし顔画像の推定結果の推定精度をすべて主観評価に頼る場合、被検者の負担が大きく、また、安定した結果が得られにくい。そこで、推定精度を定量的に評価する。

本研究は眼鏡顔画像から顔そのものの個人性を失うことなく眼鏡なし顔画像を推定することを目的・目標にしているので、推定した画像について

- 眼鏡の影響が除去されているか
- 対象人物の個人性が保存されているか

を定量的に評価しなければならない。また、序論でも述べたように、本研究によって推定した眼鏡なし顔画像は、その後、記録・保存されるだけでなく、個人識別、表情合成・解析に用いられるので、パターン（画像）の原パターン（眼鏡をつけない顔の画像）との忠実性を確保しなければならない。ただし、正解となる原パターンそのものは存在しないので、本研究では、別に眼鏡を外して撮影した同じ人物の顔画像を原パターンと考えて推定

画像との一致度を計量する．2つのパターン間の一致度の計量としてパターン間の類似性を計算するのが有効である．

2つの画像 f, g の類似性を測る方法にはいくつか考えられる．以下にその例を示す [67, 70] ．

- ユークリッド距離 D_1

$$D_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^D |f_i - g_i|^2} \quad (2.29)$$

- パターン間相関係数 D_2

$$D_2 = \frac{(f - \bar{A})^t \cdot (g - \bar{A})}{\sqrt{\|f - \bar{A}\|^2 \cdot \|g - \bar{A}\|^2}} \quad (2.30)$$

$$\bar{A} = \frac{1}{2}(f + g) \quad (2.31)$$

- 単純類似度 D_3

$$D_3 = \frac{|g_i^t \cdot h_i|}{\|g_i\| \|h_i\|} \quad (0 \leq S_i \leq 1) \quad (2.32)$$

これらの評価尺度のうち，眼鏡なし顔画像の推定精度を表すのに適切なものを選択する．図 2.20 に定量的評価尺度の選択に用いた顔画像を示す．また，表 2.2 に各評価結果を示す．ユークリッド距離 D_1 の場合は，他人の顔画像との評価値の方が高くなっており，また，推定精度が直観的に判りにい．パターン間相関係数 D_2 の場合は，本人同士の顔画像だけでなく，他人の顔画像との評価も高くなっている．単純類似度の場合は，本人同士の顔の場合の評価が高く，他人の顔画像の場合は評価が低くなっている．以上より，類似度により定量的評価を行うことが妥当である．

表 2.2: 各評価尺度による n_{1_1} に対する各対象の評価結果

評価尺度	類似度		
	n_{1_2}	$\hat{n}_{1 m_1, u_{j_1}}$	n_{2_1}
ユークリッド距離 D_1	7.139×10^3	1.665×10^3	1.605×10^3
パターン間相関係数 D_2	0.895	0.896	0.859
単純類似度 D_3	0.946	0.945	0.622

眼鏡なし顔画像 n_i に対し，推定結果 $\hat{n}_i|n_i, u_{j_k}$ ， $\hat{n}_i|m_i, u_{j_k}$ および眼鏡顔画像 m_i の類似度を求め，推定精度を定量的に評価する．以下，便宜上，次に示す記号，実験名を用いて説明する．

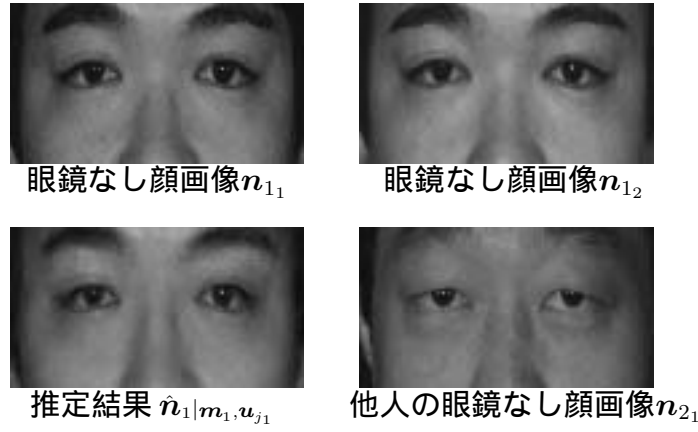


図 2.20: 定量的評価尺度を選択するために用いた顔画像

$\bar{S}_{1_k}$: n_i と $\hat{n}_i|m_i, u_{j_k}$ の平均類似度 (実験 1)

$\bar{S}_{2_k}$: n_i と $\hat{n}_i|m_i, u_{j_k}$ の平均類似度 (実験 2)

$\bar{S}_3$: n_i と m_i の平均類似度 (実験 3)

眼鏡なし顔画像 n_i と各対象画像との類似度 S_i について式 (2.33) により平均 $\bar{S}$ を求めた結果を表 2.3 に示し, 以下に要約する.

$$\bar{S} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \quad (2.33)$$

- $\bar{S}_{1_k}$ はいずれも 0.950 を上回る高い値となり, 精度良く眼鏡なし顔画像を推定できている. これより, 基底ベクトル u_{j_k} は式 (2.22) をほぼ満たしていると言える.
- $\bar{S}_{2_k}$ は, $\bar{S}_{1_k}$ に比べて約 0.100 ~ 0.200 ポイント低下した. これは, 眼鏡フレームやレンズの影響 (照明反射, 背景の写り込みなど) や, 眼鏡顔画像 m_i と眼鏡なし顔画像 n_{i_1} の間での顔状態 (目の開き具合や顔の y 軸周りの回転など) の変化が原因と考えられる.
- $\bar{S}_{2_k}$ は $\bar{S}_3$ に比べて約 0.080 ~ 0.100 ポイント向上しており, 本手法は眼鏡や顔状態の変化の影響を受けるものの, 眼鏡成分を抑え, 対象人物の眼鏡のない顔画像を良好に推定できている.

顔画像集合 F_2 は, 眼鏡顔画像 m_i の人物の眼鏡なし顔画像 n_{i_2} を含むため, u_{j_2} は対象人物の顔の特徴をより多く含んでいると考えられる. したがって, $\bar{S}_{2_2}$ は, $\bar{S}_{2_3}$ よりも高く

なることが予想される．しかしながら，実際には $\bar{S}_{2_2}$ は $\bar{S}_{2_3}$ に比べて 0.007 ポイントの向上に留まった．逆に，顔画像集合 F_3 には対象人物の眼鏡なし顔画像 n_{i_1} も n_{i_2} も含まれていないにも関わらず， $\bar{S}_{2_3}$ は $\bar{S}_{2_2}$ と同程度と言える．眼鏡顔画像 m_i と眼鏡なし顔画像 n_{i_2} の間での目の開き具合や顔の y 軸周りの回転などによる位置ずれが生じている場合， u_j に含まれる n_{i_2} の顔の特徴は式 (2.5) の q_{i_j} に対してあまり寄与せず，対象人物の顔の特徴が現れにくいと言える．これより， u_{j_2} と u_{j_3} はほぼ同等となり， $\bar{S}_{2_3}$ は $\bar{S}_{2_2}$ と同程度の値になったと考えられる．

同様に，表情顔画像を用いた場合の類似度の平均 $\bar{S}_{4_k}$ ， $\bar{S}_{5_k}$ ， $\bar{S}_6$ を表 2.4 に示す．無表情の顔画像を用いた場合と同様な傾向が見られる．実験 4～6 の各類似度は実験 1～3 よりも約 0.010～0.020 ポイントほど低下しているが，これは眼鏡表情顔画像 a_i と眼鏡なし表情顔画像 b_{i_1} および b_{i_2} との間における表情の相違が原因と考えられる．

表 2.3: 眼鏡なし顔画像 n_{i_1} と各対象画像との類似度 S_i の平均 $\bar{S}$

実験 No.	対象画像	類似度の平均
実験 1	$\hat{n}_i n_i, u_{j_1}$	$\bar{S}_{1_1} = 1.000$
	$\hat{n}_i n_i, u_{j_2}$	$\bar{S}_{1_2} = 0.967$
	$\hat{n}_i n_i, u_{j_3}$	$\bar{S}_{1_3} = 0.959$
実験 2	$\hat{n}_i m_i, u_{j_1}$	$\bar{S}_{2_1} = 0.840$
	$\hat{n}_i m_i, u_{j_2}$	$\bar{S}_{2_2} = 0.819$
	$\hat{n}_i m_i, u_{j_3}$	$\bar{S}_{2_3} = 0.812$
実験 3	m_i	$\bar{S}_3 = 0.729$

眼鏡なし顔画像 n_i と推定結果 $\hat{n}_i|n_i, u_{j_k}$ との類似度 S が低下する原因としては，2.3.2 節において，レンズの度が強い，レンズ上の照明反射領域が大きい，縁の太い眼鏡フレーム，といった眼鏡の影響が大きい場合について示した．しかしながら，この他にも推定精度が低下する場合がある．図 2.21 に示す人物 7 の場合，レンズの度が特に強いわけではない．また，レンズ上に照明反射領域はなく，眼鏡フレームの縁も細いタイプの眼鏡である．ところが，人物 7 の眼鏡なし顔画像を推定するとボケが生じ，類似度も 0.772 に留まる．この原因と解決方法については，次章で述べる．

表 2.4: 眼鏡なし表情顔画像 b_{i_1} に対する各対象の類似度の平均 $\bar{S}_{1_k}$, $\bar{S}_{2_k}$, $\bar{S}_3$

実験 No.	対象画像	類似度の平均
実験 4	$\hat{b}_i b_i, u_{j_1}$	$\bar{S}_{4_1} = 1.000$
	$\hat{b}_i b_i, u_{j_2}$	$\bar{S}_{4_2} = 0.957$
	$\hat{b}_i b_i, u_{j_3}$	$\bar{S}_{4_3} = 0.952$
実験 5	$\hat{b}_i a_i, v_{j_1}$	$\bar{S}_{5_1} = 0.825$
	$\hat{b}_i a_i, v_{j_2}$	$\bar{S}_{5_2} = 0.799$
	$\hat{b}_i a_i, v_{j_3}$	$\bar{S}_{5_3} = 0.795$
実験 6	a_i	$\bar{S}_6 = 0.713$

人物 7

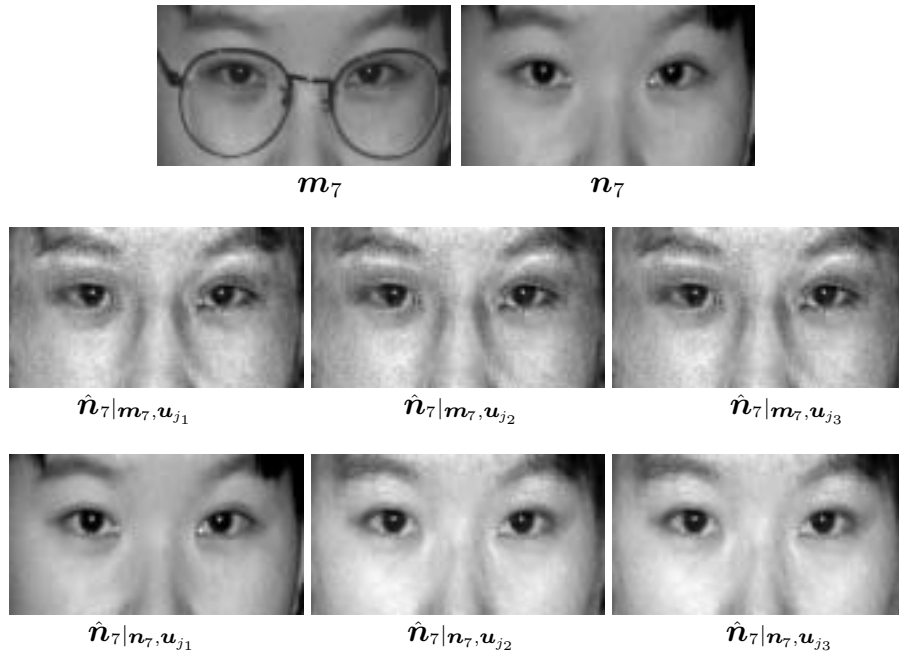


図 2.21: 推定精度が低下する例 (眼鏡フレーム: 細, レンズの影響: 小)

2.5 結言

本章では、主成分分析により求めた眼鏡なし顔画像の基底ベクトルを用いた、新しい顔画像推定方法を提案した。

眼鏡顔画像から眼鏡なし顔画像を良好に安定して推定するためには、閾値に依存せず、かつ、広範囲にわたる遮蔽物体を除去する方法を構築する必要がある。そのためには、眼鏡なし顔画像の輝度パターンの特徴を的確に表現する必要がある。本章では、相関を持った眼鏡なし顔画像集合の特徴を効率よく表現する部分空間を解析的に求める方法として主成分分析を適用して求めた基底ベクトルにより「眼鏡をかけていない顔」の特徴を表現し、眼鏡顔画像をこの基底ベクトルで張られる空間に射影することにより、眼鏡顔画像内に含まれる眼鏡なし顔の特徴だけを抽出する方法を提案した。

この基底ベクトルと眼鏡顔画像との内積の値は、その基底ベクトルに含まれる眼鏡顔の人物の特徴を表すと考えられる。そこで、眼鏡顔画像と基底ベクトルとの内積値を荷重とした、基底ベクトルの荷重線形和により眼鏡なし顔画像を推定した。

以下に、本章で得られた成果をまとめる。

- 眼鏡なし顔画像の基底ベクトルを用いた新しい顔画像推定法を提案した。本手法は、対象人物の顔の特徴を有した主観的に忠実な眼鏡なし顔画像を推定できる。また、表情顔画像（笑い顔）へも適用できる柔軟な方法であることを示した。
- 眼鏡なし顔画像の推定は、服の襟などの影響を抑制するために顔の上部領域を用いて検討したが、種々の応用に適応できるよう、眼鏡なし顔画像推定結果に下半分顔画像を合成する方法を提案した。
- 本手法により求めた基底ベクトルの妥当性を評価するために、眼鏡なし顔画像を忠実に推定するための基底ベクトルの条件を明らかにし、求めた基底ベクトルがその条件を満足していることを示した。

1. 眼鏡なし顔画像の対象人物の個性が表現できる。
2. 眼鏡の成分と直交している。

まず、求めた基底ベクトルが眼鏡なし顔画像を表現できることを示した。次に、各基底ベクトルは眼鏡の成分と完全には直交していないものの、推定結果に眼鏡の成分が現れないことから条件をほぼ満足していると結論づけ、本手法の妥当性を示した。

- 推定精度の定量的な評価方法の検討を行い，眼鏡なし顔画像との類似度により評価する方法を採用し，0.800 を越える高い推定精度を得た．表情顔画像の場合には眼鏡なし顔画像との表情の違いから，無表情の場合に比べて 0.020 ポイント程度低下した．

上記のように，提案方法は顔の個人性を良好に保存しつつ（原パターンとの類似度が 0.800 以上），眼鏡顔画像から眼鏡なし顔画像を推定できる優れた方法である．さらに，異なる表情にも適用できる柔軟な手法である．顔画像解析や個人識別の研究では，撮影条件（照明，位置，向きなど）の影響やノイズなどの影響により，正規化を行っても同じ人物の顔パターンは分散している（いわゆる級内分散に相当）ので，識別精度は 80～95 % 程度である．本研究で推定した顔画像は，目標とする原パターンとの類似度という簡易な尺度でも 0.800 以上の値が得られており，これは原パターンを辞書とみなせば簡易な個人識別で 0.800 以上の高い類似度が得られたことに相当するので，ほぼ目標を満足できる推定精度が得られたと考えている．

ただし，課題もある．本研究では除外して検討しているレンズの度が強い，レンズ上の照明反射領域が大きい，縁の太い眼鏡フレームなどの悪条件（いわゆるいじわるテスト）では，推定画像にボケが生じた．これは，画像パターンの特徴が眼鏡の影響によって大きく損なわれてしまい，もはや推定を行える環境を外れているものと受け止めている．本手法の適用できるこれら条件の限界を定量的に示すことは必要であるが，各条件が独立ではないので，現時点では明らかにできていない．これは今後の課題としたい．上記の他，それほど悪条件といえない場合でも推定精度が低下することがあった．その原因と対策については，次章において詳述する．

第 3 章

非線形射影による眼鏡なし顔画像の推定

3.1 序言

前章では、「appearance ベースによる方法」の枠組として基底ベクトルを用いた眼鏡なし顔画像の推定方法を提案した．この方法では，例えば，図 3.1 に示す人物 7 の場合に対して眼鏡なし顔画像を推定するとボケが生じ，類似度が 0.772 に大きく低下した．

人物 7

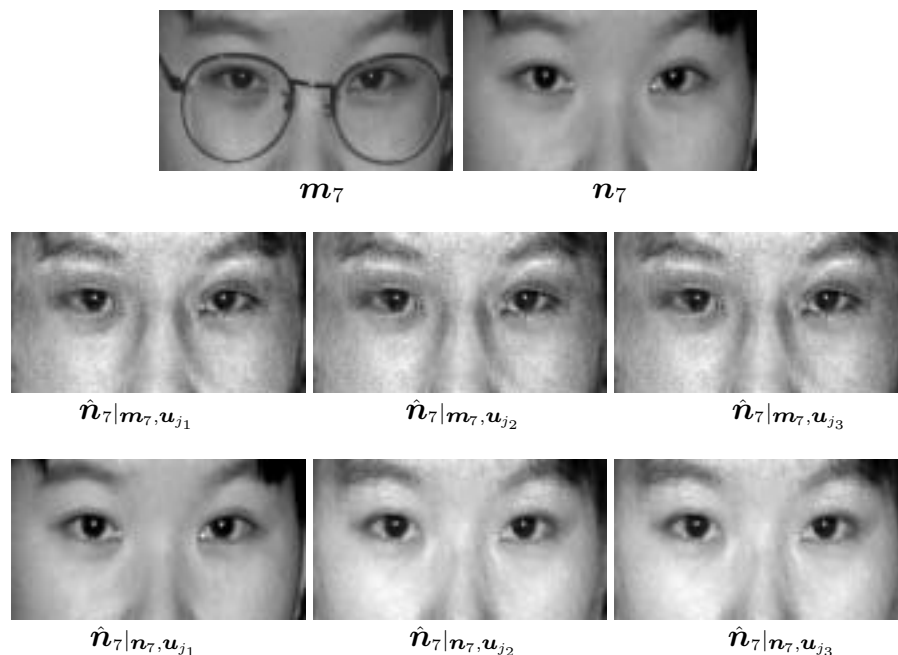


図 3.1: 推定精度が低下する例（眼鏡フレーム：細，レンズの影響：小）

どのような場合に推定精度が低下するのか検討したところ，眼鏡フレームの輝度値と肌領域の輝度値の絶対差 da_i が関連することが判った．眼鏡顔画像 m_i の l 番目の要素を m_{il} ，眼鏡フレーム領域 e の画素数を L_e ，それ以外の肌領域を L_s として，眼鏡フレーム領域の平均輝度 $\bar{e}_i$ と肌領域の平均輝度 $\bar{s}_i$ の絶対差 da_i を式 (3.1)(3.2)(3.3) により求める．

$$da_i = |\bar{e}_i - \bar{s}_i| \quad (3.1)$$

$$\bar{e}_i = \frac{1}{L_e} \sum_{l \in e} m_{il} \quad (3.2)$$

$$\bar{s}_i = \frac{1}{L_s} \sum_{l \notin e} m_{il} \quad (3.3)$$

表 3.1 に示すように， d_i が大きい場合，類似度が低下する傾向がある．

表 3.1: 眼鏡フレーム領域の平均輝度と顔領域の平均輝度の絶対差 d_i と類似度 S_i

人物	絶対差 d_i	類似度 S_i
1	7	0.922
2	7	0.844
3	-6	0.817
4	-4	0.741
5	4	0.783
6	46	0.720
7	45	0.772

そこで，眼鏡フレーム領域の輝度値と画像推定精度との関係について検討する．眼鏡顔画像と眼鏡なし顔画像との間には，若干ながら表情や目の開き方に相違が生じたり，眼鏡のレンズの影響を受けるので，これらの影響を除外して検討するために，ここでは眼鏡なし顔画像に眼鏡フレーム領域を付加して作成した合成眼鏡顔画像を用いる．

正規化した眼鏡顔画像から抽出した眼鏡フレーム領域 e の領域内を 0～255 の範囲の一定輝度値 r で置換する． n_{il} を眼鏡なし顔画像を示す列ベクトル n_i の l 番目の要素を表すものとし，合成眼鏡顔画像 n'_i の要素 n'_{il} を次式により求める．

$$n'_{il} = \begin{cases} r & (l \in e) \\ n_{il} & (l \notin e) \end{cases} \quad (3.4)$$

作成した合成眼鏡顔画像に対して眼鏡なし顔画像推定実験を行った．なお，集合 F_3 の基底ベクトル u_{j_3} を用いた．

眼鏡フレーム領域内の全画素の輝度値を 0～255 に変化させたときの推定精度の変化を図 3.2 に示す．リムなし眼鏡をかけている人物 1，リムあり眼鏡をかけている人物 2，太い縁の眼鏡をかけている人物 6，そして人物 7 について示した．

また，推定精度最大時の輝度値の合成眼鏡顔画像と推定結果を図 3.3 に示す．

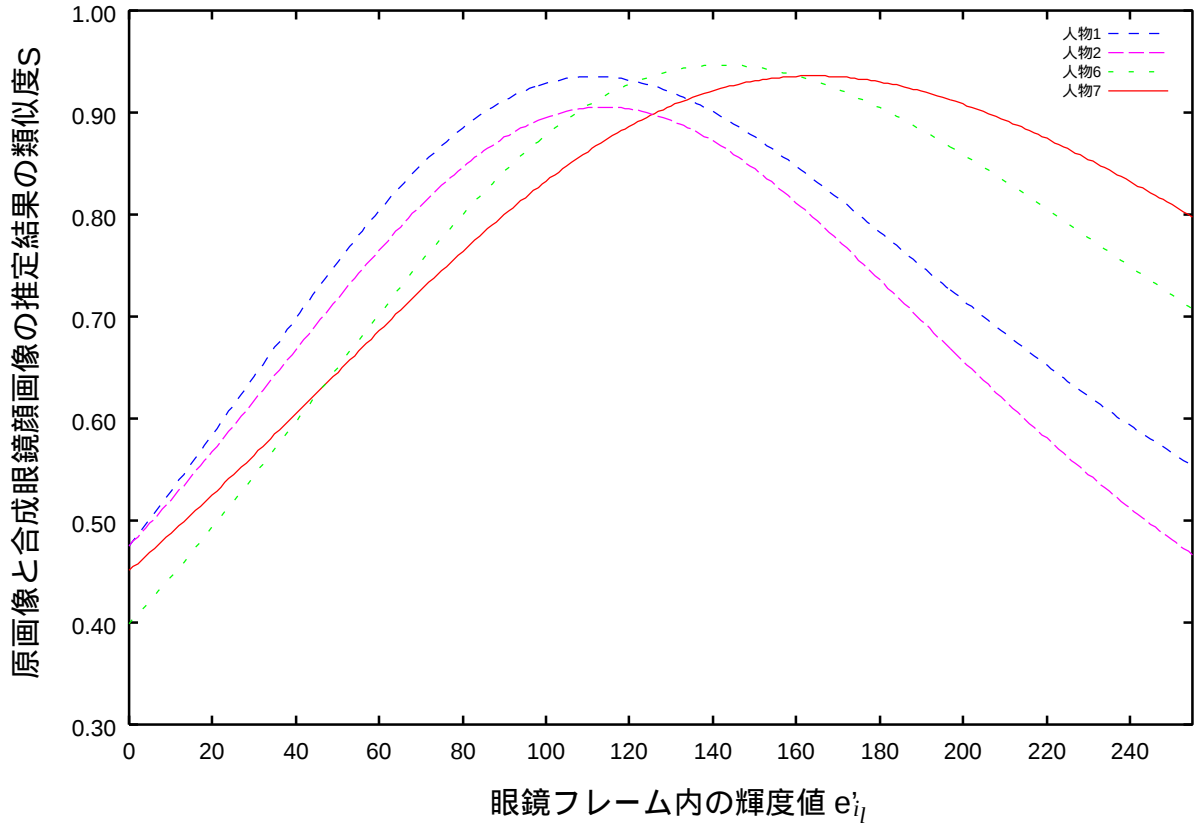


図 3.2: 眼鏡フレーム領域内の輝度値 r_i に対する原画像と合成眼鏡顔画像の推定結果との類似度 S

図 3.2 より，推定精度の変化は単峰性であり，眼鏡フレーム領域の輝度値が高すぎても低すぎても推定精度が低下することが判る．人物 1～4 を含む推定結果 30 例について推定精度が最大となるときの眼鏡フレーム領域の輝度値 r_i と画像平均輝度 $\bar{n}_i$ の絶対差 da_i の平均 $\overline{da}$ ，最小値 da_{min} ，最大値 da_{max} を求めた．

$$da_i = |r_i - \bar{n}_i| \quad (3.5)$$

人物 1



人物 2



人物 6



人物 7



眼鏡なし顔画像 n_i 合成眼鏡顔画像 n'_i 推定結果 m'_i

図 3.3: 合成眼鏡顔画像に対する推定結果（推定精度最大時）。

$$\bar{da} = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} da_i \quad (3.6)$$

$$da_{min} = \min_i(da_i) \quad (3.7)$$

$$da_{max} = \max_i(da_i) \quad (3.8)$$

表 3.2 に示す計算結果から，推定精度が最大となる時の眼鏡フレーム領域の輝度値 r_i は，平均輝度から大きく外れていないことが判る．この結果から，眼鏡フレーム領域の平均輝度と画像平均輝度の絶対差 da_i が小さい場合に推定精度が高くなり，入力画像が眼鏡なし顔画像の輝度パターンに近い方が推定精度が向上すると考えられる．これは，眼鏡なし顔画像を入力として眼鏡なし顔画像を推定した場合の推定精度が高いことから考察できる．したがって，眼鏡顔画像そのものを用いて眼鏡なし顔画像を推定するよりも，眼鏡フレーム領域を抽出してその画素の輝度値を置換（非線形変換）してから画像推定することにより，入力画像を直接用いるよりも推定精度が改善することが期待できる．

表 3.2: 推定精度が最大となる時の輝度値と画像平均輝度の絶対差（30 例）の平均 $\bar{da}$ ，最小値 da_{min} ，最大値 da_{max}

絶対差の平均 $\bar{da}$	11.7
絶対差の最小値 da_{min}	1.0
絶対差の最大値 da_{max}	26.0

本章では，まず，小さなベクトルを用いた簡単な例を通じ，輝度値の部分的な置換により推定精度が向上することを示す．続いて，実画像に適用し，本研究で目標としている眼鏡なし顔画像（原パターン）の推定が行えることを示す．

3.2 非線形射影による眼鏡なし顔画像の推定方法

本節では，眼鏡フレーム領域内の輝度値を非線形変換することで眼鏡なし顔画像の推定精度が向上することを示す．

前章では，眼鏡顔画像 m から眼鏡なし顔画像 n を推定する方法として， N 枚の眼鏡なし顔画像からなる集合の基底ベクトル u_j を用いて

$$\hat{n} = \sum_{j=1}^{N-1} \{u_j^t \cdot (m - \bar{n})\} u_j + \bar{n} \quad (3.9)$$

$$\bar{n} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i \quad (3.10)$$

として推定結果 $\hat{n}$ を求めればよいことを示した．

このとき，眼鏡顔画像 m は，眼鏡なし顔成分 n と眼鏡成分 e を用いて

$$m = n + e \quad (3.11)$$

と表すことができると考えられるので， n と e の各々について基底ベクトルを用いて線形射影することを考える． n については，

$$\sum_{j=1}^{N-1} \{u_j^t \cdot (n - \bar{n})\} u_j + \bar{n} = n \quad (3.12)$$

となり，元の眼鏡なし顔画像 n を忠実に表現できる．一方，眼鏡成分 e については，

$$\lim_{e \rightarrow 0} \sum_{j=1}^{N-1} (u_j^t \cdot e) u_j = 0 \quad (3.13)$$

として，眼鏡成分 e を 0 に近づけることにより，誤差を低減できると考えられる．

以下，次に示す次元数 3 のベクトル n_1 と n_2 を要素とする集合 F を用いた簡単な例を示す．

$$n_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad n_2 = \begin{bmatrix} 3 \\ 1 \\ 3 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

この集合 F の平均ベクトル $\bar{n}$ および共分散行列 C は次のようになる．

$$\bar{n} = \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ 2 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$C = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 (n_i - \bar{n})(n_i - \bar{n})^t \quad (3.16)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

この C について式 (3.18) を満たす基底ベクトル u_j を求める．

$$C u_j = \lambda u_j \quad (3.18)$$

まず，固有値 λ を求める．

$$\begin{vmatrix} 1-\lambda & -1 & 1 \\ -1 & 1-\lambda & -1 \\ 1 & -1 & 1-\lambda \end{vmatrix} = \lambda^2 (\lambda - 3) = 0 \quad (3.19)$$

よって固有値 $\lambda_1 = 3$, $\lambda_2 = 0$ である． $\lambda_1 = 3$ に対応する基底ベクトル $\mathbf{u}_1$ は，

$$\begin{bmatrix} -2 & -1 & 1 \\ -1 & -2 & -1 \\ 1 & -1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{1_1} \\ u_{1_2} \\ u_{1_3} \end{bmatrix} = \mathbf{O} \quad (3.20)$$

$$\mathbf{u}_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

となり， $\lambda_2 = 0$ に対応する基底ベクトル $\mathbf{u}_2$ は，

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{2_1} \\ u_{2_2} \\ u_{2_3} \end{bmatrix} = \mathbf{O} \quad (3.22)$$

$$\mathbf{u}_2 = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

となる．このとき， n_1 の第 1 要素が変化したベクトル $\mathbf{m}_1 = [4 \ 3 \ 1]^t$ を考え，基底ベクトル $\mathbf{u}_1$, $\mathbf{u}_2$ を用いて $\mathbf{m}_1$ から n_1 を推定し， $\hat{n}_1|_{m_1, u_j}$ を求める．

$$q_{1_1} = (\mathbf{m}'_1 - \bar{\mathbf{n}}) \cdot \mathbf{u}_1 \quad (3.24)$$

$$= [2 \ 1 \ -1] \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (3.25)$$

$$q_{1_2} = (\mathbf{m}'_1 - \bar{\mathbf{n}}) \cdot \mathbf{u}_2 \quad (3.26)$$

$$= [2 \ 1 \ -1] \cdot \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{3}{\sqrt{6}} \quad (3.27)$$

$$\hat{\mathbf{n}}_1|_{m_1, u_j} = \sum_{j=1}^2 q_{1j} \mathbf{u}_j + \bar{\mathbf{n}} \quad (3.28)$$

$$= \begin{bmatrix} 2.5 \\ 3.0 \\ 2.5 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

このとき， $\mathbf{n}_1$ と推定結果 $\hat{\mathbf{n}}_1|_{m_1, u_j}$ の誤差は

$$\hat{\mathbf{n}}_1|_{m_1, u_j} - \mathbf{n}_1 = \begin{bmatrix} 1.5 \\ 0.0 \\ 1.5 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

である．次に， m_1 の第 1 要素が変化したベクトル $\mathbf{m}'_1 = [2 \ 3 \ 1]^t$ について考え， $\mathbf{m}'_1$ から $\mathbf{n}_1$ を推定し， $\hat{\mathbf{n}}_1|_{m'_1, u_j}$ を求める．

$$q'_{1_1} = (\mathbf{m}'_1 - \bar{\mathbf{n}}) \cdot \mathbf{u}_1 \quad (3.31)$$

$$= [0 \ 1 \ -1] \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{-2}{\sqrt{3}} \quad (3.32)$$

$$q'_{1_2} = (\mathbf{m}'_1 - \bar{\mathbf{n}}) \cdot \mathbf{u}_2 \quad (3.33)$$

$$= [0 \ 1 \ -1] \cdot \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{6}} \quad (3.34)$$

$$\hat{\mathbf{n}}_1|_{m'_1, u_j} = \sum_{j=1}^2 q'_{1j} \mathbf{u}_j + \bar{\mathbf{n}} \quad (3.35)$$

$$= \begin{bmatrix} 1.5 \\ 3.0 \\ 1.5 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

このとき， $\mathbf{n}_1$ と推定結果 $\hat{\mathbf{n}}_1|_{m'_1, u_j}$ の誤差は

$$\hat{\mathbf{n}}_1|_{m'_1, u_j} - \mathbf{n}_1 = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.0 \\ 0.5 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

である． m_1 から n_1 を直接的に推定するよりも， m'_1 から n_1 を推定することにより，誤差が $\frac{1}{3}$ に抑えられている．

同様に，基底ベクトル u_j を用いて眼鏡顔画像 m_i から直接的に眼鏡なし顔画像 n_i を推定するよりも，非線形変換画像 m'_i を用いて推定した方が推定精度が向上すると考えられる．ここで， m_i から m'_i を求めるには，2つの事項を考えなければならない．その1つは「非線形変換するベクトルの要素をどのように撰択するか」ということであり，もう1つは「撰択したベクトルの要素をどのような値に変換するか」ということである．前者について，非線形変換するベクトルの要素は，眼鏡フレーム領域内の要素である．また，後者については，眼鏡顔画像から眼鏡なし顔画像の推定を行うので，変換する値としては肌領域の輝度値が相応しいと考えられる．

3.3 眼鏡フレーム領域の抽出

眼鏡顔画像内の眼鏡フレーム領域の輝度値の非線形変換を行うには，まず，眼鏡フレーム領域をあらかじめ抽出する必要がある．

眼鏡フレーム領域の抽出方法としては，いくつか考えられる．例えば，眼鏡フレームの輝度値が，ある範囲内に限定されていることが明らかな場合には，閾値処理により求めることができる．また，眼鏡フレームの輝度値に影響を受けない抽出方法としては，後の章で述べるモデルベースによる方法が適用できる．本章では，眼鏡フレームの輝度値やリムの有無に影響を受けない，眼鏡フレームモデル（4章参照）を用いて眼鏡フレーム領域の抽出を行う．

3.4 非線形射影による眼鏡なし顔画像推定結果

非線形射影による眼鏡なし顔画像推定実験を行った．眼鏡フレーム領域内の輝度値の置換は，画像平均輝度で置換する方法と，周囲の肌領域の輝度値を用いた線形補間による方法の2通りについて検討した．

3.4.1 画像平均輝度による置換

眼鏡顔画像 m_i から眼鏡フレーム領域 e_i 内の輝度値を式 (3.38)(3.39) により置換し, m_i'' を求める. ここで, m_{i_l}'' は m_i'' の l 番目の要素, L_i'' は m_i 内の e_i 以外の画素数を示すものとする.

$$m_{i_l}'' = \begin{cases} \bar{n}_i'' & (l \in e_i) \\ m_{i_l} & (l \notin e_i) \end{cases} \quad (3.38)$$

$$\bar{n}_i'' = \frac{1}{L_i''} \sum_{l \notin e_i} n_{i_l} \quad (3.39)$$

眼鏡顔画像 m から直接的に推定した結果 $\hat{n}|_{m_i, u_{j_3}}$ を図 3.4 に示す. 置換した結果 m_i'' およびそれを用いて眼鏡なし顔画像を推定した結果 $\hat{n}_i|_{m_i'', u_{j_3}}$ を図 3.5 および 3.6 に示す. 特に人物 1,2 の場合, 図 3.4 では眼鏡フレーム形状に類似した低輝度領域が現れているのに対し, 図 3.5 では低輝度領域は現れず, 主観的に推定結果が改善されていることが判る.

眼鏡なし顔画像 n_i と眼鏡顔画像から直接的に推定した結果 $\hat{n}_i|_{m_i, u_{j_3}}$ との類似度 S_1 と, n_i と $\hat{n}_i|_{m_i'', u_{j_3}}$ との類似度 S_2 を図 3.7 に示す. また, S_1 と S_2 の差を図 3.8 に示す. 眼鏡顔画像から直接的に推定した場合を上回ったのは 30 例中 8 例であった. 人物 1,2 では推定精度が改善されているものの, 人物 3,4 の場合は逆に低下している. このことから, 眼鏡フレーム領域内の輝度値を画像平均輝度で置換するだけでは, 眼鏡顔画像から直接的に眼鏡なし顔画像を推定する場合に比べて推定精度が改善されとは限らないことが判る. より精度を改善するためには, 肌の輝度パターンに近づける必要があると考えられる.

3.4.2 線形補間による置換

眼鏡フレーム領域内の輝度値を肌領域の平均輝度値で一元的に置換した場合, 特に顔の輪郭周辺での低輝度領域を補間することは困難である. そこで本項では, 眼鏡フレーム領域内の輝度値をその周辺の肌の輝度値を用いて線形補間により内挿して置換した結果 m_i''' を用いる [91]. 置換した結果 m_i''' およびそれを用いて眼鏡なし顔画像を推定した結果 $\hat{n}_i|_{m_i''', u_{j_3}}$ を図 3.9, 3.10 に示す. 眼鏡顔画像から直接的に推定した結果 $\hat{n}_i|_{m_i, u_{j_3}}$ および前項で推定した結果 $\hat{n}_i|_{m_i'', u_{j_3}}$ に比べ, 鼻筋やまぶたなど主観的に良好な推定結果が得られた.

眼鏡なし顔画像 n_i と推定結果 $\hat{n}_i|_{m_i''', u_{j_3}}$ との類似度 S_3 を図 3.11 に示す. また, S_1 と S_3

人物 1



人物 2



人物 6



人物 7



眼鏡顔画像 m_i

推定結果 $\hat{n}_i|_{m_i, u_{j_3}}$

眼鏡なし顔画像 n_i

図 3.4: 眼鏡顔画像 m_i に対する眼鏡なし顔画像推定結果 $\hat{n}_i|_{m_i, u_{j_3}}$

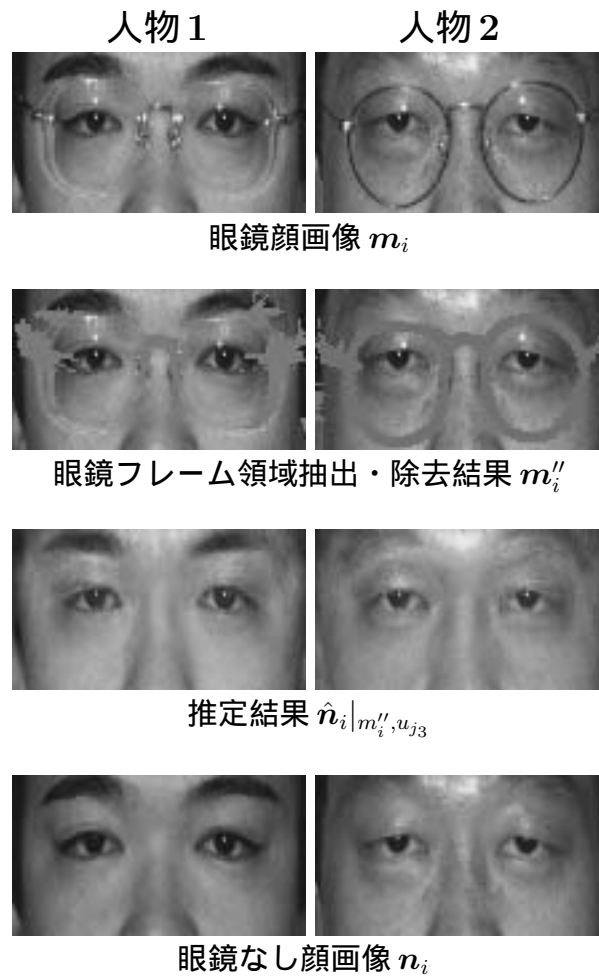


図 3.5: 眼鏡フレーム領域内を画像平均輝度で置換した結果を用いた推定結果

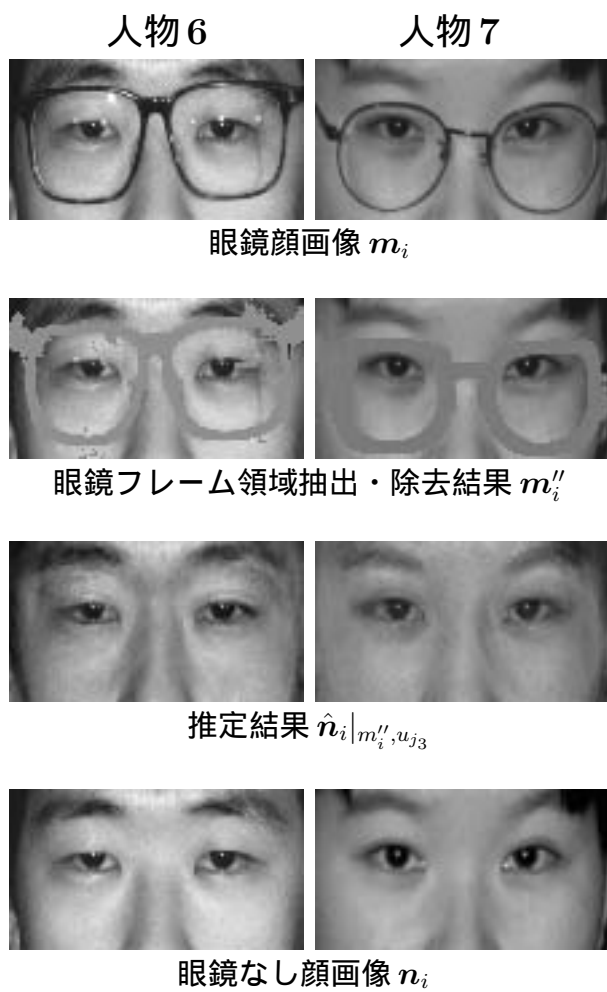


図 3.6: 眼鏡フレーム領域内を画像平均輝度で置換した結果を用いた推定結果（続き）

との差を図 3.12 に示す．全ての例で眼鏡顔画像から直接的に推定した場合を上回った（平均 0.040 ポイント）．線形補間は簡易的な方法ではあるが，眼鏡フレームの影響を軽減し，肌のように滑らかな輝度変化を補うためには有効な方法であると言える．

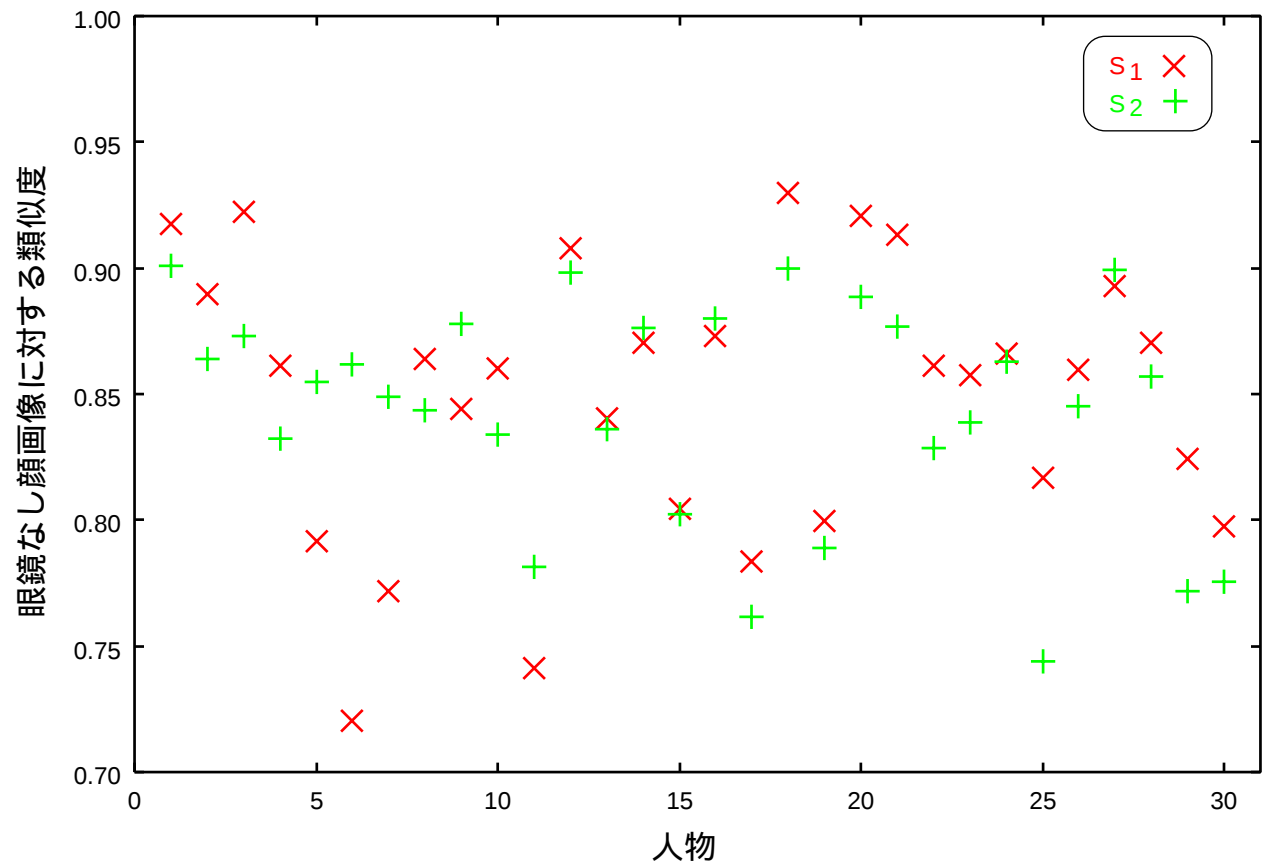


図 3.7: 眼鏡なし顔画像に対する類似度 S_1 , S_2

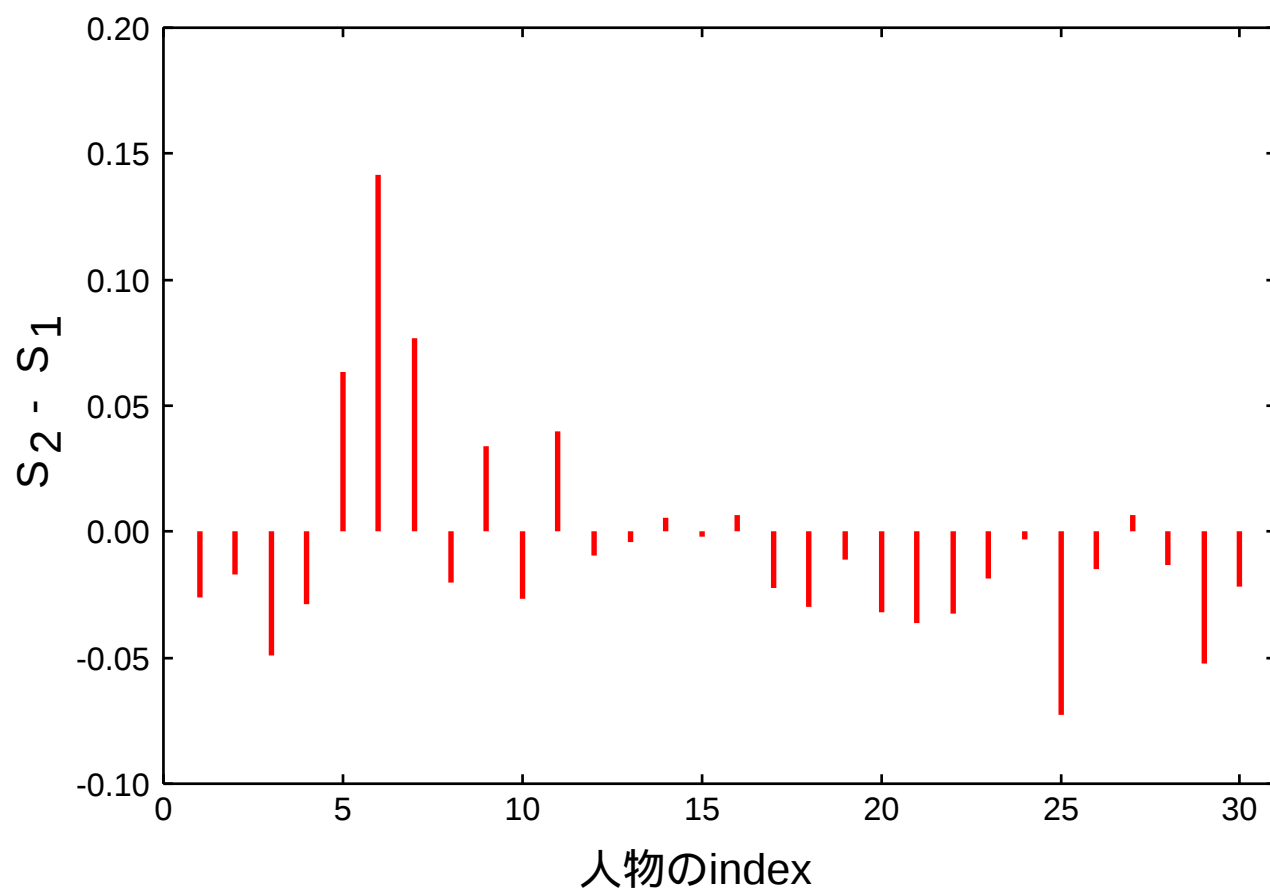


図 3.8: 類似度 S_1 と S_2 の差

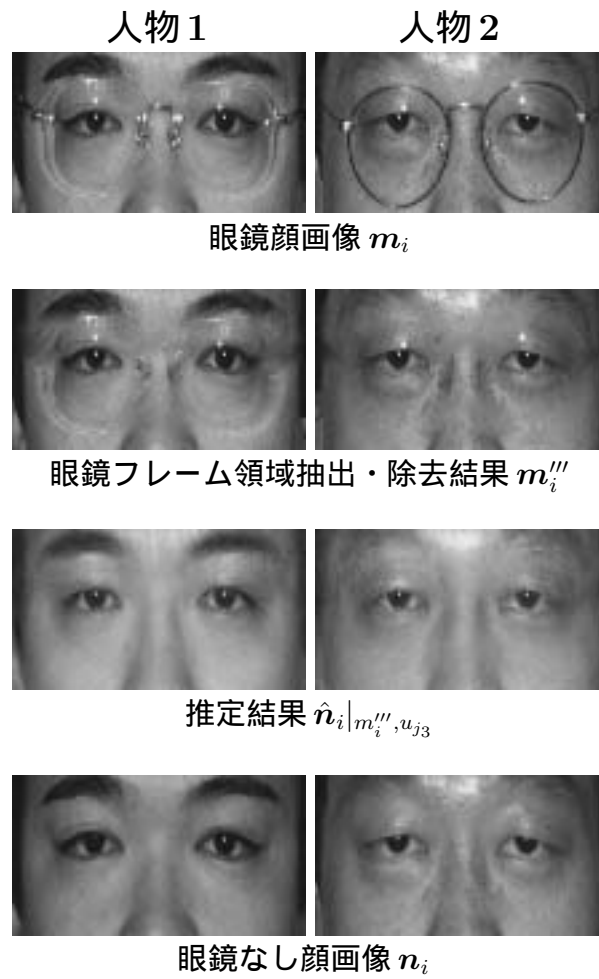


図 3.9: 眼鏡フレーム領域内を線形補間により置換した結果を用いた推定結果

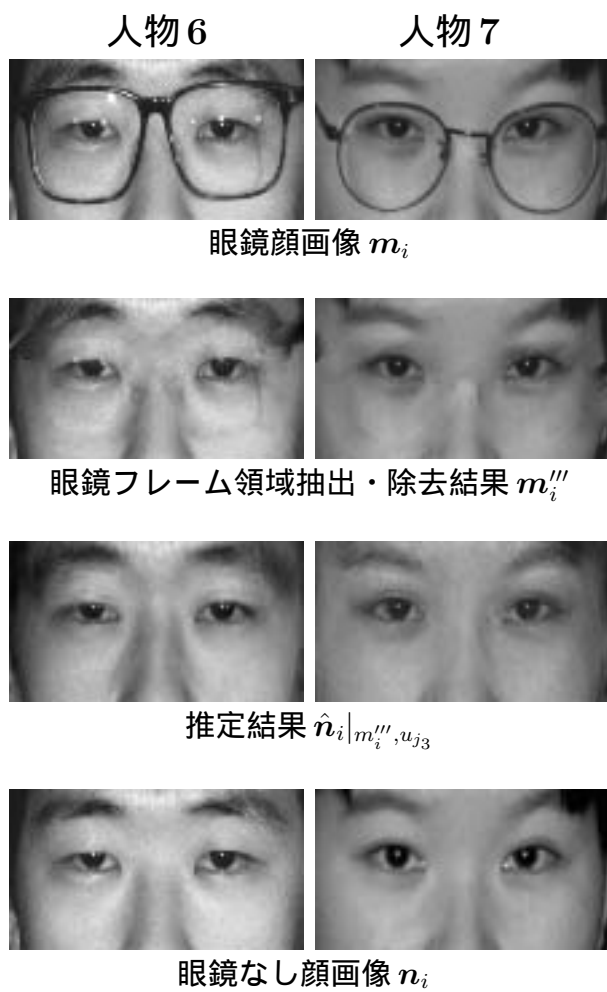


図 3.10: 眼鏡フレーム領域内を線形補間により置換した結果を用いた推定結果（続き）。

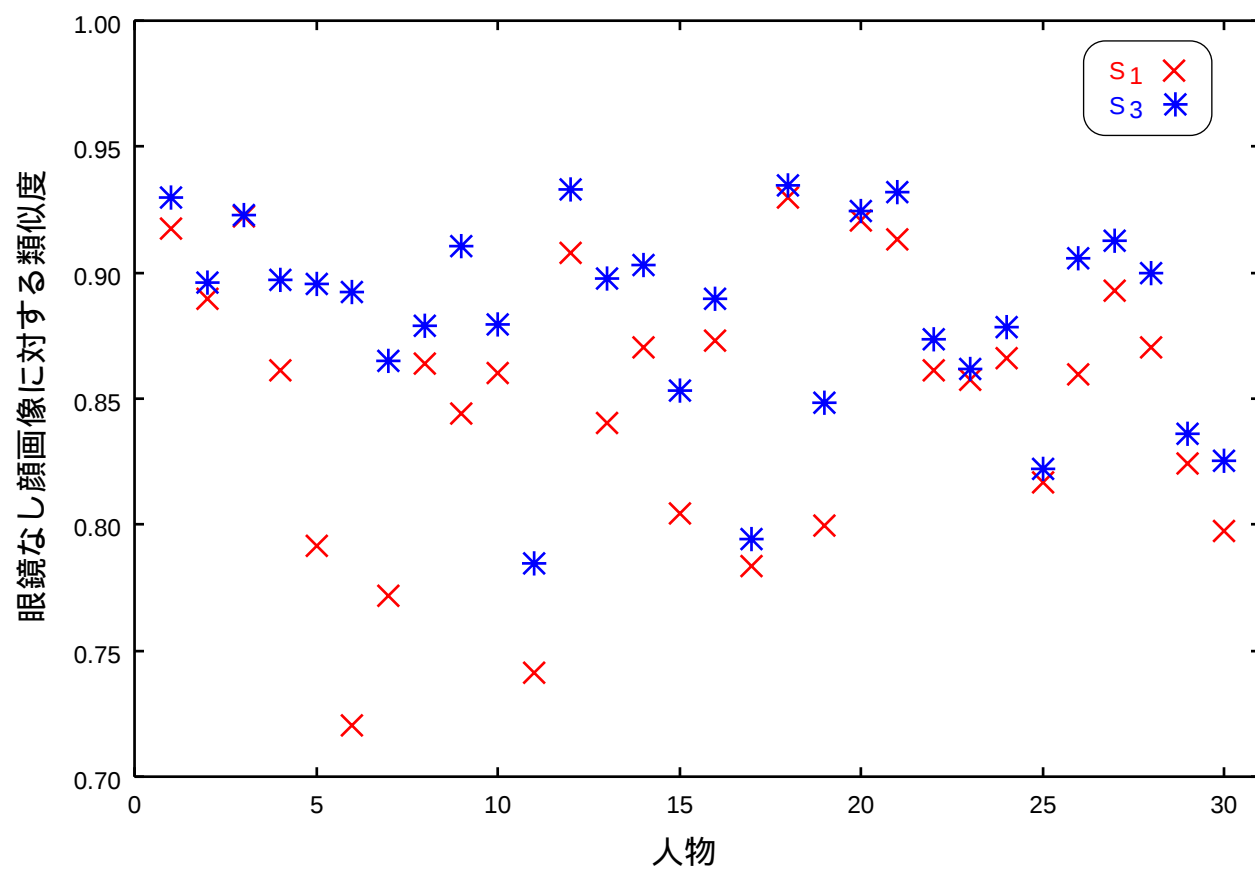


図 3.11: 眼鏡なし顔画像に対する類似度 S_1 , S_3

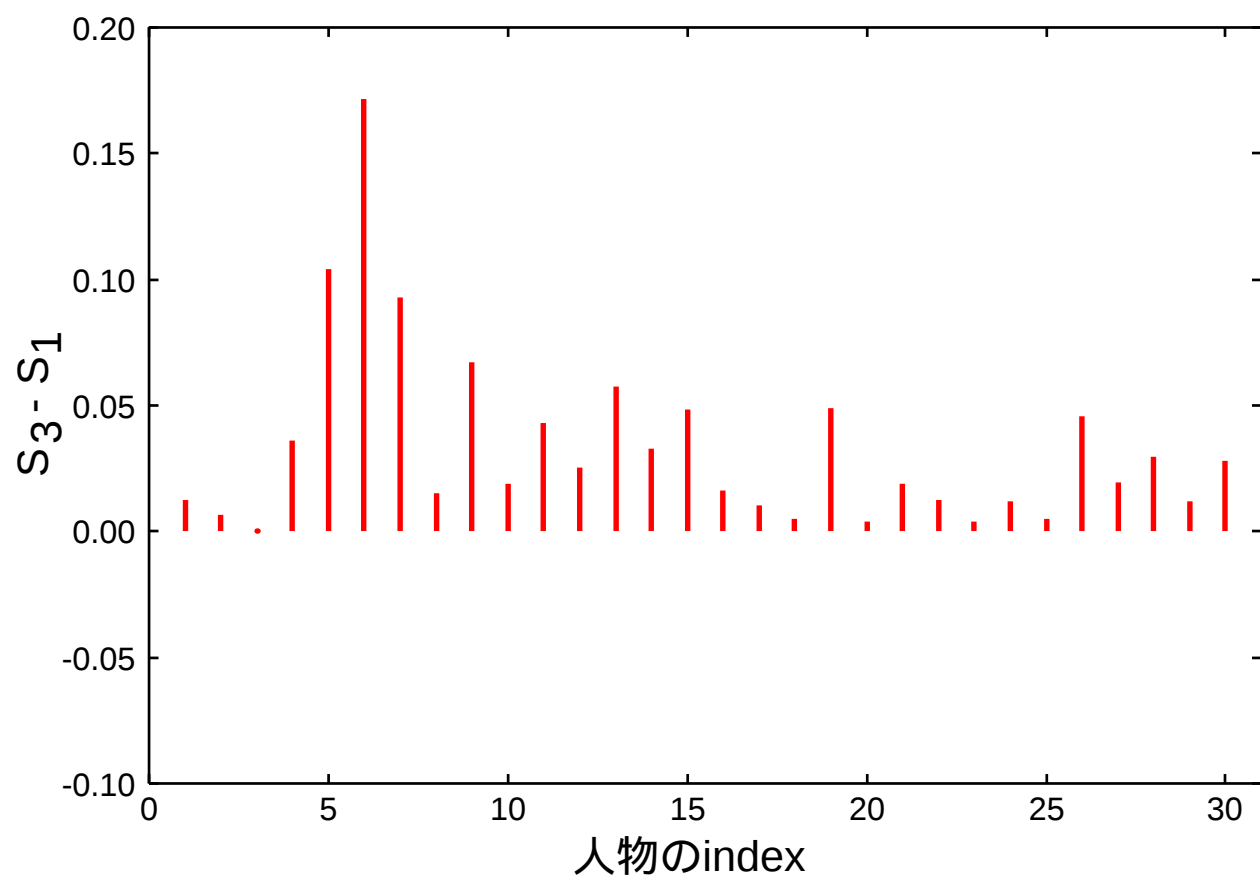


図 3.12: 類似度 S_1 と S_3 の差

3.5 結言

本章では、前章で「appearance ベースによる方法」の枠組として提案した、基底ベクトルによる眼鏡なし顔画像の推定方法の問題点として、眼鏡フレームの輝度値の影響を受けることを明らかにした。そこで、この問題に対応するために、眼鏡フレーム領域を抽出・除去した後に、線形射影する方法（系全体として非線形射影する方法）を提案した。

以下に、本章で得られた成果をまとめる。

- 合成眼鏡顔画像を用いて、眼鏡フレーム領域の輝度値と、基底ベクトル用いた眼鏡なし顔画像推定結果の推定精度の関係を明らかにした。推定精度が高くなる場合は、眼鏡フレーム領域の輝度値が画像平均付近であることが明らかとなった。
- model ベースによる方法を用いて眼鏡顔画像内の眼鏡フレーム領域の抽出し、画像平均輝度で置換した後に線形射影する方法を提案した。基底ベクトルを用いた方法に比べて推定精度が改善できた（30 例中 8 例）。
- より精度よく推定するために、眼鏡フレーム領域の輝度値の置換において、線形補間により肌の輝度パターンを近似した後に線形射影する方法を提案した。全ての場合について、眼鏡顔画像から直接的に推定した場合の類似度を平均で 0.040 ポイント上回り、本手法の有効性を示した。

本章の方法により、前章提案した方法の適用範囲を拡げることができ、推定結果を本研究で目標としている眼鏡なし顔画像（原パターン）により近づけることができた。ただし、これには眼鏡領域周辺を別途検出する処理が必要であることを忘れてはならない。この領域抽出も appearance ベースで実現するのが理想であるが、顔の目や鼻などと隣接した眼鏡領域の検出は難しい。次章で述べる model ベースによる方法などの領域抽出方法と組み合わせたハイブリッドな方法を採らざるを得ない。

一般的に、appearance ベースによる方法は、顔画像を良好に推定することができるが、画像の位置ずれに対して敏感であるという問題点がある。実画像においては正規化の精度には限界があり、ほとんどの顔画像研究では正規化を手動で細かく設定するか、正しくできたものと仮定している。本提案方法も正規化誤差による位置ずれや顔の水平方向の回転によって推定精度は大幅に低下する（6.2.6～6.2.7 に詳述）。実用性を考えると、このような位置ずれなどに対して robust な方法を構築する必要がある。

次の第 II 部で述べる model ベースによる方法は、顔画像の正規化を要しない方法である。第 I 部で述べた appearance ベースによる方法は、眼鏡顔画像内の眼鏡なし顔の特徴を抽出する方法であったが、第 II 部で述べる model ベースによる方法は、眼鏡顔画像内の眼鏡フレーム領域を抽出・除去する方法である。

第 II 部

model ベースによる眼鏡なし顔画像の推定

序

第 I 部では，顔画像の輝度情報を扱う「appearance ベースによる推定方法」を述べた．眼鏡顔画像を眼鏡なし顔の特徴を表現する部分空間に射影し，眼鏡なし顔画像を良好に推定できることを示した．このように，appearanace ベースによる方法は優れた特性を持つが，顔画像の位置ずれに対して敏感なため，正規化を要する．

第 II 部では，正規化を要しない眼鏡なし顔画像推定方法として，眼鏡フレームの形状特徴に着目し，眼鏡フレーム形状をモデル化して抽出・除去する「model ベースによる推定方法」について述べる．

第 4 章

パラメトリック眼鏡フレームモデルを用いた眼鏡なし顔画像の推定

4.1 序言

第 I 部で述べた appearance ベースによる方法は，眼鏡顔画像内の眼鏡なし顔の特徴を抽出する方法であったが，画像の位置ずれに敏感なために，高精度な眼鏡なし顔画像推定を行うには，顔画像の正規化が不可欠である（行うのは難しい）．顔画像の正規化が精度よく実行できる場合は appearance ベースによる方法は有効であるが，実際には顔画像の正規化が常に良好に行えるとは限らない（位置ずれなどの正規化の誤差による推定精度への影響については，6.2.6 項に示してある）．

一方，正規化を不要とするアプローチもある．大関らは動画画像の知的符号化のための眼鏡フレーム領域を抽出・除去方法を検討しているが [58, 59]，正規化を行わないものの代わりに顔の動き推定情報を用いて初期フレームから手動で抽出した眼鏡フレーム領域を追跡・処理している．正規化による問題と同様に，手動による抽出は処理コストが高くなる上，動き推定精度に依存する．このため，実画像に対する実システムの構築には，正規化を要せず処理を自動的に行える方法が不可欠である．

第 I 部で述べた appearance ベースによる方法は，顔画像の輝度情報を扱い，眼鏡顔画像から「眼鏡をかけていない顔」の特徴だけを抽出する方法であった．画像内の不要領域を取り除き，対象物体を抽出するには，このように遮蔽された対象物体を抽出する方法だけでなく，対象物体の前面に位置する遮蔽物体を抽出して除去する方法も有効である．これは「model ベースによる方法」と呼ばれ，抽出する物体のモデルを構築し，画像内でその

モデルにマッチする領域を抽出する．そのためには，抽出する遮蔽物体の性質を把握しなければならない．

眼鏡フレームの特徴として，

1. 眼鏡フレームの色は，例えば，黒縁のものから銀縁のものまで幅広い．
2. 顔にかけて使用するという目的のため，眼鏡フレームの形状は類似している．

ということが挙げられる．したがって，眼鏡フレームの色（輝度値）を画一的に扱うことは困難であるが，形状の特徴はモデル化できると考えられる．眼鏡フレームの形状のモデルを構築し，画像内でそのモデルにマッチする領域を探索・抽出すればよい．

この場合，眼鏡顔画像内の眼鏡フレームの形状情報をどれだけ良好に抽出できるかが重要である．眼鏡顔画像の輝度パターンを考えてみると，

- 眼鏡フレームの輝度値は，顔の肌領域の輝度値と異なる
- 顔の肌領域の輝度値は，位置に対して滑らかに変化する

という特徴がある．したがって，眼鏡顔画像について輝度値の微分画像を求めると，眼鏡フレーム形状に沿って画像輪郭が現れるはずである．一方，肌領域においても若干輝度変化があるため，肌領域にも画像輪郭が現れるであろう．しかしながら，その微分値は眼鏡フレーム形状の輪郭部における微分値に比べて小さいと予想される．そこで，微分値の小さい画像輪郭はノイズと見なして除外する．

以上より，眼鏡顔画像の画像輪郭を求めることで眼鏡フレームの形状情報が得られると期待できる．また，画像輪郭の抽出は，眼鏡フレームの輝度値が肌領域の輝度値と比較して高い場合も低い場合も対応できる．

眼鏡顔画像内の眼鏡フレーム領域を抽出することができたならば，その領域内の輝度値を別の輝度値に置換すれば良い！「眼鏡を掛けている」ということが判るのは，眼鏡フレーム領域の輝度値が肌領域の輝度値と異なるからである．もしも，光学的に完全に透明な眼鏡フレームが存在するならば，眼鏡を掛けているか否かを判別することは困難である．または，眼鏡フレーム領域の輝度値が肌領域の輝度値と同様であれば，両者の区別はつかない．したがって，眼鏡フレーム領域を除去するには，抽出した眼鏡フレーム領域内の輝度値を肌領域の輝度値に置換すればよいと考えられる．図 4.1 に眼鏡フレーム領域の抽出・除去方法の概要を示す．

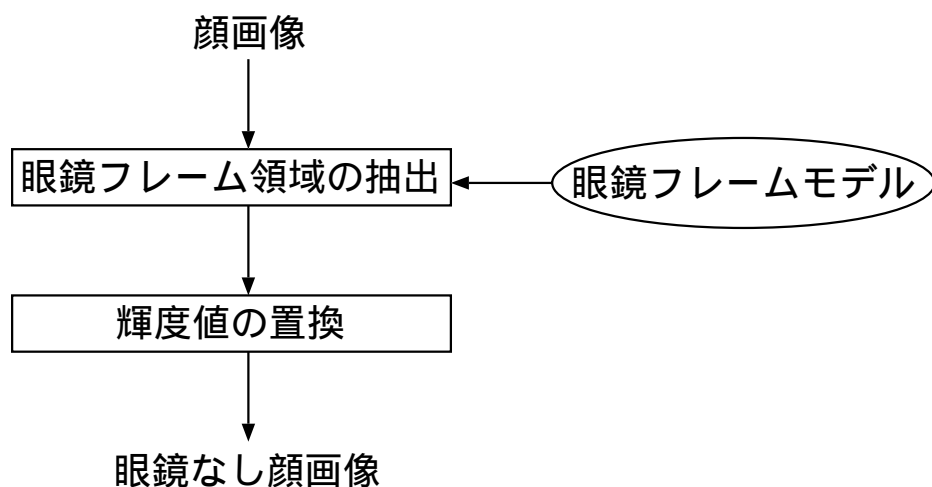


図 4.1: 眼鏡フレーム領域の抽出・除去方法の概要

本研究では，パラメータの値を変えることによりさまざまな形状を生成できるような，パラメトリック眼鏡フレームモデルを新たに構築し，本モデルを用いて正規化をすることなく眼鏡顔画像から眼鏡なし顔画像を推定する方法を提案する．本手法により実用を満たす推定精度が得られれば，正規化を要しない自動的な処理が可能となり，実システムへ大いに役するものと考えられる．

4.2 パラメトリック眼鏡フレームモデル

眼鏡顔画像内の眼鏡フレーム形状を抽出するために，眼鏡フレーム形状をモデル化する．

眼鏡フレームのデザインでは，機能面に加えてファッション性も考慮されているため，その形状は多様である [88, 89, 90]．また，眼鏡フレームは人工物であるので，奇抜で複雑なデザインのものも存在する．しかし，これら全てを網羅するモデルを作成するのは困難であり，实际的ではない．そこで，一般的な形状を持つ眼鏡フレームのモデル化を行う．

パラメータの値を変えることによりさまざまな形状を生成できるように，眼鏡フレームの各部の形状を関数で与えた眼鏡フレームモデルを設計する．なお，眼鏡は対称構造を持つため，片側だけを表す眼鏡フレームモデルを作成し（図 4.2），その鏡像と組み合わせることで眼鏡全体を表す [91]．

以下，各部品毎に説明する．

ブリッジ

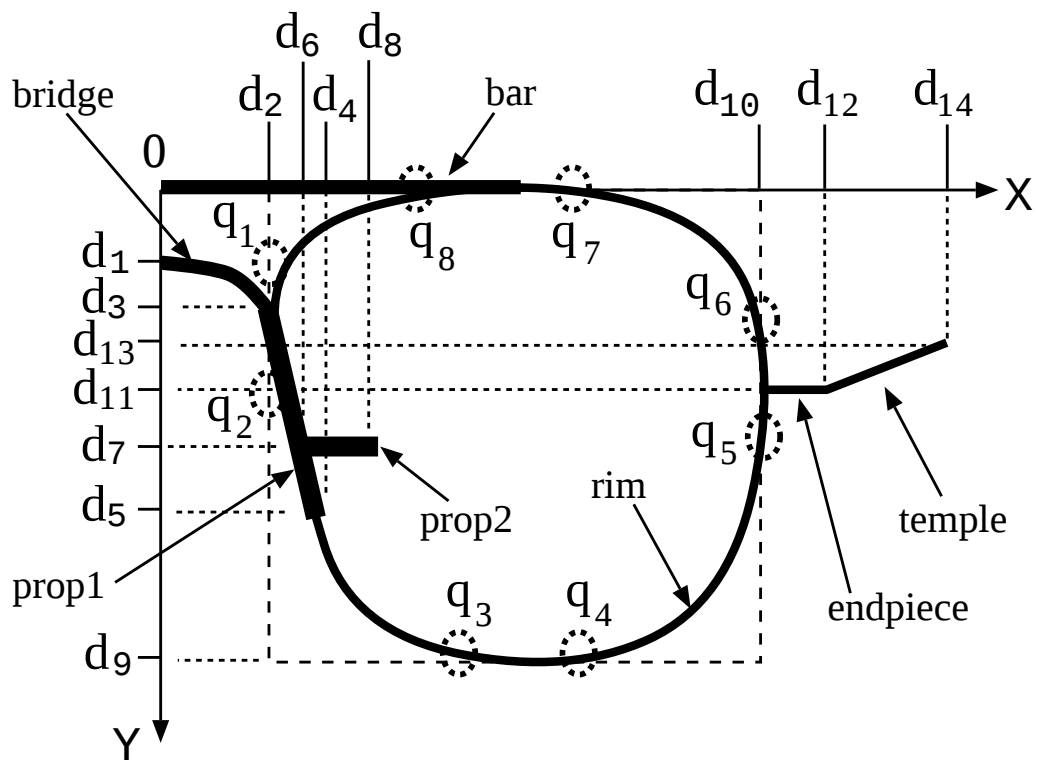


図 4.2: パラメトリック眼鏡フレームモデル

萩原ら [57] は、眼鏡を購入する際の支援として、眼鏡フレームをベジェ曲線（曲面）によりモデル化し、モデルにパラメータを与えて眼鏡フレームを生成して顔画像に合成する方法を提案している。このモデルでは、ブリッジは直線で表現しているが、柔軟性を持たせるために、本モデルでは d_1, d_2, d_3 をパラメータとして 2 次関数により表す。

$$y = \frac{d_3 - d_1}{d_2^2} x^2 + d_1 \quad (0 \leq x \leq d_2) \quad (4.1)$$

プロップ

プロップ 1 は直線分で表し、その上端の座標 (d_2, d_3) と下端の座標 (d_4, d_5) をパラメータとする。

$$y = \frac{d_5 - d_3}{d_4 - d_2} (x - d_2) + d_3 \quad (4.2)$$

プロップ 2 は直線分で表し、その左端の座標 (d_6, d_7) と右端の座標 (d_8, d_7) をパラメータとする。

$$y = d_7 \quad (d_6 \leq x \leq d_8) \quad (4.3)$$

リム

萩原ら [57] は、ベジェ曲線（曲面）を用いてリムを表現しているが、ベジェ曲線は制御点の 1 つの位置を変更すると、その影響が全体に波及し、データ点から曲線を作成する際に必要な柔軟性に欠ける。そこで、リムを 3 次の Riesenfeld 閉スプライン $x(t), y(t)$ で表す。次数を高くしすぎると、張力を強くしたような曲線になり、制御点から離れた位置に生成されるので、3 次を採用する [92]。

リムは、 x 軸と直線 $x = d_2, y = d_9, x = d_{10}$ によって作られる矩形上の 8 つのノード $q_1, q_2, \dots, q_8$ の座標 (x_i, y_i) をパラメータとし、式 (4.4)(4.5) により示される 3 次の Riesenfeld 閉スプライン $x(t), y(t)$ で表す [92]。

$$x(t) = \sum_{i=1}^8 x_i B_{i-2,4}^c(t) \quad (4.4)$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^8 y_i B_{i-2,4}^c(t) \quad (4.5)$$

ここで $B_{i-2,4}^c(t)$ は3次の周期スプラインを示し，式(4.6)(4.7)の漸化式で表されるノード q_i に関する $(K-1)$ 次のB-スプライン

$$B_{i,K}(t) = \frac{t - q_i}{q_{i+K-1} - q_i} B_{i,K-1}(t) + \frac{q_{i+K} - t}{q_{i+K} - q_{i+1}} B_{i+1,K-1}(t) \quad (4.6)$$

$$B_{i,1}(t) = \begin{cases} 1 & (q_i \leq t < q_{i+1}) \\ 0 & (t < q_i, y \geq q_{i+1}) \end{cases} \quad (4.7)$$

を用いて

$$B_{i-2,4}^c(t) = \begin{cases} B_{i-2,4}(t) + B_{i+5,4}(t) & (i = 1, 2) \\ B_{i-2,4}(t) & (i = 3, 4, 5, 6) \\ B_{i-2,4}(t) + B_{i-9,4}(t) & (i = 7) \end{cases} \quad (4.8)$$

と示される．

なお，ブリッジとリムが途切れないようにするために， q_1 と q_2 をブリッジの端を挟むように配置する．ここで y_1 と y_1 は各々ノード q_1 と q_2 の y 座標を示す．

$$y_1 < d_3 < y_2 \quad (4.9)$$

エンドピース

エンドピースは直線分で表し，その左端の座標 (d_{10}, d_{12}) と右端の座標 (d_{11}, d_{12}) をパラメータとする．

$$y = d_{11} \quad (d_{10} \leq x \leq d_{12}) \quad (4.10)$$

リムとエンドピースが途切れないようにするために，リムのノード q_5 と q_6 の間にエンドピースを配置する．ここで y_5 と y_6 は各々ノード q_5 と q_6 の y 座標を示す．

$$y_6 < d_{12} < y_5 \quad (4.11)$$

また，エンドピースがブリッジに近づきすぎないように，式(4.12)を満たすように d_{10} を設定する．

$$d_{10} > d_4 + 2d_2 \quad (4.12)$$

テンブル

テンプルは直線分で表し，両端の座標 (d_{11}, d_{12}) , (d_{13}, d_{14}) をパラメータとする．

$$y = \frac{d_{13} - d_{11}}{d_{14} - d_{12}}(x - d_{12}) + d_{11} \quad (d_{12} \leq x \leq d_{14}) \quad (4.13)$$

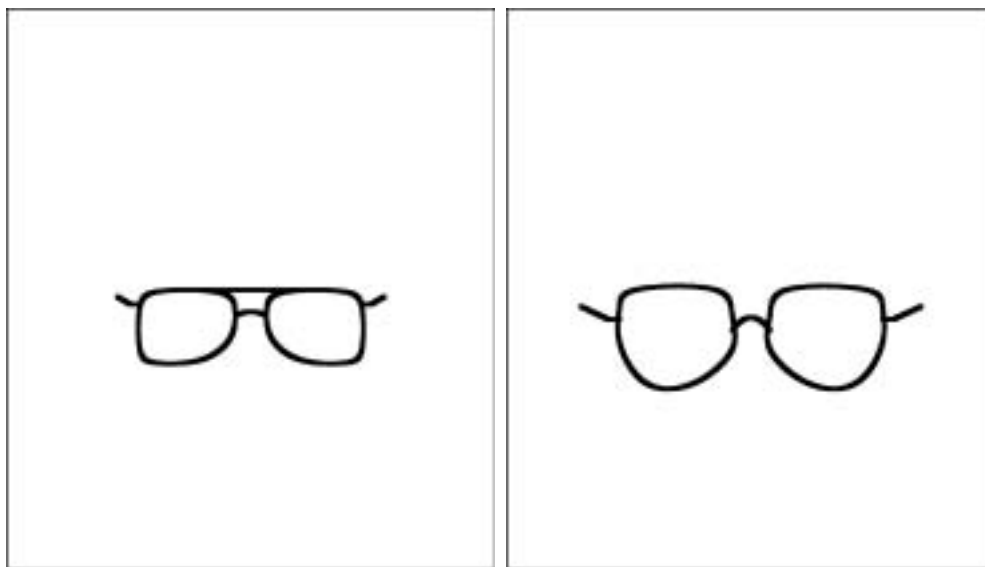
バー

バーを持たせる場合は，リム上で最小の y 座標となる点 $x_{y_{min}}$ から y 軸までを結ぶ x 軸に平行な直線分で表す．

$$y = 0 \quad (0 \leq x \leq x_{y_{min}}) \quad (4.14)$$

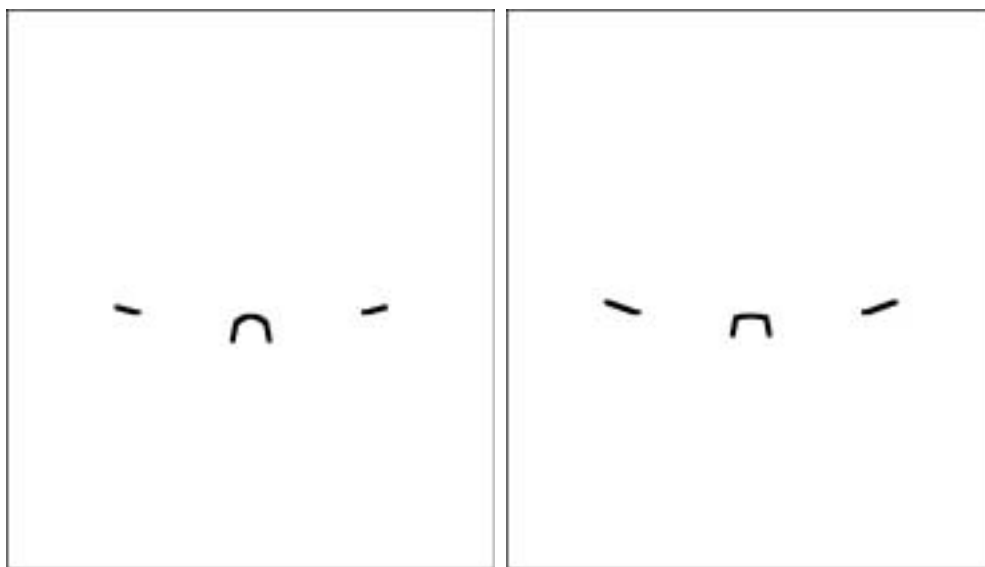
眼鏡フレーム画像の作成

各関数のパラメータの値を与え，ブリッジ，プロップ1，プロップ2，リム，エンドピース，テンプルを各々生成し，それらを組み合わせて眼鏡の片側を生成し，さらに， y 軸について鏡像をとったものと組み合わせることで眼鏡フレームを作成できる（図4.3）．本研究では，この眼鏡フレームモデルを眼鏡フレーム領域の抽出に用いる．



(a) リム , バー有り

(b) リム有り



(c) リム無し (1)

(d) リム無し (2)

図 4.3: パラメトリック眼鏡フレームモデルに基づいて作成した眼鏡フレームの例

4.3 眼鏡フレーム領域の抽出

眼鏡フレームモデルを用いて図 4.4 に示す 4 つの手順に従い，眼鏡フレームの各部を抽出する．

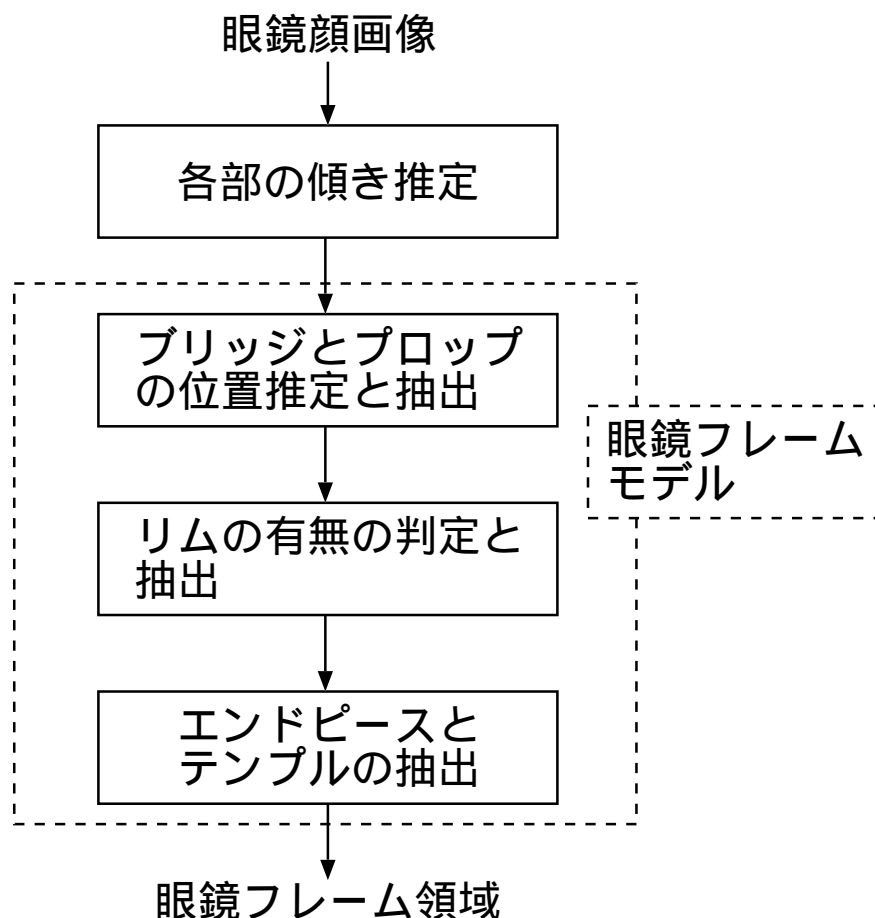


図 4.4: 眼鏡フレーム抽出の流れ

4.3.1 眼鏡フレームの傾き推定

以下の処理により眼鏡顔画像の画像輪郭を求め，眼鏡フレーム構造を大局的にとらえるために低解像度輪郭画像を作成し，低解像度輪郭画像内の各物体の慣性主軸の傾きを求める．

(1) 原画像（図 4.5）に対して次式により示される Roberts オペレータを用いて原画像から画像輪郭 $grad(x, y)$ を求め，閾値処理により輪郭画像を生成する．ここで， $I(x, y)$ は，座

標 (x, y) における輝度値を示す .

$$grad(x, y) = \sqrt{I_x^2(x, y) + I_y^2(x, y)} \quad (4.15)$$

$$I_x(x, y) = I(x, y) - I(x + 1, y + 1) \quad (4.16)$$

$$I_y(x, y) = I(x + 1, y) - I(x, y + 1) \quad (4.17)$$

輪郭画像を図 4.6 に示す .



図 4.5: 眼鏡顔画像

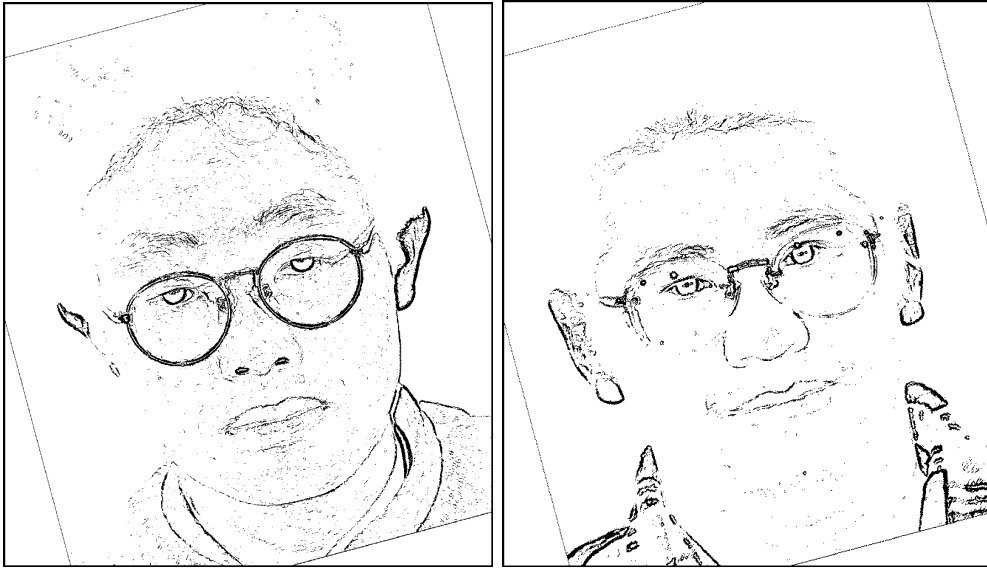


図 4.6: 輪郭画像

(2) 輪郭画像に対し，式 (4.18) と閾値処理により低解像度輪郭画像 (図 4.7) を作成する．

$$I'(x, y) = \frac{1}{2\pi} \sum_{\eta=-3}^3 \sum_{\xi=-3}^3 e^{-\frac{\eta^2 + \xi^2}{2}} I(x - \eta, y - \xi) \quad (4.18)$$

(3) 低解像度輪郭画像内の輪郭線毎に異なったラベル $label_i$ をつける．

(4) 各 $label_i$ 毎に慣性主軸の傾き θ_i を式 (4.19) により求める．ここで (x_i, y_i) は $label_i$ の座標とする．

$$\theta_i = \begin{cases} \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2 \sum_{L_i} x_i y_i}{\sum_{L_i} x_i^2 - \sum_{L_i} y_i^2} \right) & (\sum_{L_i} x_i^2 \neq \sum_{L_i} y_i^2) \\ 0 & (\sum_{L_i} x_i^2 = \sum_{L_i} y_i^2) \end{cases} \quad (4.19)$$



図 4.7: 低解像度輪郭画像

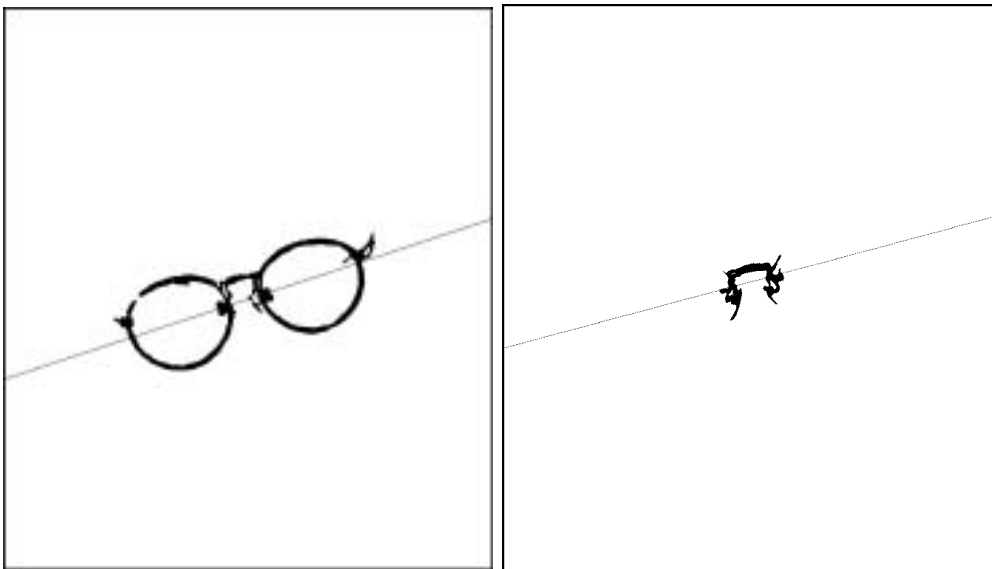


図 4.8: 推定した傾きの例

4.3.2 ブリッジおよびプロップの抽出

ブリッジとプロップには、

- 眼鏡に必ず存在する。
- その周囲の鼻領域は輝度変化が滑らかなため、輪郭検出が行いやすい。

という特徴がある。そこで、眼鏡フレーム領域の抽出において、まず、眼鏡の中央部分の位置を推定する。ここでは、ノイズの影響を抑えるため、低解像度輪郭画像を用いる。

ブリッジおよびプロップの位置推定

(1) 低解像度輪郭画像において各輪郭線 $label_i$ について前節で求めた慣性主軸の傾き θ_i に平行な仮想線を引き、その直線と $label_i$ で囲まれる領域 T_i の円形度 C を式 (4.20) により求める (A : 面積, γ : 周囲長)。

$$C = \frac{4\pi A}{\gamma^2} \quad (4.20)$$

C が閾値の範囲内ならば T_i を眼鏡の中央部領域の候補として抽出する (図 4.9)。

(2) 全ての候補領域 T_i のうち、その形状が対称となっているものを眼鏡の中央部の下方領域 T_e と推定し (図 4.10)、 T_e を囲む輪郭線を $label_e$ とする。

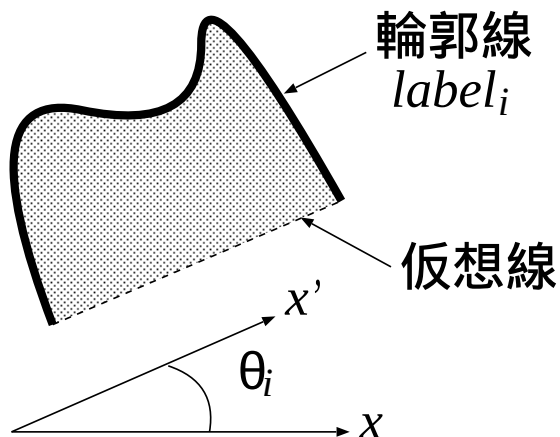


図 4.9: 眼鏡中央部の領域候補 T_i

ブリッジおよびプロップの抽出処理

(1) 眼鏡フレームモデルのパラメータ $d_1, d_2, \dots, d_8$ に初期値を与え、ブリッジとプロップを生成する。



図 4.10: 推定した領域 T_e

(2) 生成したブリッジとプロップの画像 $BP(x, y)$ と輪郭線 $label_e$ の画像 $LABEL_e(x, y)$ とのマッチング度 φ_{bp} を式 (4.21)(4.22) により求める .

$$\varphi_{bp} = \frac{1}{H_{bp} + H_e} \sum cor_{bp}(x, y) \quad (4.21)$$

$$cor_{bp}(x, y) = \begin{cases} 1 & (BP(x, y) \cap LABEL_e(x, y) = 1) \\ 0 & (BP(x, y) \cap LABEL_e(x, y) = 0) \end{cases} \quad (4.22)$$

ここで, H_{bp} は生成したブリッジおよびプロップの合計画素数, H_e は輪郭線 $label_e$ の画素数を示す .

(3) パラメータ $d_1, d_2, \dots, d_8$ の値を変更して処理 (2) を繰り返す . ここで, パラメータ $d_1, d_2, \dots, d_8$ の値は, 領域 T_e の縦の長さ ver と横の長さ hol から大きく逸脱することがないように ,

$$|d_i - x_e| \leq hol \quad (i = 1, 3, 5, 7) \quad (4.23)$$

$$|d_i - y_e| \leq ver \quad (i = 2, 4, 6, 8) \quad (4.24)$$

の範囲とする (図 4.11) . また, x_e と y_e は, 領域 T_e の最大および最小の x 座標を x_{emax} , x_{emin} , 最大および最小の y 座標を y_{emax} , y_{emin} とすると

$$x_e = \frac{1}{2} (x_{emax} + x_{emin}) \quad (4.25)$$

$$y_e = \frac{1}{2} (y_{e_{max}} + y_{e_{min}}) \quad (4.26)$$

で求められる．

(4) マッチング度 φ_{bp} が最大となるパラメータ $d_1, d_2, \dots, d_8$ が生成するブリッジとプロップ領域を眼鏡の中央部とする．

ここで，眼鏡フレームの太さについては，太い眼鏡フレームにも対応できるように，最低1，最高でブリッジ幅 d_2 までの範囲を採りうるものとする．ブリッジ，プロップの抽出結果を図 4.12 に示す．

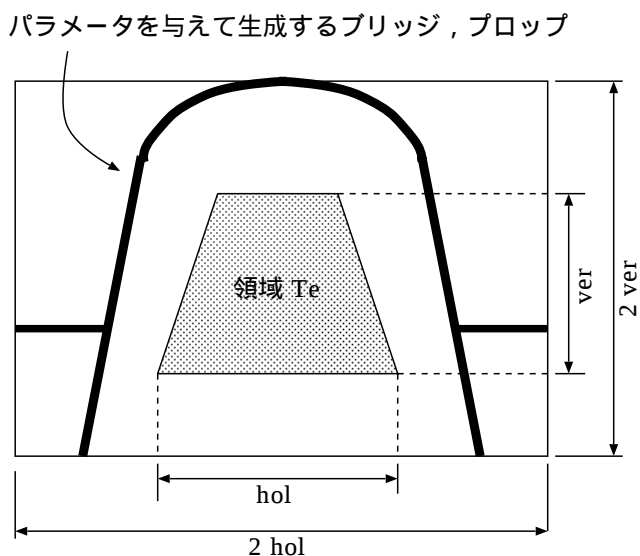


図 4.11: ブリッジ・プロップのパラメータの値の範囲

4.3.3 リムの抽出

リムの有無の判定

眼鏡の中央部の抽出を行った後に，眼鏡にリムがあるかどうかを判定する．これは，リムなし眼鏡の場合は，リムを抽出する必要がないためである．

眉領域をリムの上部と誤判定する場合があるため，リムの上部を判定に用いることは適切ではない．一方，リムの下部は，頬の輝度変化は滑らかであるので，輪郭検出しやすい．そこで，リムの有無の判定は，リムの下部の有無で行う．



図 4.12: 抽出したブリッジ，プロップ

- (1) 低解像度輪郭画像において，輪郭線 $label_e$ の左右の y 座標が最大となる点を求め，各々の x 座標を rim_{lx} , rim_{rx} とする．
- (2) ブリッジの左右の端点の x 座標を各々 d_{2l} , d_{2r} とし，

$$d_{2l} - rim_{lx} > hol \quad (4.27)$$

$$rim_{rx} - d_{2r} > hol \quad (4.28)$$

ならば，その部分はリムの下部と推定し，リムがあると判定する．ここで， hol は領域 T_e の横幅を表す．

リム抽出処理

眼鏡にリムがあると判定した場合は，リムの抽出を行う．

- (1) ノード $q_1, q_2, \dots, q_8$ の座標の初期値を設定する．
- (2) 生成したリムの画素数を H_{rim} とし，生成したリムの画像 $RIM(x, y)$ と輪郭画像内の輪郭線 $label_i$ の画像 $LABEL_i(x, y)$ とのマッチング度 φ_{rim} を式 (4.29)(4.30) により求める．

$$\varphi_{rim} = \frac{1}{H_{rim} + H_i} \sum cor_{rim}(x, y) \quad (4.29)$$

$$cor_{rim}(x, y) = \begin{cases} 1 & (RIM(x, y) \cap LABEL_i(x, y) = 1) \\ 0 & (RIM(x, y) \cap LABEL_i(x, y) = 0) \end{cases} \quad (4.30)$$

ここで， H_i は輪郭線 $label_i$ の画素数を示す．

(3) ノード $q_1, q_2, \dots, q_8$ の座標を変更して処理 (2) を繰り返す．ここで，パラメータの値のとりうる範囲は，輪郭低解像度画像で推定したリム領域内とする．ここで，眼鏡フレームの太さについては，ブリッジ・プロップの抽出と同様に，太い眼鏡フレームにも対応できるように，最低 1，最高でブリッジ幅 d_2 までの範囲を採りうるものとする．

(4) 処理 (2) で求めたマッチング度のうち，最大となる領域をリムと推定して抽出する（図 4.13）．



図 4.13: 抽出したリム

4.3.4 エンドピースおよびテンプルの抽出

エンドピースとテンプルは接続しているので，これらを同時に抽出する．

(1) パラメータ $d_{10}, d_{11}, \dots, d_{14}$ の値を眼鏡フレームモデルに与え，エンドピースとテンプルを生成する．

(2) 生成したエンドピースおよびテンプルの合計画素数を H_{et} とし，生成したエンドピースおよびテンプルの画像 $ET(x, y)$ と，輪郭画像内の輪郭線 $label_i$ の画像 $LABEL_i(x, y)$ とのマッチング度 φ_{et} を式 (4.31)(4.32) により求める．

$$\varphi_{et} = \frac{1}{H_{et} + H_i} \sum cor_{et}(x, y) \quad (4.31)$$

$$cor_{et}(x, y) = \begin{cases} 1 & (ET(x, y) \cap LABEL_i(x, y) = 1) \\ 0 & (ET(x, y) \cap LABEL_i(x, y) = 0) \end{cases} \quad (4.32)$$

ここで， H_i は輪郭線 $label_i$ の画素数を示す．

(3) パラメータ d_{10} , d_{11} , ... , d_{14} の値を変更して処理 (2) を繰り返す．左右のエンドピースとテンプルは，ブリッジからある程度離れた位置にあるので，横方向の探索範囲 x_l (左方向) , x_r (右方向) を

$$x_l < d_{4l} - 2(d_{2r} - d_{2l}) \quad (4.33)$$

$$x_r > d_{4r} + 2(d_{2r} - x_{2l}) \quad (4.34)$$

とする．すなわち，左右のプロップ 1 からブリッジ幅の 2 倍以上離れた範囲とする．ここで， d_{4l} , d_{4r} は左右のプロップ 1 の下端の x 座標である．

また，縦方向の探索範囲 y は，

$$d_1 - (d_5 - d_1) < y < d_5 + (d_5 - d_1) \quad (4.35)$$

とする．すなわち，中央部の上端および下端からブリッジ高だけ離れた範囲とする．ここで， d_1 は生成したブリッジの頂点の y 座標， d_5 は生成したプロップ 1 の下端の y 座標である．

(4) マッチング度 φ_{et} が閾値以上となる領域を抽出する．

エンドピースとテンプルの抽出結果を図 4.14 に示す．耳の部分が誤って抽出されている．耳には表情が現れないことから，表情解析の場面では影響しないと考えられるが，今後，眼鏡なし顔画像をより精度よく推定するために抽出改善の検討を行う予定である．

4.4 眼鏡フレーム領域内画素の輝度値の置換

眼鏡フレーム領域内の輝度パターンを肌の輝度パターンに置換することにより眼鏡フレーム領域を除去でき，眼鏡なし顔画像が推定できる．まず，線形補間を行い，ベースとなる輝度値を求める．そして偏差を加算してゆらぎをもたせ，平滑化を行い輝度変化を滑らかにする．

4.4.1 線形補間

眼鏡フレーム領域の画素について，周囲の肌領域画素の輝度値を用いて線形補間する．



図 4.14: 抽出したエンドピース，テンプル

- (1) 左上から順に探索し，眼鏡フレーム領域内の1つの画素 G_{cr} を抽出する． G_{cr} の座標を (x_{cr}, y_{cr}) とする． G_{cr} から下方方向で最も距離の近い肌領域画素 G_{un} を抽出し，その座標を (x_{un}, y_{un}) とする．同様に，右，左下，右下方向について肌領域画素 G_{rt} ， G_{ul} ， G_{ur} を抽出し，各々の座標を (x_{rt}, y_{rt}) ， (x_{ul}, y_{ul}) ， (x_{ur}, y_{ur}) とする．
- (2) G_{cr} から G_{un} ， G_{rt} ， G_{ul} ， G_{ur} のユークリッド距離 D_{un} ， D_{rt} ， D_{ul} ， D_{ur} のうちで最小となる画素を G_1 (輝度値 I_1) とする．

$$D_{un} = \sqrt{(x_{un} - x_{cr})^2 + (y_{un} - y_{cr})^2} \quad (4.36)$$

$$D_{rt} = \sqrt{(x_{rt} - x_{cr})^2 + (y_{rt} - y_{cr})^2} \quad (4.37)$$

$$D_{ul} = \sqrt{(x_{ul} - x_{cr})^2 + (y_{ul} - y_{cr})^2} \quad (4.38)$$

$$D_{ur} = \sqrt{(x_{ur} - x_{cr})^2 + (y_{ur} - y_{cr})^2} \quad (4.39)$$

- (3) G_{cr} から G_1 への方向と反対方向の肌領域画素を G_2 (輝度値 I_2) とする． G_2 の座標 (x_{G_2}, y_{G_2}) を表 4.1 に示す．
- (4) G_{cr} から G_1 までの全ての眼鏡フレーム領域画素について，次式により輝度値 $I(x, y)$ を求めて置換する．ここで， D_{G_1} と D_{G_2} は各々，置換する注目画素 (座標 (x, y)) から肌領域画素 G_1 (座標 (x_{G_1}, y_{G_1})) および G_2 (座標 (x_{G_2}, y_{G_2})) までのユークリッド距離を示す．

$$I(x, y) = \frac{D_{G_2}}{D_{G_1} + D_{G_2}} I_1 + \frac{D_{G_1}}{D_{G_1} + D_{G_2}} I_2 \quad (4.40)$$

表 4.1: G_2 の座標 (x_{G_2}, y_{G_2})

条件	x_{G_2}	y_{G_2}
$G_1 = G_{un}$ のとき	x_{cr}	$y_{cr} - 1$
$G_1 = G_{rt}$ のとき	$x_{cr} - 1$	y_{cr}
$G_1 = G_{ul}$ のとき	$x_{cr} + 1$	$y_{cr} - 1$
$G_1 = G_{ur}$ のとき	$x_{cr} - 1$	$y_{cr} - 1$

$$D_{G_1} = \sqrt{(x_{G_1} - x)^2 + (y_{G_1} - y)^2} \quad (4.41)$$

$$D_{G_2} = \sqrt{(x_{G_2} - x)^2 + (y_{G_2} - y)^2} \quad (4.42)$$

なお，線形補間によって輝度値を置換した眼鏡フレーム領域画素は，以後の反復処理において肌領域画素として扱う．

(5) 画像の左上から順に，眼鏡フレーム領域内の全ての画素を注目画素とし，処理 (1) から繰り返す．

また，閾値以上の輝度値をもつ領域を抽出し，その円形度が閾値以上ならば，レンズ上の反射領域と判定し，同様に輝度値の置換を行う．

4.4.2 偏差の加算

線形補間を行った結果は，筋状のパターンが残るため（図 4.18(1)(2)），まず肌の輝度パターンを解析し，その結果を元に補間値に加算処理を施す．

肌領域の輝度パターン

肌領域の輝度パターンを解析するために，まず，眼鏡なし顔画像から肌領域を手動で切り出す（図 4.15）．肌領域を拡大すると， 2×2 画素のブロック内では類似した輝度値が現れることが判る（図 4.16）．

眼鏡なし顔画像 15 枚から切り出した各肌画像について， 2×2 画素のブロック毎の輝度値の平均を求め，それらの分散を表 4.2 に示す．また，図 4.17 は，肌領域の輝度値のヒストグラムと正規分布を示したもの（横軸が輝度値，縦軸が画素数）である．輝度値の分布が正規分布に近いことが判る．



図 4.15: 切り出した肌領域（白枠）

154	152	151	151	152	153	153	152	167	167
152	149	148	147	147	146	146	149	165	166
159	157	156	154	148	153	154	156	165	169
159	158	167	165	153	165	165	158	165	167
169	175	173	171	174	173	175	176	169	168
176	180	177	174	171	176	177	175	169	169
183	183	181	179	178	179	178	179	174	173
182	184	184	183	178	183	182	181	175	169
173	174	175	175	169	169	178	179	175	174
173	173	175	175	169	167	178	178	175	174

図 4.16: 肌領域（例）の拡大図（1マスが1画素の輝度値を表す）

表 4.2: 各肌領域の 2×2 画素毎の輝度値の平均の分散

	頬	目蓋	目頭	目尻	眉間
人物 1	32.364	<u>58.556</u>	50.391	54.083	73.516
人物 2	43.486	32.302	25.277	46.043	15.063
人物 3	<u>61.985</u>	51.101	61.192	46.276	28.260
人物 4	52.861	34.556	<u>71.087</u>	43.144	85.987
人物 5	44.462	41.786	48.646	42.558	52.713
人物 6	48.211	56.305	54.583	44.080	37.875
人物 7	47.473	50.131	36.715	46.322	30.718
人物 8	48.952	36.160	52.923	43.390	29.993
人物 9	40.643	44.670	62.771	<u>57.776</u>	36.331
人物 10	57.888	34.418	32.724	39.770	<u>91.705</u>
人物 11	54.342	35.663	40.676	40.381	21.956
人物 12	49.552	54.284	61.034	49.984	22.820
人物 13	58.539	57.599	28.228	45.178	54.447
人物 14	47.195	46.118	64.665	50.270	77.797
人物 15	59.074	58.395	59.584	41.909	50.176

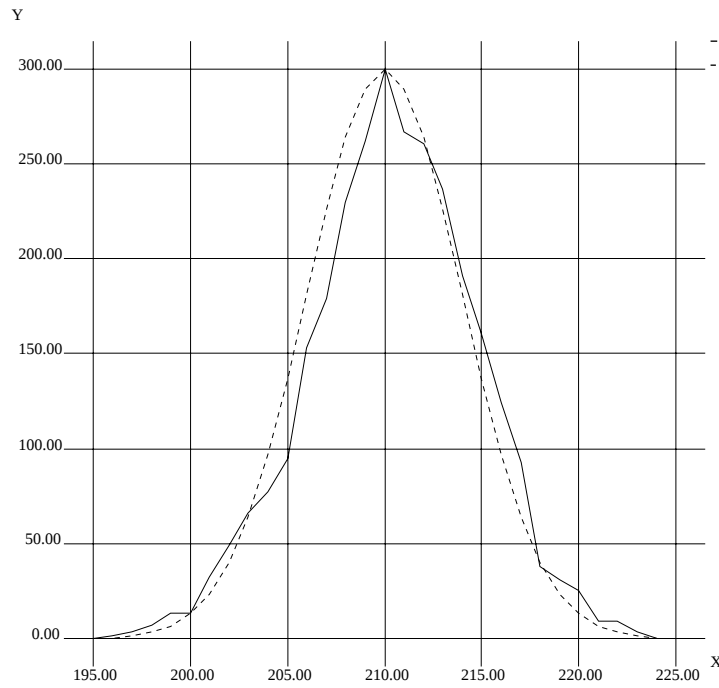


図 4.17: 切り出した肌領域（例）の輝度値のヒストグラム（実線）と正規分布（破線）

加算処理

置換した結果に対して偏差 σ を加算する．

$$I''(x, y) = I(x, y) + \sigma \cdot rand \quad (4.43)$$

ここで， $I''(x, y)$ は座標 (x, y) における画素の元の輝度値 $I(x, y)$ に対する新しい輝度値で， $rand$ は標準正規分布 $N(0, 1)$ にしたがう乱数である（ 2×2 画素ごとに变化させる）． σ は，ブリッジ，プロップ，リム，エンドピースとテンプルの各部を補間する場合ごとに，前節の解析結果の中で最も大きな値（表 4.2 の下線部）を採るものとする．

4.4.3 平滑化

偏差を加算した結果（図 4.18(3)(4)）の輝度値の変化を滑らかにするために， 3×3 画素の移動平均法 [93] により，平滑化を行う（図 4.19(5)(6)）．また，図 4.19(7)(8) に，比較として眼鏡なし原画像の例を示す．

4.5 実験結果および考察

実験に使用した顔画像は無表情顔の正面顔画像 15 枚である．背景は一様で，照明は眼鏡レンズの反射が生じない様設定し，35mm 一眼レフカメラを用いて撮影してフィルムスキャナによりデジタル画像化した．

図 4.20 に示すように，眼鏡顔画像内の眼鏡フレーム領域の各部分（ブリッジ，パッド，リム，エンドピース，テンプル）が抽出できている．輝度値を置換することにより眼鏡フレーム領域を除去した顔画像は，鼻筋の部分やレンズの影響が残る部分において，眼鏡なし顔画像に対して若干の非忠実性があるものの，良好に眼鏡フレーム領域を除去できている．なお，図 4.20 の顔の傾きは各々， y 軸に対して 15 度である．本手法は，眼鏡の中央部分の位置推定を行う際に下向きのコの字型を探索しているため，顔の傾きが画像の y 軸に対して左右 90 度未満の範囲ならば眼鏡の位置を推定できる．通常，90 度を越えて大きく顔を傾けることはほとんど無いと考えられるので，範囲を限定しても支障は無いであろう．

眼鏡フレーム領域除去結果は，主観的に眼鏡なし顔画像に対して若干の非忠実性が残っている．appearance ベースでの検討と同様に，本研究では眼鏡顔画像から顔そのものの個人性を失うことなく眼鏡なし顔画像を推定することを目的・目標にしているので，本方法によって得られた推定画像について

- 眼鏡の影響が除去されているか
- 対象人物の個人性が保存されている

を定量的に評価する．評価方法は，appearance ベースでの結果と比較できること，および appearance ベースで議論した評価に対する考え方に基づいて類似度を用いた評価を行う．ある画像 f_i と画像 g_i との類似度 S_i は式 (4.44) により求められる [70] ．

$$S_i = \frac{|f_i^t \cdot g_i|}{\|f_i\| \|g_i\|} \quad (0 \leq S_i \leq 1) \quad (4.44)$$

類似度 S_i は 1 に近いほど互いに類似していることを示す．



(1) 線形補間の結果



(2) 白枠内の拡大図



(3) (1) に偏差を加えた結果



(4) 白枠内の拡大図

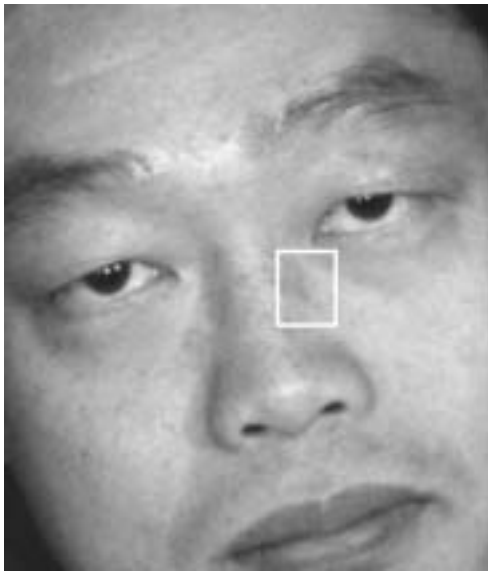
図 4.18: 輝度値の置換結果



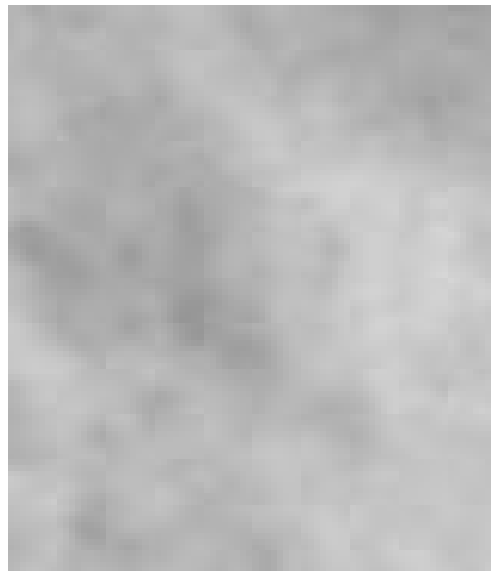
(5) (3) を平滑化した結果



(6) 白枠内の拡大図



(7) 眼鏡なし顔画像



(8) 白枠内の拡大図

図 4.19: 輝度値の置換結果 (続き)



眼鏡フレーム領域除去結果



眼鏡なし原画像

図 4.20: 眼鏡なし顔画像推定実験結果

図 4.20 の眼鏡フレーム除去結果と眼鏡なし顔画像との類似度および人物 1 と 2 を含む 15 人分の平均類似度を表 4.3 に示す。0.800 を大きく上回り、精度良く推定できていることが判る。

表 4.3: 眼鏡なし顔画像と推定結果の類似度

人物 1	0.905
人物 2	0.840
平均類似度 (15 人分)	0.871

今回用いた眼鏡顔画像では、画像内の眼鏡フレーム領域を良好に抽出することができたが、本手法は画像輪郭を抽出してマッチングを行っているため、画像輪郭に途切れがある場合には抽出を誤る恐れがある。この問題に対応するためには、画像内に分布している物体や画像輪郭をひとまとまりとして扱えることが必要である。眼鏡フレームの形状は対称構造を持つという特徴があることを踏まえつつ、上記のような考えに基づいた方法を次章で述べる。

4.6 結言

本章では model ベースによる眼鏡フレーム領域の抽出・除去方法として、パラメトリック眼鏡フレームモデルを用いる方法を提案した。

第 I 部で述べた appearance ベースによる方法は、眼鏡顔画像内の眼鏡なし顔の特徴を抽出し、忠実性の高い推定画像が得られたが、画像の位置ずれに敏感なため、高精度に眼鏡なし顔画像を推定するには、顔画像の正規化が不可欠であった。顔画像の正規化が充分実行できる場合は appearance ベースによる方法は有効であるが、実際には顔画像の正規化を良好に行うのは難しい。このため、より汎用的な眼鏡なし顔画像の推定を行うためには、顔画像の正規化を要しない方法を構築する必要がある。

appearance ベースによる方法は、顔画像の輝度情報を扱い、眼鏡顔画像から「眼鏡をかけていない顔」の特徴だけを抽出する方法であるのに対して、画像内の不要領域を取り除き、対象物体を抽出するには、このように遮蔽された対象物体を抽出する方法だけでなく、対象物体の前面に位置する遮蔽物体を抽出して除去する方法も考えられる。これは「model

ベースによる方法」と呼ばれ、抽出する物体のモデルを構築し、画像内でこのモデルにマッチする領域を抽出する方法である。

本章では、眼鏡フレームの形状特徴はそれほど大きくはばらつかないことから十分にモデル化できると考え、上記の后者「model ベースによる方法」の考え方にに基づき、眼鏡フレームの各部品を関数で近似したパラメトリック眼鏡フレームモデルを構築した。分布範囲が広く安定した抽出が期待できない輝度情報は扱わず、画像輪郭により物体形状を求め、本モデルにマッチする領域を抽出し、肌の輝度値で置換することにより眼鏡なし画像を推定する方法を提案した。

以下に、本章で得られた成果をまとめる。

- 眼鏡フレームの各部品形状を関数近似し、パラメータ値によりさまざまな形状を生成できるパラメトリック眼鏡フレームモデルを構築した。
- 本モデルを用いて眼鏡顔画像の画像輪郭を手がかりとして眼鏡フレームの各部品を抽出し、本モデルの有効性を示した。
- 抽出した眼鏡フレーム領域内の画素の輝度値を、肌の輝度値を用いて置換することにより眼鏡なし顔画像を推定する方法を確立した。平均類似度は0.871 となり、良好な結果を得た。

appearance ベースの方法に比べると、本研究で目標としている眼鏡なし顔画像（原パターン）に対して高い類似度（推定精度）が得られた。これは、本章の方法は、正規化誤差の影響を全く受けないことによるものと考えている。ただし、原パターンとの類似度が高くとも、眼鏡フレーム領域内の補間結果には、主観的に眼鏡フレーム領域に違和感の残る部分があった。これは、類似度は高かったのだから、appearance ベースの方法において議論したように、認識や識別処理には支障はないと考えることができるが、表示などで主観的に観察する場合には問題となる場合もあろう。本研究では、先に議論した理由により、原パターンとの類似性という意味で忠実性を評価基準においており、本結果は心理的な忠実性や違和感のような領域まで評価を考えると、appearance ベースによる方法がより優れていると見ることできる。

本モデルを用いた方法により画像内の眼鏡フレーム領域を良好に抽出することができたが、本手法は画像輪郭を抽出してマッチングを行っているため、画像輪郭に途切れがある場合には抽出を誤る恐れがある。この問題を回避するために、画像内に分布している物体

や画像輪郭をひとまとまりとして扱えることが必要である．このような場合に対応できるような形状モデルについては次章で述べる．

第 5 章

対称構造物体に収束する複数の動的輪郭モデルを用いた眼鏡なし顔画像の推定

5.1 序言

前章では、「model ベースによる方法」の枠組として、眼鏡フレームの形状について、各部品毎に形状を関数近似によりモデル化し、眼鏡フレーム領域を精度良く抽出し、補間することにより良好な眼鏡なし顔画像が得られた。この方法は、画像輪郭を手がかりに探索を行うため、画像輪郭に途切れがある場合は誤抽出をする恐れがある。そこで、本章では、画像内に分布している画像輪郭をひとまとまりとして扱うよう、Kass らの提案した動的輪郭モデル (Snakes) を用いることにより眼鏡フレーム領域を抽出する [71]。また、その拘束条件として対称構造物体に収束するように設計する。

眼鏡フレームをはじめとする工業製品の多くは機能的な側面や、作成の容易さの側面から左右対称な形状となっていることが多い。また、動植物においても、顔や体全体、花卉などほぼ左右対称とみなせる部分がある。これら対称構造物体は、自動車や顔など、あるシーン内で抽出する対象物となることが多く、対称構造物体の自動抽出は、物体追跡や画像合成などへ応用できる [78]-[80]。

対称構造物体は、対称軸で折り返したときに軸の左右の領域が丁度重なる [81]。対称構造物体を抽出する最も簡単な方法として、画像内から物体を抽出し、それが対称構造物体であるかどうかを調べれば良い。しかし、この方法は対称軸の与え方に依存し、場合によっては対称軸を試行錯誤的に与えなければならないので、処理コストが莫大になる危険がある。一方、抽出した後に対称性を調べるのではなく、抽出方法そのものが対称性を考慮した

ものであれば、画像内から対称構造物体を抽出できる。ただし、画像輪郭を用いる場合には途切れが生じることがあるため、各々個別に抽出するだけでは不十分な場合がある。したがって、画像内に分布している画像輪郭をひとまとまりとして扱えることが必要である。

Kass らの提案した Snakes は画像輪郭が途切れている場合にも対応でき、連結した滑らかな曲線が反復計算により自動的に求まるなどの利点を持っている。本章では、対象物の外側に左右対称な初期輪郭をもたせ、その内部にある物体輪郭に対称構造を保持したまま収束するような Snakes を用いた眼鏡フレーム領域抽出を試み、本研究で目標としている眼鏡なし顔画像の推定を行う。

5.2 対称構造物体に収束する Snakes の設計

本節では、眼鏡フレームすなわち対称構造物体に収束する Snakes の形状とそのエネルギー関数および Snakes の各制御点の移動方法について述べる。

5.2.1 Snakes の初期輪郭

本研究では、対称構造を持つ物体を対象とするため、Snakes の形状は1つの閉曲線ではなく、複数の Snakes を用いる方が制御点を対応付ける上で都合が良い。また、機能拡張が容易な構造とするのが望ましい。

そこで、画像の上半分に眼鏡が存在しているという仮定をおき、Snakes の初期輪郭は図 5.1 に示すように扇形の2つの Snakes (Snakes1, Snakes2) とする。

画像内の顔領域が抽出できれば [94]-[98]、初期輪郭を眼鏡フレームの周辺に配置することができると考えられる。

5.2.2 Snakes のエネルギー関数

Snakes は、制御点の状態をエネルギーで表し、そのエネルギーを最小化するように初期輪郭から Snakes を構成している制御点を逐次移動させて物体輪郭に収束する [71]-[77]。

制御点のエネルギーは、定義によりさまざまであるが、内部エネルギーと外部エネルギーに大別できる。内部エネルギーは Snakes 自身の輪郭形状のエネルギーを表し、Snakes の輪郭形状の1次微分や2次微分などが用いられることが多い。また、外部エネルギーは輝

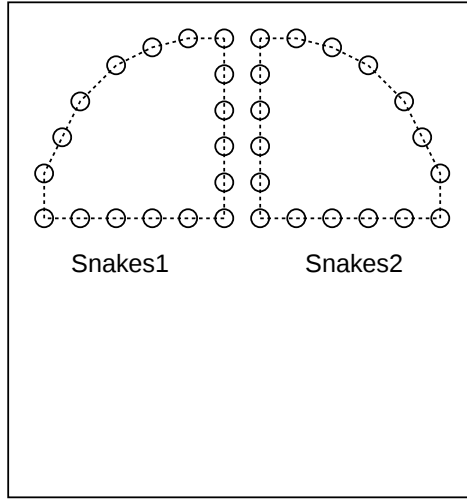


図 5.1: Snakes の初期輪郭

度勾配や圧力など Snakes が外部から得るエネルギーである．

以下，本研究で用いる Snakes のエネルギーについて述べる．なお，エネルギーの総和は制御点の現在の位置に停留した場合と近傍 8 方向に移動した場合の合計 9 つの状態について求める．すなわち，NUM 個の制御点から成る Snakes1 の n 番目の制御点 ($n=1, 2, \dots, \text{NUM}$) における 9 つの状態 ($i=1, 2, \dots, 9$) についてエネルギーを求める (図 5.2)．

1	2	3
4	5	6
7	8	9

図 5.2: 8 近傍画素に割り当てる状態番号 i (制御点の現在位置： $i = 5$)

Snakes の輪郭形状の 1 次微分

Snakes1 の n 番目の制御点における状態 i の輪郭形状の 1 次微分を内部エネルギー $E_{1ni_{d1}}$ として表す．

$$E_{1ni_{d1}} = \sqrt{(x_{1n} - x_{1n-1})^2 + (y_{1n} - y_{1n-1})^2} \quad (5.1)$$

ここで x_{1_n} と y_{1_n} は各々 Snakes1 の n 番目の制御点の x 座標と y 座標を表す .

Snakes の輪郭形状の 2 次微分

Snakes1 の n 番目の制御点における状態 i の輪郭形状の 2 次微分を内部エネルギー $E_{1ni_{d2}}$ として表す .

$$E_{1ni_{d2}} = \sqrt{(x_{1_{n+1}} - 2x_{1_n} + x_{1_{n-1}})^2 + (y_{1_{n+1}} - 2y_{1_n} + y_{1_{n-1}})^2} \quad (5.2)$$

画像エネルギー

Snakes1 の n 番目の制御点における状態 i の画像の輝度勾配を外部エネルギー $E_{1ni_{div}}$ として表す .

$$E_{1ni_{div}} = \sqrt{(I(x, y) - I(x - 1, y))^2 + (I(x, y) - I(x, y - 1))^2} \quad (5.3)$$

ここで $I(x, y)$ は画像内の位置 (x, y) における輝度とする .

圧力エネルギー

Snakes は物体の凹部には入り込んでいけないため , このままでは凹部を持つ物体の輪郭を正確に抽出することができない . そこで , 輪郭形状に応じて輪郭の外側から内側の方向に圧力を与える . Snakes1 の n 番目の制御点における状態 i の圧力エネルギーを $E_{1ni_{press}}$ として表す .

$$E_{1ni_{press}} = 1 \quad (5.4)$$

$$i = \begin{cases} 1 & (x_{n-1} - x_{n+1} > 0, y_{n-1} - y_{n+1} < 0) \\ 2 & (x_{n-1} - x_{n+1} > 0, y_{n-1} - y_{n+1} = 0) \\ 3 & (x_{n-1} - x_{n+1} > 0, y_{n-1} - y_{n+1} > 0) \\ 4 & (x_{n-1} - x_{n+1} = 0, y_{n-1} - y_{n+1} < 0) \\ 6 & (x_{n-1} - x_{n+1} = 0, y_{n-1} - y_{n+1} > 0) \\ 7 & (x_{n-1} - x_{n+1} < 0, y_{n-1} - y_{n+1} < 0) \\ 8 & (x_{n-1} - x_{n+1} < 0, y_{n-1} - y_{n+1} = 0) \\ 9 & (x_{n-1} - x_{n+1} < 0, y_{n-1} - y_{n+1} > 0) \end{cases} \quad (5.5)$$

5.2.3 制御点の移動と収束判定

9つの状態 ($i = 1, 2, \dots, 9$) 毎にエネルギーの総和を求め、エネルギーの総和が最小となる方向へ Snakes の制御点を移動 ($i = 5$ が選択されたときは停留) する。まず、式 (5.6) により NUM 個の制御点から成る Snakes1 の n 番目の輪郭点 ($n=1, 2, \dots, \text{NUM}$) の9つの状態 ($i=1, 2, \dots, 9$) についてエネルギーの総和 E_{1ni} を求める。

$$E_{1ni} = \alpha E_{1ni_{d1}} + \beta E_{1ni_{d2}} + w_{div} E_{1ni_{div}} + w_{press} E_{1ni_{press}} \quad (5.6)$$

ここで、 α は輪郭の一次微分の荷重、 β は輪郭の二次微分の荷重、 w_{div} は画像エネルギーの荷重、 w_{press} は圧力エネルギーの荷重を示す。

Snakes2 についても同様に各エネルギーを求め、式 (5.7) により n 番目の制御点の9つの状態のエネルギーの総和 E_{2ni} を求める。

$$E_{2ni} = \alpha E_{2ni_{d1}} + \beta E_{2ni_{d2}} + w_{div} E_{2ni_{div}} + w_{press} E_{2ni_{press}} \quad (5.7)$$

そして、Snakes1 と Snakes2 で対応する n 番目の制御点同士のエネルギーを式 (5.8) により求め、 $E_{n1}, E_{n2}, \dots, E_{n9}$ のうちでエネルギーが最小となる位置に制御点を移動 (または停留) する。

$$E_{ni} = E_{1ni} + E_{2ni} \quad (5.8)$$

このとき、エネルギーの総和から最小となる方向を判定して制御点を移動するのは Snakes1 とし、Snakes2 の n 番目の制御点は、Snakes1 の n 番目の制御点同士が鏡像の関係となるように移動する (式 (5.9)(5.10))。ここで、 dx_{n1} と dy_{n1} は Snakes1 の制御点 n の x および y 方向の移動距離、 dx_{n2} と dy_{n2} は Snakes2 の制御点 n の x および y 方向の移動距離を示す。

$$dx_{n2} = \begin{cases} -1 & (dx_{n1} = 1) \\ 0 & (dx_{n1} = 0) \\ 1 & (dx_{n1} = -1) \end{cases} \quad (5.9)$$

$$dy_{n2} = \begin{cases} -1 & (dy_{n1} = -1) \\ 0 & (dy_{n1} = 0) \\ 1 & (dy_{n1} = 1) \end{cases} \quad (5.10)$$

式 (5.11) を満たす間，反復計算を行って制御点を移動する．

$$dm > Tm \quad (5.11)$$

ここで dm は 1 ステップにおける制御点の移動量を示し，

$$dm = \sum_{n=1}^{\text{NUM}} (|dx_{n1}| + |dy_{n1}|) \quad (5.12)$$

により求まる．また， Tm は移動収束閾値を示す．

式 (5.11) を満たさない場合は仮収束したと判定する．このとき，全制御点数を NUM ，画像輪郭上に乗っている制御点数を NUM_r とすると，

$$\frac{\text{NUM}_r}{\text{NUM}} \geq Tr \quad (5.13)$$

を満たす場合，最終的に収束したと判定する (Tr ：収束判定制御点数比閾値)．式 (5.13) を満たさない場合は，反復処理を繰り返す．しかし，このとき Snakes はすでに仮収束状態にあるため，そのまま反復計算しただけでは収束結果は変化しない．そこで，強制移動ステップ数 $Step$ の間だけ画像エネルギーの荷重を 0 として反復計算を行う．このとき移動する Snakes の制御点は，近傍の Snakes の制御点が画像輪郭に乗っていないようなもの，すなわち孤立したノイズに乗っている制御点とする．その後，通常の反復計算を行い，Snakes を収束させる (図 5.3)．

5.2.4 例外処理

制御点の停留している画像輪郭が微小領域である場合は，その画像輪郭から制御点を外す．画像輪郭をあらかじめ求めておき，その画像輪郭についてラベリング処理を行う．次に，座標 (x, y) と同じラベルを持つ画像輪郭の総数を $area(x, y)$ として記憶しておく．制御点の停留している画像輪郭の座標 (x, y) に対応する $area(x, y)$ の値について

$$area(x, y) \leq Th \quad (5.14)$$

を満たす場合は，停留している画像輪郭を微小領域と判定し，画像エネルギーを 0 として収束計算を続行する (Th ：閾値)．

その他，画像の端にある輪郭は耳や髪など，眼鏡以外の物体の輪郭と仮定する．また，眼鏡は画像の上半分に存在し，画像の下半分にある画像輪郭は眼鏡以外の物体の輪郭と仮定

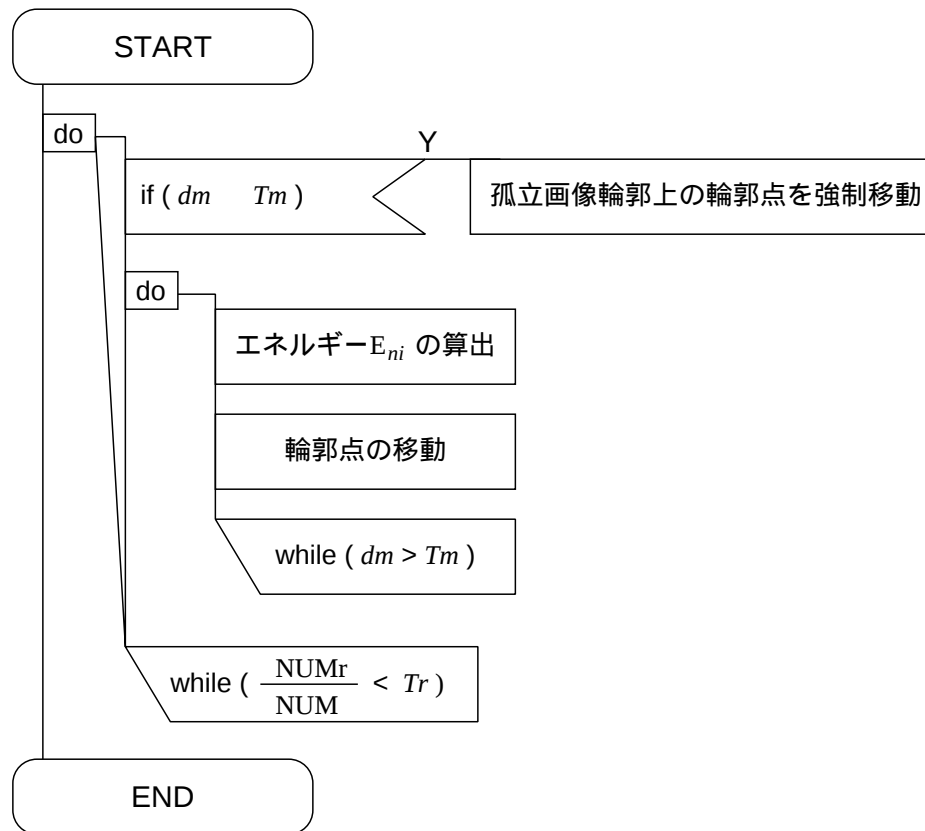


図 5.3: Snakes 収束処理の流れ図

する．これらの仮定より，画像の端や下半分にある画像輪郭に制御点が停留した場合，画像エネルギーを 0 として収束処理を続行する．

5.3 Snakes による眼鏡フレーム領域抽出実験

本節では，提案した Snakes の収束結果を示す．また，眼鏡フレーム領域抽出の改善方法のための後処理について述べる．

5.3.1 Snakes の収束結果

実験に使用した顔画像は無表情顔の正面顔画像である．背景は一様で，照明は眼鏡レンズの反射が生じないように設定し，35mm 一眼レフカメラを用いて撮影してフィルムスキャナにより 120×120 pixels の大きさでデジタル化した．ここでは問題を簡易化するために，瞳の位置を用いて左右の瞳を結ぶ線分が x 座標に並行になるように顔の傾きを正規化した（図 5.4）．

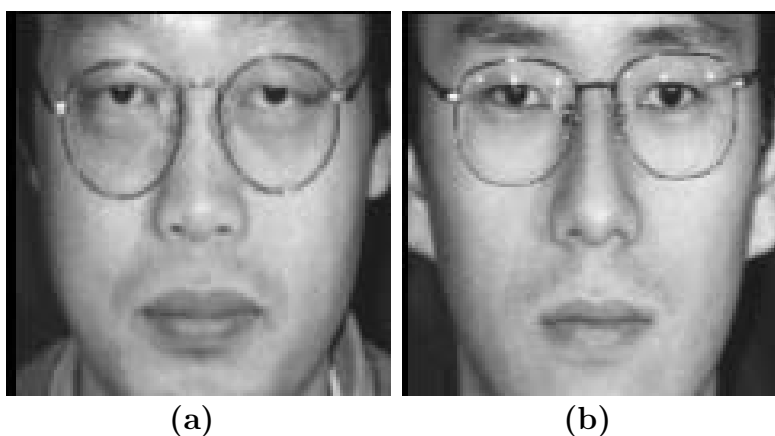


図 5.4: 眼鏡顔画像

また，画像輪郭は，図 5.5 に示すような微分オペレータを用いて x および y 方向で注目画素と隣接する画素の輝度値の差分 div_x および div_y を求め，その 2 乗和の平方根 div

$$div = \sqrt{div_x^2 + div_y^2} \quad (5.15)$$

が 30 以下ならば 0 とする閾値処理により求めた．

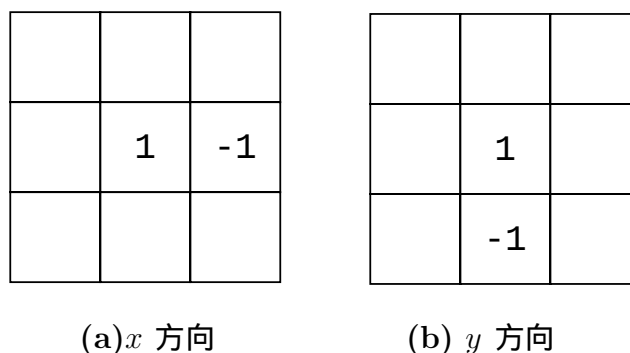


図 5.5: 画像輪郭を求める微分オペレータ

図 5.4 に対する実験結果を図 5.9, 5.10, 5.11 に示す．Snakes に与えた各パラメータは人物 (a), (b) とともに表 5.1 に示す通りである．なお，図の下括弧内の数値は反復計算回数を示し，収束結果では Snakes の輪郭点を 3 次 Riesenfeld 閉スプライン関数で補間した結果を示した．提案した Snakes を眼鏡顔画像に適用した結果，Snakes の制御点は眼鏡フレームの周囲で収束し，制御点を 3 次 Riesenfeld 閉スプライン関数で補間した結果は眼鏡フレームの概形を表していることが判る．

Snakes による眼鏡フレーム領域抽出結果は，眼鏡フレームの概形となっているものの，中央付近のリムにおいて誤差が大きくなっている．これは，眼鏡フレーム中央部分周辺の Snakes の制御点が反復計算の早い段階で眼鏡フレームの画像輪郭に停留しているために，特にプロップ周辺の Snakes の制御点が，中央部分で停留した制御点から離れた位置に移動できず，結果として眼鏡フレームから離れた位置で収束していると考えられる．この問題に対し，次項では眼鏡フレーム領域抽出特性の改善方法について述べる．

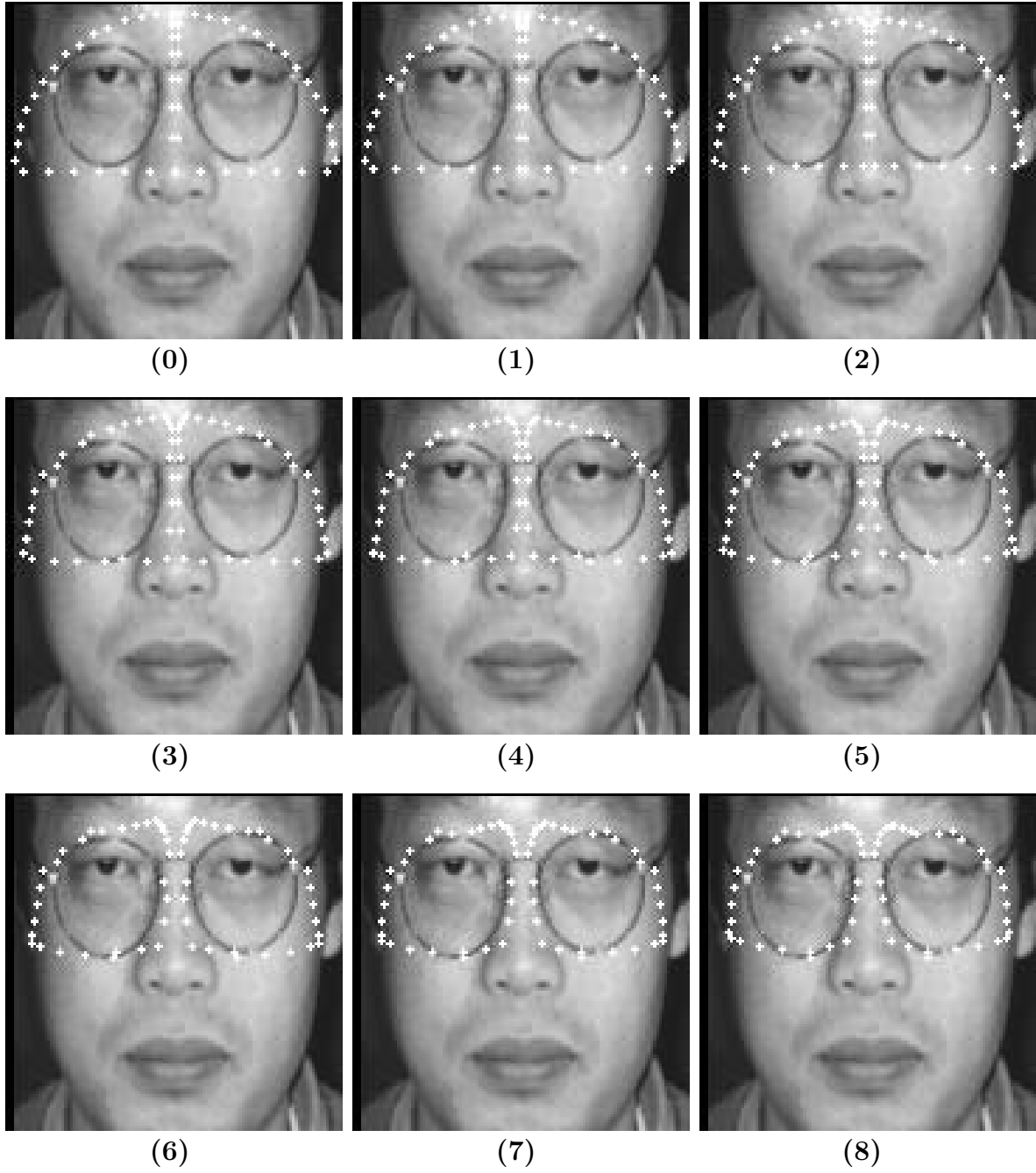


図 5.6: Snakes の収束の様子．図の括弧内の数値は反復計算のステップ数

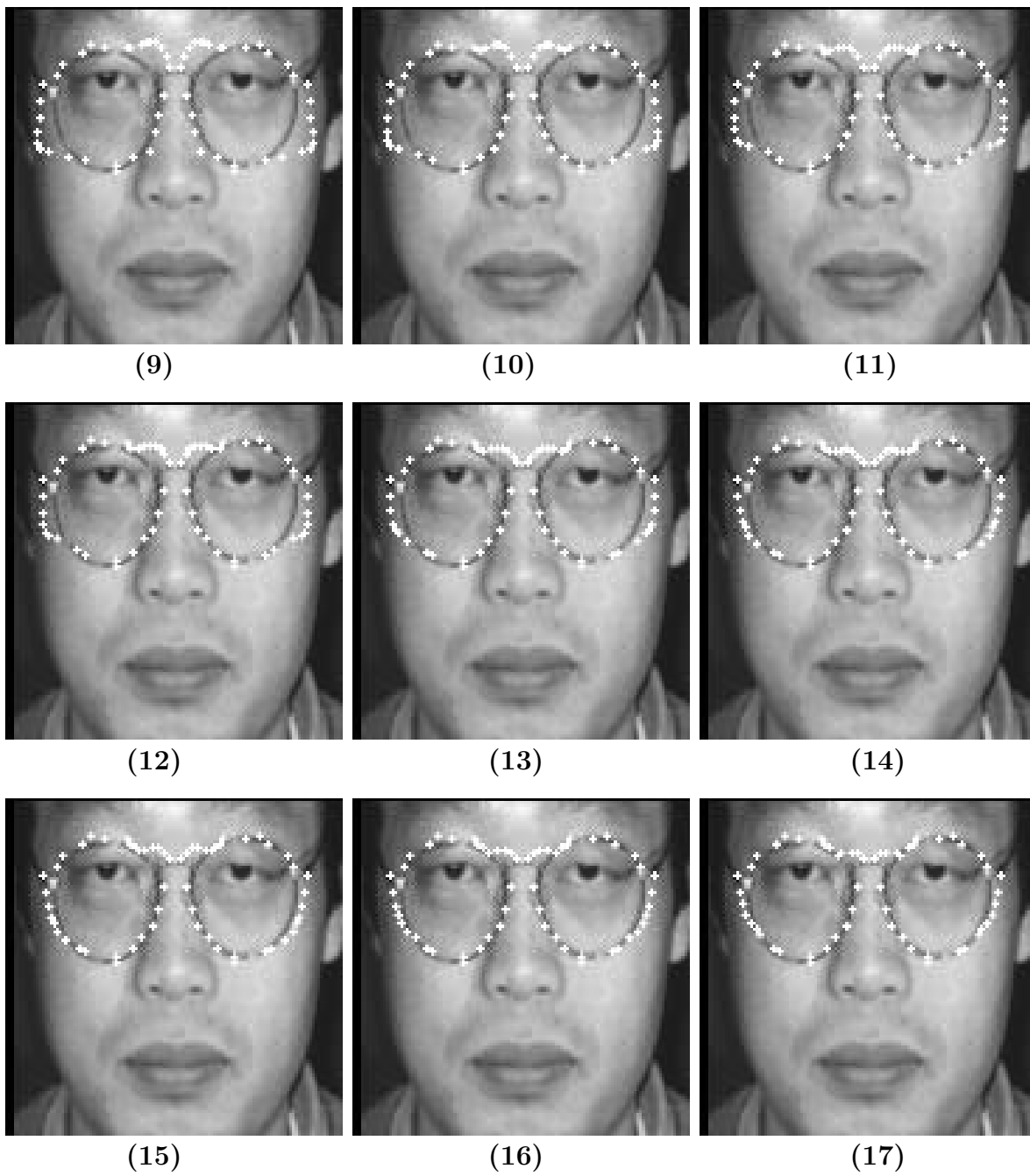
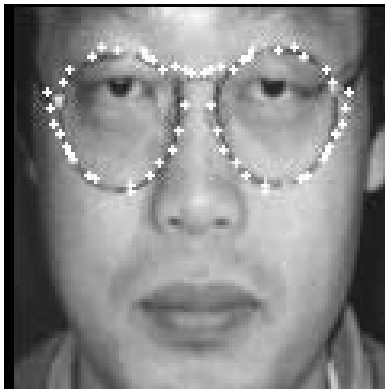


図 5.7: Snakes の収束の様子 (続き) . 図の括弧内の数値は反復計算のステップ数



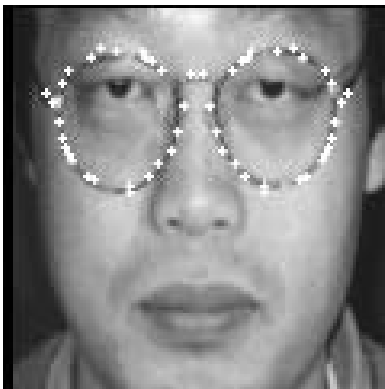
(18)



(19)



(20)



(21)



(抽出結果)

図 5.8: Snakes の収束の様子 (続き) . 図の括弧内の数値は繰り返しステップ数

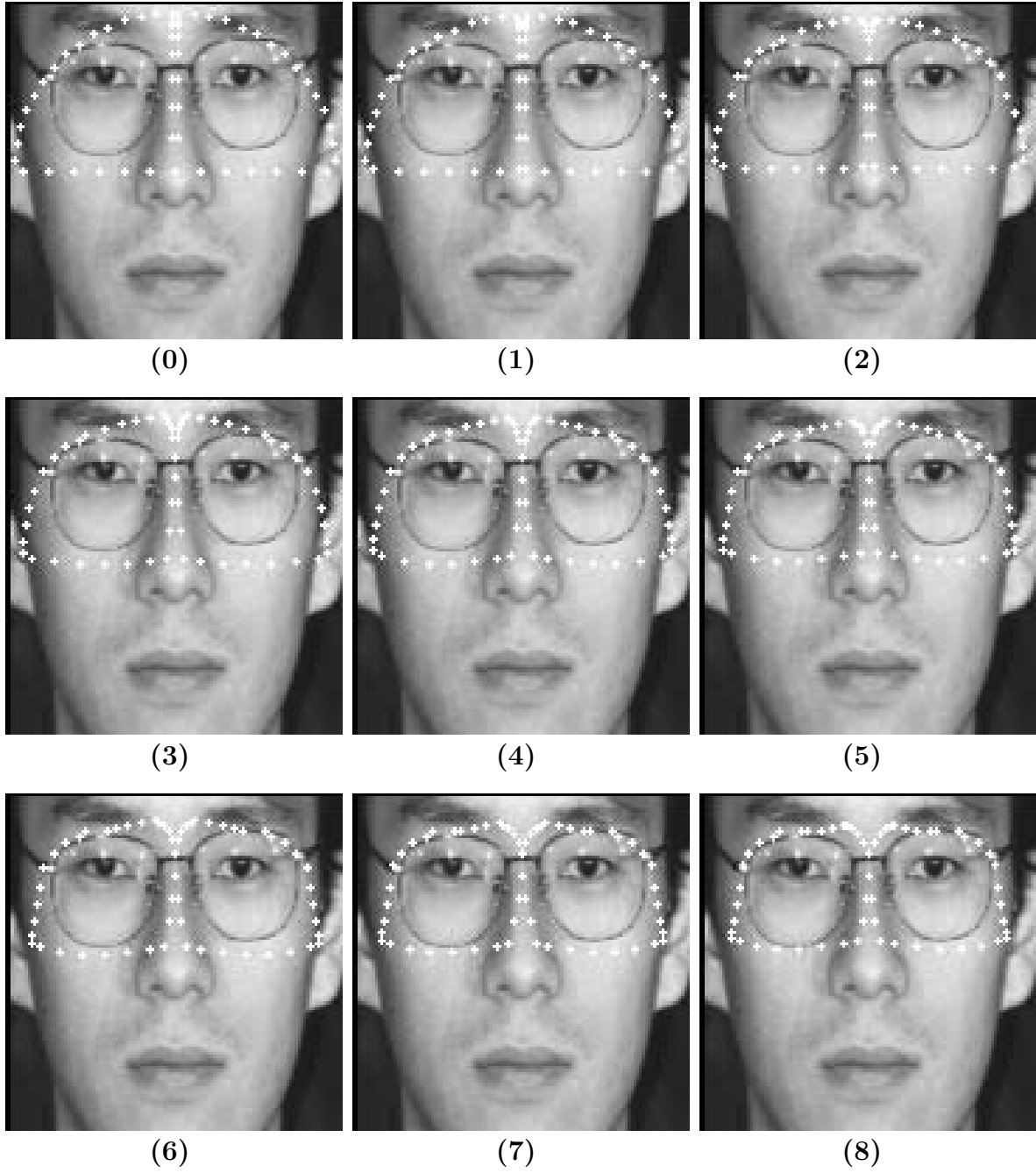


図 5.9: Snakes の収束の様子．図の括弧内の数値は反復計算のステップ数

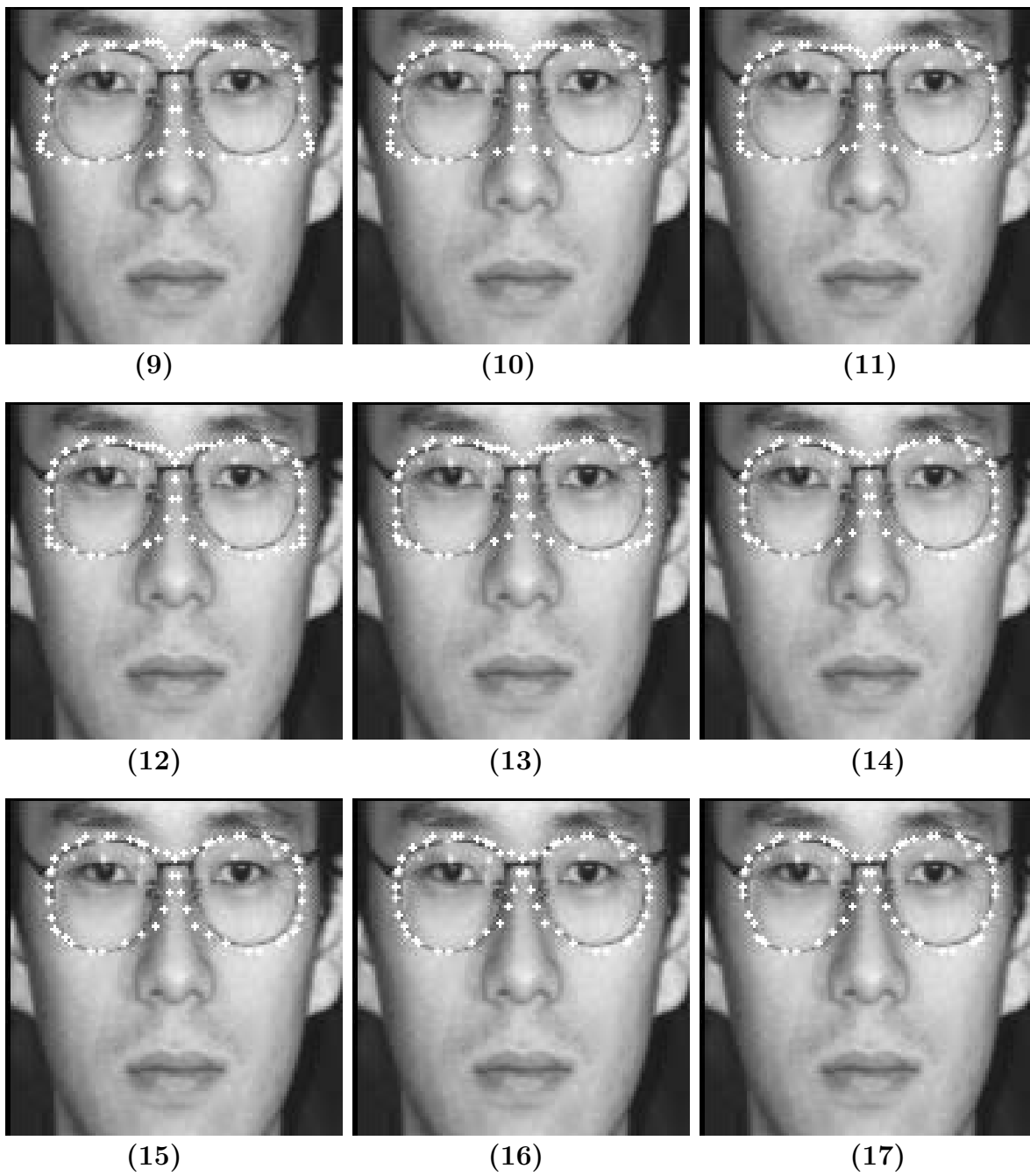


図 5.10: Snakes の収束の様子 (続き) . 図の括弧内の数値は反復計算のステップ数

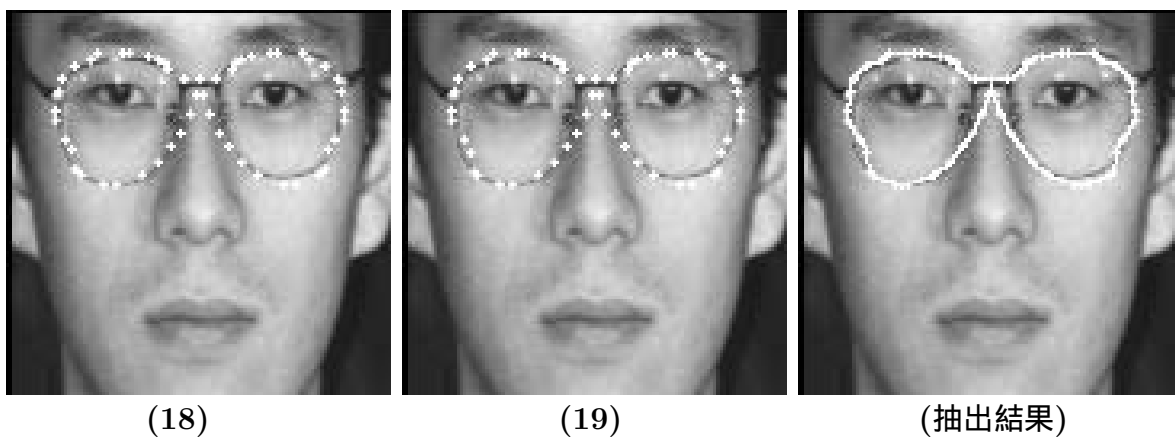


図 5.11: Snakes の収束の様子 (続き) . 図の括弧内の数値は反復計算のステップ数

表 5.1: 設定した Snakes のパラメータの値

パラメータ	パラメータの値
制御点数 NUM	30
輪郭形状の一次微分の荷重 α	1.000
輪郭形状の二次微分の荷重 β	2.000
画像エネルギーの荷重 w_{div}	-4.000
圧力エネルギーの荷重 w_{press}	-4.000
微小面積閾値 Th	10.000
移動収束閾値 Tm	0.000
収束判定制御点数比 Tr	0.875
強制移動ステップ数 $Step$	3.000
最大反復回数 $Repeat$	200.000

5.3.2 眼鏡フレーム領域抽出特性の改善

前項では，Snakes の収束結果の各制御点間を 3 次リーゼンフェルト閉スプラインにより滑らかに接続しただけでは眼鏡フレーム領域が良好に抽出できない場合があることを示した．

この問題に対し，制御点数を増やすことにより対応できる場合がある．制御点数を増やすことにより，Snakes の自由度が増し，中央部分で停留した制御点の影響が波及する範囲を狭められると考えられる．しかしながら，実際に制御点数を 40 に増やした場合の収束結果（図 5.12）を見ると，人物 (b) は中央部分が良好に抽出できているが，人物 (a) の場合は収束結果にほとんど改善が見られない．このように，制御点数を増やすだけで眼鏡フレームの抽出を良好に行えるとは一概に言えない．そのため，この問題を解決するには，他のアプローチを適用する必要がある．

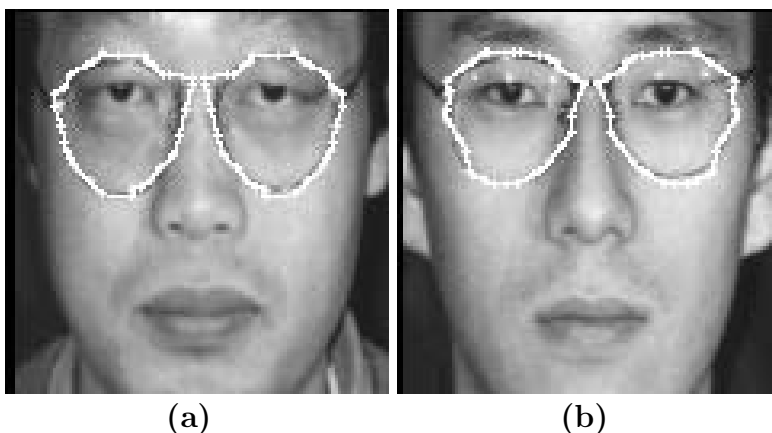


図 5.12: Snakes の制御点数を増やした場合の収束結果（制御点数：40）

人物 (a) に対する収束結果（図 5.8 の反復計算のステップ (21)）の各制御点そのものは，眼鏡フレーム上に存在している．この状態で各制御点をそのまま全て用いて制御点の順番通りに 3 次リーゼンフェルト閉スプラインにより接続すると，前項で示したように眼鏡フレーム領域から離れた位置を抽出してしまう．このとき，各制御点をそのまま全て用いるのではなく，眼鏡フレームの各部分毎に抽出することにより眼鏡フレームをより良好に抽出できると考えられる．

そこで，Snakes の収束結果について，

1. リム部分の抽出処理

2. 中央部分の抽出処理

3. エンドピース・テンブル部分の抽出処理

を行う．

リム部分の抽出処理

提案した Snakes の収束結果において，制御点はリムの上に乗っている．そこで，収束結果の内側から膨張するような Snakes を適用することにより，リム部分の制御点だけを滑らかに接続するような収束結果が得られると考えられる．

まず，初期輪郭を以下の手順により求める．

1. Snakes1 の重心 (X_{1_j}, Y_{1_j}) を求める．
2. Snakes1 の制御点のうちで最小・最大となる x および y 座標を $X_{1_{min}}, X_{1_{max}}, Y_{1_{min}}, Y_{1_{max}}$ として求める．
3. 重心 (X_{1_j}, Y_{1_j}) の周囲に長軸半径 $\frac{1}{4}(X_{1_{max}} - X_{1_{min}})$ ，単軸半径 $\frac{1}{4}(Y_{1_{max}} - Y_{1_{min}})$ の楕円弧状の初期輪郭を形成する．

先に得た収束結果を入力とし，この初期輪郭から膨張させて収束させる．Snakes2 についても同様な処理を施す．図 5.13 に本項で述べた方法を適用することにより得たリム部分の抽出結果を示す．

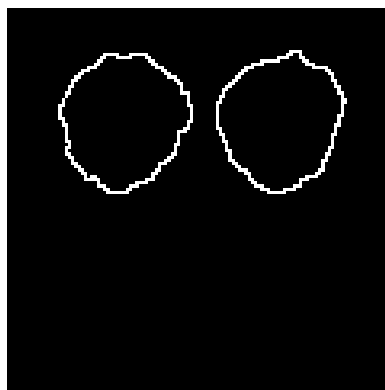


図 5.13: リム部分の抽出結果

中央部分の抽出処理

前項のリム部分の抽出結果では，5.3.1 項において求めた収束結果のうち，中央部分は処理されずに残されたままになっている．そこで，中央部分の抽出を行う．

5.3.1 項で求めた Snakes の収束結果に前項のリム部分の抽出結果を重ね合わせると，図 5.14 のようになる．

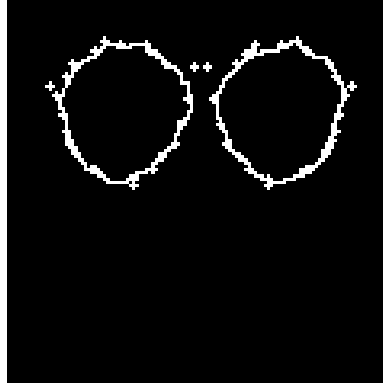


図 5.14: 5.3.1 項で得られた収束結果にリム部分の抽出結果を重ね合わせた結果

前項の処理によりリム部分は抽出できているので，中央部分がリム部分と接続すれば良い．この問題は，リム部分と中央部分が画像内に分布していると捉えることができ，これらをひとまとまりの物体として扱えることができれば良い．したがって，この重ね合わせた結果について外側から Snakes を収縮させることにより，リム部分と中央部分を囲むように収束すると考えられる．図 5.15 に抽出結果を原画像に重ねて示す．

エンドピース・テンプル部分の抽出処理

エンドピースとテンプル部分は，前章で説明したパラメトリックな眼鏡フレームモデルのエンドピース・テンプル抽出方法を適用する． x 方向の探索範囲 x_l, x_r は

$$x_l \leq X_{1_{min}} \quad (5.16)$$

$$x_r \geq X_{2_{max}} \quad (5.17)$$

とし，縦方向の探索範囲 y は，

$$Y_{1_{min}} - (X_{2_{min}} - X_{1_{max}}) < y < \frac{1}{2} (Y_{1_{min}} + Y_{1_{max}}) \quad (5.18)$$



図 5.15: リム部分と中央部分の抽出結果

とする（前章では，リムなし眼鏡の場合も考慮して探索領域の決定にリムの情報を用いなかったが，ここではリム抽出後の処理につき，リムの情報を用いた）．

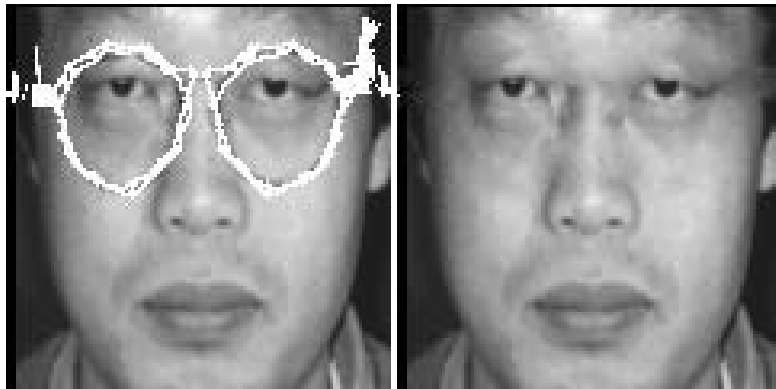
眼鏡フレーム抽出改善結果と眼鏡フレーム領域除去結果を図 5.16 に示す．ここで，眼鏡フレームの太さは，前章でのリムの太さの決定方法と同様，リム領域の両端 $X_{1_{max}}$, $X_{2_{min}}$ を用いて，

$$\frac{1}{2}(X_{2_{min}} - X_{1_{max}}) \quad (5.19)$$

までの範囲，すなわち最大でブリッジ幅の半分までを採りうるものとした．中央部分周辺のリムが良好に抽出できており，眼鏡フレーム領域の抽出が改善されていることが判る．また，眼鏡フレーム領域内の輝度値の置換は，前章で述べた補間方法により行った．眼鏡フレーム領域除去結果となっており，眼鏡なし顔画像に対する類似度は 0.882 となり，同様に他の人物の眼鏡フレーム除去結果と眼鏡なし顔画像との類似度は平均で 0.852 となり，眼鏡なし顔画像を良好に推定できた．

5.4 GA による最適荷重係数の探索

Snakes 全体のエネルギーは，各エネルギーと係数の荷重和として求める．Snakes は与えたエネルギーの係数により所望の位置で収束せず，また，係数を与える方法は経験的である．そこで，最適な係数を大域的に探索するために，遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm: GA）を用いる．GA は Holland の著書『Adaptation in Natural and Artificial Systems』で述べられることで一般に知られるようになった．GA は，自然界において生物がその置か



眼鏡フレーム抽出改善結果 眼鏡フレーム領域除去結果

図 5.16: 眼鏡フレーム抽出改善結果と眼鏡フレーム領域除去結果

れた環境に応じて進化していく過程を，最適化問題において評価関数に応じて解の候補集団が進化していく過程をなぞらえた最適化アルゴリズムである [82]-[85]．

このアルゴリズムの流れは，以下のようなものである．

1. 問題を文字列に変換する．
 - 文字列は遺伝子型に対応する．
2. 複数の文字列を生成し，集団として取り扱う．
3. 各文字列を評価して適応度の高いものを選んで残すようにする（選択交配）．
 - この取捨選択は，自然界における淘汰に対応する．
4. 選択された遺伝子に対してオペレータを施すことにより，新しい文字列を生成する．
 - 自己再生（次の世代に自分自身を残す）
 - 交叉（他の文字列と文字列中の要素を交換する）
 - 突然変異（ある確率で文字列中の要素を変化させる）
 - ...
5. ある設定した世代となるまで 2 に戻る．

ここで，文字列は，数値の 2 進数バイナリコードを用いる方法や 2 進数 Gray コードを用いる方法がある．また，交叉には，1 点交叉（文字列中の 1 箇所を決めてその前後でどち

らの親の遺伝子型を受け継ぐかを変える方法)や n 点交叉,一様交叉(ランダムに生成したビットマスクの0,1により2つの親のどちらからその位置の遺伝子を受け継ぐか決定する方法)がある.

このサイクルを繰り返すことにより,環境に応じた評価値の高い文字列(遺伝子)を生成し,文字列の集合全体の評価値を向上させる.GAは常時複数の解を保有しながら探索を行うため,局所解に陥りにくいという特徴を持つ.

5.5 GA を適用した場合の Snakes の収束結果

GA を適用し,Snakes に与えるエネルギーの係数を大域的に探索した.GA の各遺伝子の評価として,式(5.20)に示されるように,Snakes が収束したときに画像輪郭上に乗っている Snakes の制御点数 NUM_r の割合を適応度関数とした.

$$ratio = \frac{NUM_r}{NUM} \quad (5.20)$$

ここで NUM は Snakes の全制御点数を表す.

各パラメータの値域および値は,表5.2のように定めた.変化させるパラメータは NUM ,

表 5.2: 設定した GA のパラメータの値

パラメータ	設定範囲 / 設定値
制御点数 NUM	20 ~ 83 (6bit)
輪郭形状の一次微分の荷重 α	0.010 ~ 2.560 (8bit)
輪郭形状の二次微分の荷重 β	0.010 ~ 2.560 (8bit)
画像エネルギーの荷重 w_{div}	-2.560 ~ -0.010 (8bit)
圧力エネルギーの荷重 w_{press}	-2.560 ~ -0.010 (8bit)
微小面積閾値 Th	10.000
移動閾値 Tm	0.000
収束判定制御点数比 Tr	0.875
強制移動ステップ数 $Step$	3.000
最大反復回数 $Repeat$	200.000

6 bit	8 bit	8 bit	8 bit	8 bit
輪郭点数 N	一次微分荷重 α	二次微分荷重 β	画像エネルギー 荷重 w_{div}	圧力エネルギー 荷重 w_{press}

図 5.17: 各係数をコード化した 1 個の遺伝子

$\alpha, \beta, w_{div}, w_{press}$ である。GA の各個体の遺伝子座は、2 進数バイナリコードよりも 2 進数 Gray コードで表現した方が優れていることから [82]，38 bit の長さを持つ遺伝子として 2 進数 Gray コード [86] でコード化した（図 5.17）。なお，微小面積閾値 Th ，移動収束閾値 Tm ，収束判定制御点数比 Tr ，強制移動ステップ数 $Step$ ，最大反復回数 $Repeat$ 画像輪郭を求める方法については，5.3.1 項で述べた実験と同様の設定とした。

選択交配はエリート保存戦略（集団中で適応度の高い遺伝子をそのまま次世代に残す方法）をとり，適応度の高い上位 2 つの遺伝子をそのまま残すこととした。オペレータとして，交叉には 2 点交叉を用いた。1 点交叉より 2 点交叉の方が性能が良く，2 点交叉と一樣交叉ではどちらの性能が良いかは一概に言えないことから [82]，ここでは簡易化のため 2 点交叉とした。また，突然変異の生じる確率は経験的に遺伝子長の逆数を用いることが多いということから [82]，ビット長 38 の逆数の $\frac{1}{38}$ とした。そして，GA の処理を繰り返す世代数は 200 とし，1 世代には 100 個の遺伝子が存在するように設定した。

初期設定として，第 1 世代目の各遺伝子のパラメータの重複を防ぐために，遺伝子の半数は各パラメータの最小値から増加させ，残りの半数は最大値から減少するように与えた。このとき，増加幅は 0.010 または 0.020 をランダムに選ぶようにした。なお，制御点数については 20 から 83 を繰り返す（83 の次は 20）ようにした。

以上の条件下で実験した結果を図 5.18 に示す（横軸：世代数（GA の反復回数），縦軸：最大適応度）。図 5.18 を見ると，適応度は 60 世代前後で収束している。

200 世代目で最も適応度の高い遺伝子をパラメータに用いて Snakes を収束させた結果を図 5.19, 5.20 に示し，表 5.3 に各々で用いたパラメータを示す。

適応度関数として式 (5.20) の $ratio$ だけを考慮した場合は画像エネルギーが大きいほど Snakes の制御点が画像輪郭上に停留しやすく優位性があるように思えるが，内部エネルギーにより「硬い」Snakes となる場合は「柔らかい」Snakes よりも早く収束するため，たとえ画像エネルギーが大きくとも Snakes の制御点が画像輪郭上に停留しやすいとは一概に言えず，内部エネルギーの大きさも影響すると考えられる。このことは，表 5.3 から

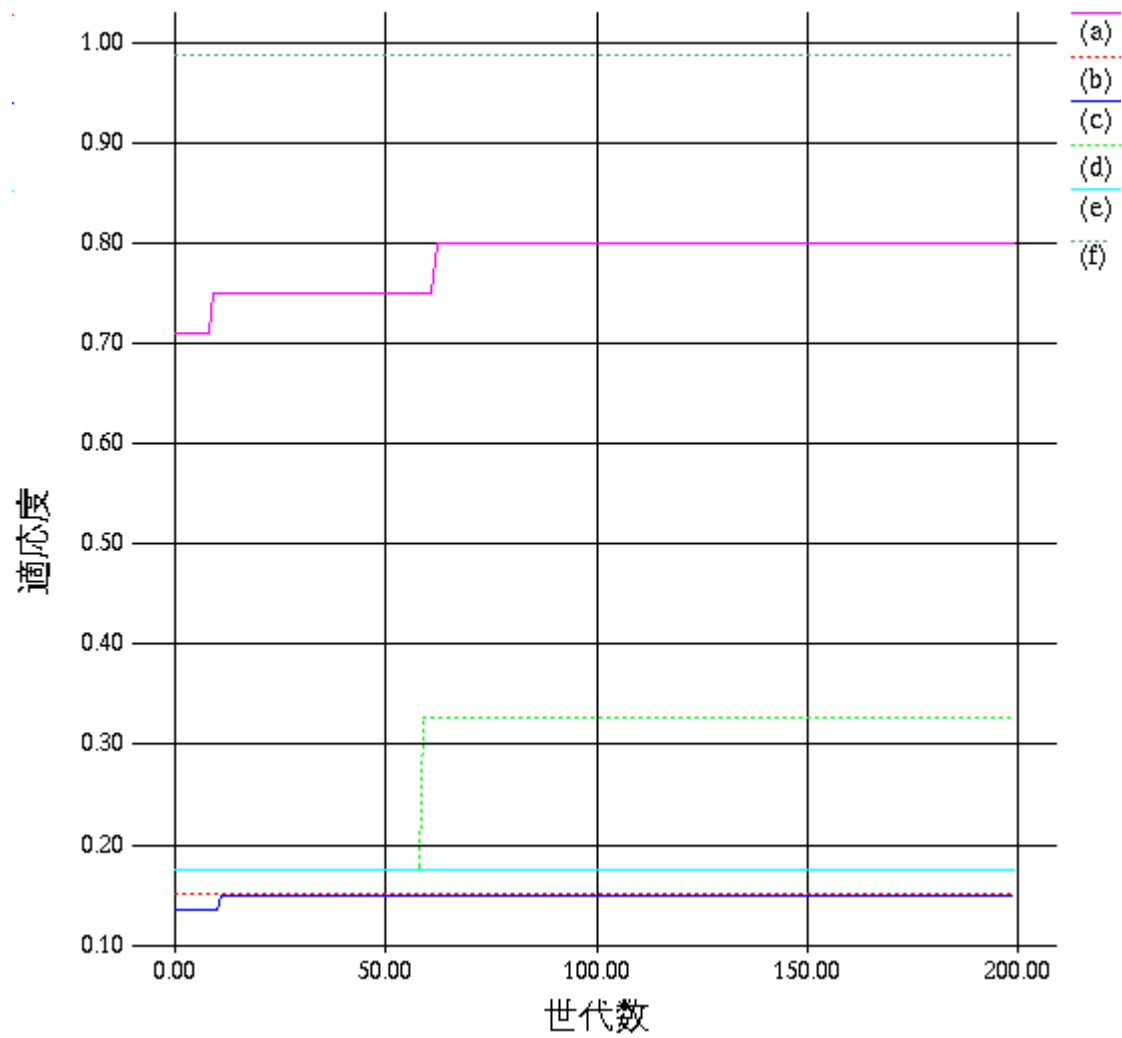


図 5.18: 世代数と適応度の関係

画像エネルギーが大きければ良いとは必ずしも言えないことが判る．

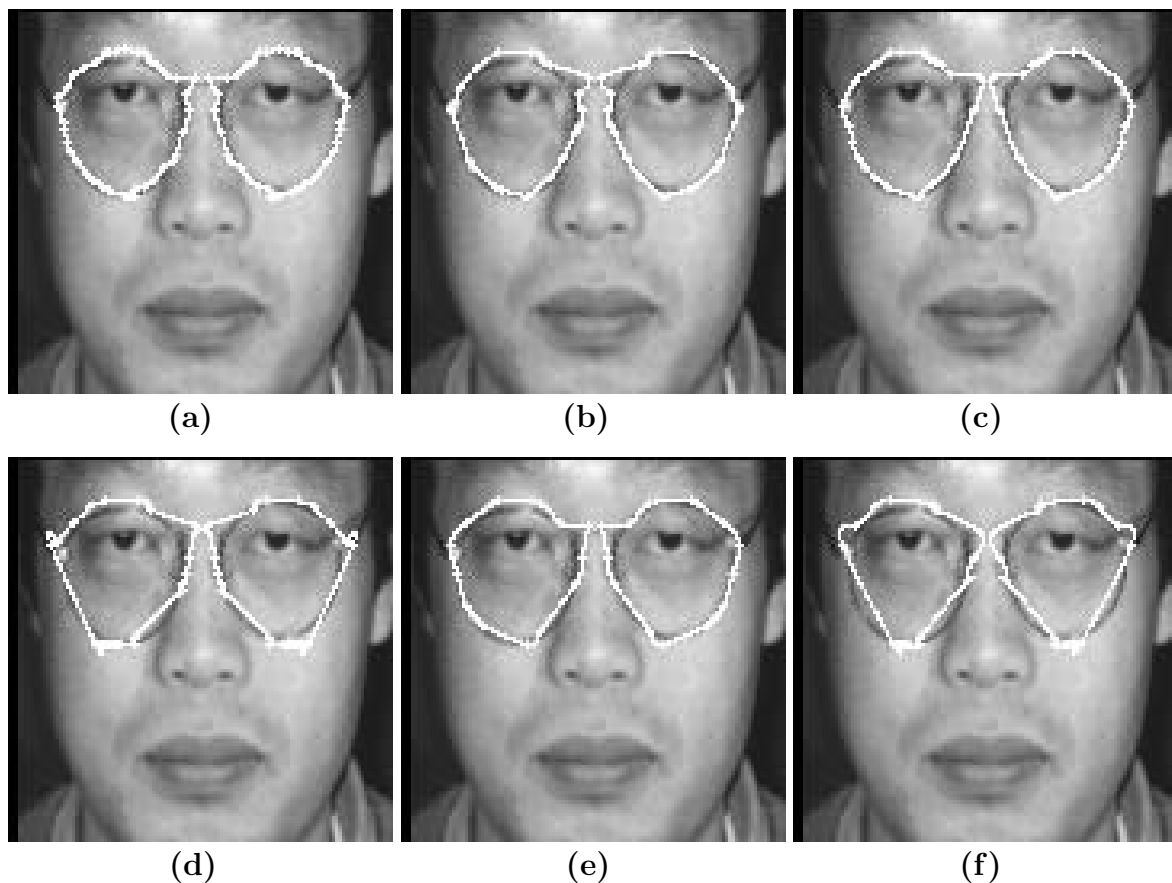


図 5.19: 200 世代目で適応度の最も高い遺伝子を用いた場合の収束結果の例

Snakes の収束結果は眼鏡フレームの概形となったが，手動で与えた場合と比較すると不十分な場合があるといえる（図 5.19(d)(f), 5.20(f)）．式 (5.20) の *ratio* だけを適応度関数とした場合，より多くの Snakes の制御点が画像輪郭上に停留していれば適応度の高い遺伝子となる．そのため，図 5.19(d)(f) では，制御点が画像輪郭上に停留しているものの，制御点同士が近づきすぎ，分布に偏りがある．また，図 5.20(f) では眼鏡フレームの一部を通過して眼鏡フレームと目の部分で収束しているが，多くの Snakes の制御点が画像輪郭に停留しているので，適応度の面からは評価の高い遺伝子である．

最適なパラメータを得られない原因が，

1. GA の不得意な問題（GA-hard と呼ばれる）
2. 乱数系列の偶発的な原因によるもの

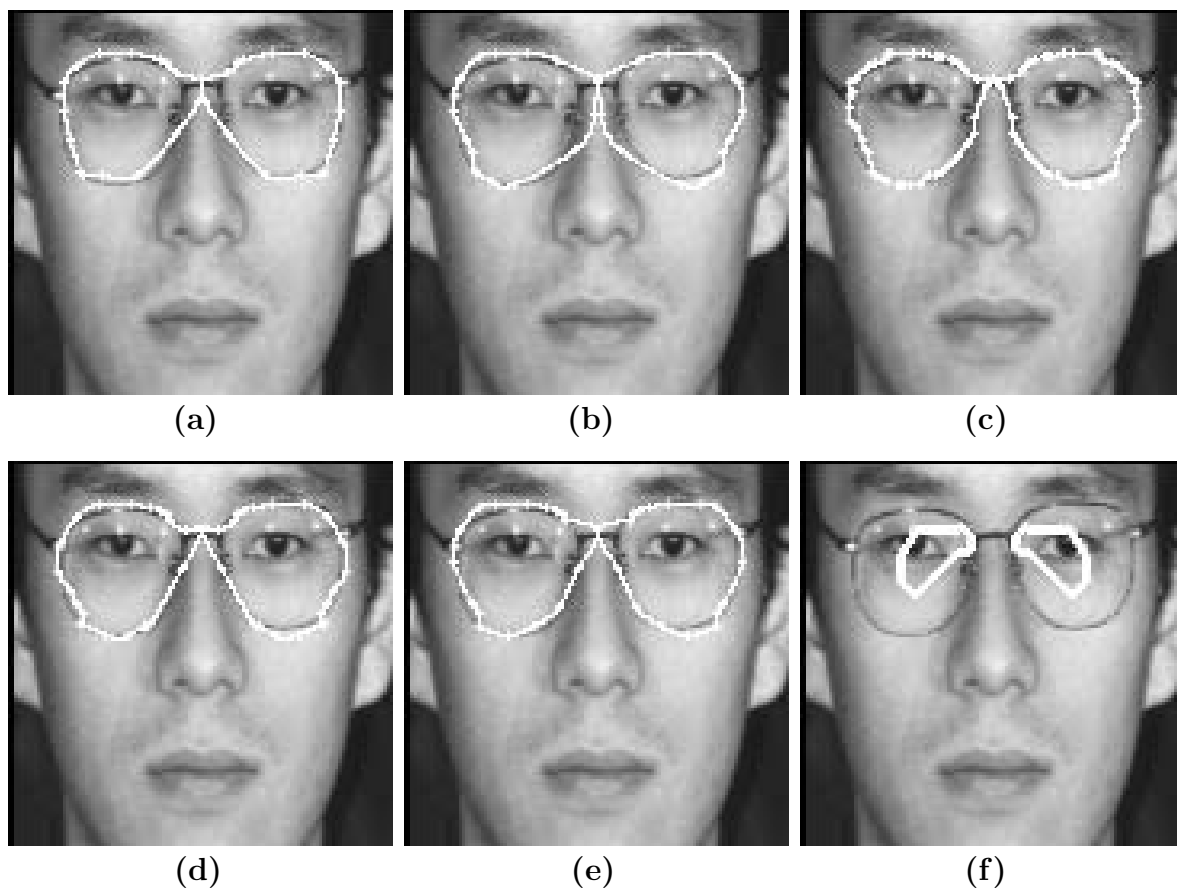


図 5.20: 200 世代目で適応度の最も高い遺伝子を用いた場合の収束結果の例

表 5.3: GA により得られたのパラメータ値

	N	α	β	w_{div}	w_{press}
(a)	21	0.400	0.400	-0.200	-2.550
(b)	21	0.010	0.010	-0.490	-0.080
(c)	79	0.800	2.520	-1.840	-0.440
(d)	52	0.320	0.030	-0.030	-0.490
(e)	20	1.090	0.510	-2.560	-1.440
(f)	60	0.460	0.660	-0.010	-0.590

3. 適応度関数の設定の不十分さによるもの

のいずれかなのかを判断するのは難しい．これら 3 つのうち，適応度関数の設定については，ヒューリスティックな方法ではあるが，結果を見てどのようなことが起こっているのかを推定し，適応度関数を再設定または条件を付加するというフィードバックを繰り返すことでより良い適応度関数を得ることができると考えられる．図 5.19(d)(d) では制御点間の距離が短すぎて偏りが生じており，図 5.20(f) では，Snakes の周囲長が短くなっていることが判る．そこで，誤抽出を防ぐために優先順位を設け，

1. 適応度 *ratio* の大きいもの．
2. *ratio* が同値の場合，制御点間の間隔の最小値 *dist* が大きいもの．

という遺伝子が上位となるように整列した．ここで，*dist* は次式により求める．

$$dist = \min_n \left\{ \sqrt{(x_{1n} - x_{1n-1})^2 + (y_{1n} - y_{1n-1})^2} \right\} \quad (5.21)$$

その結果，図 5.21, 5.21 のように良好な収束結果を得ることができた．適応度は第 1 世代で得られた最大値から変化せず，6 回の実験において変化しなかった（表 5.4）．これは，第 1 世代の中にすでに最適なパラメータの組合せが存在していたと考えられる．表 5.5 に実験で得られたパラメータ値を示す．6 回の実験で得られた最適パラメータは，(a) ~ (f) で互いに近い値となっている．制御点数などのパラメータ値は画像サイズに依存して変化し，また， w_{div} は画像のコントラストに依存するので，他の照明条件下で撮影された顔画像に対して変化すると考えられる．したがって，GA で探索する際に値域の中に最適解を含めるためには，いくつかのサンプルパターンを用意して経験的に手動でパラメータを与え，最適パラメータの傾向を把握しておく必要があると考えられる．

GA の遺伝子を評価する関数の設定により結果が変化するため，適応度関数の設定には注意を要する．特に，適応度関数の設定に際し，目標のある側面からみた特徴だけを用いることにより，最適なパラメータを得ることが困難になる．したがって，得られた結果が所望のものかどうかを検討し，十分な結果の得られる適応度関数を決定する必要がある．また，1 世代における遺伝子数や突然変異の確率などの GA に与えるパラメータに対する検討を行う必要がある．しかしながら，これらは経験的要素が多く，理論的に最適なパラメータを求めることは困難であるため，本研究では GA に与えるパラメータに対する検討は行わなかった．このような GA を制御するための GA はメタ GA と呼ばれ，メタ GA の

表 5.4: 最大適応度 $ratio$ と制御点間の最小距離 $dist$

	$ratio$	$dist$
(a)	1.000	3
(b)	1.000	4
(c)	1.000	3
(d)	1.000	3
(e)	1.000	3
(f)	1.000	4

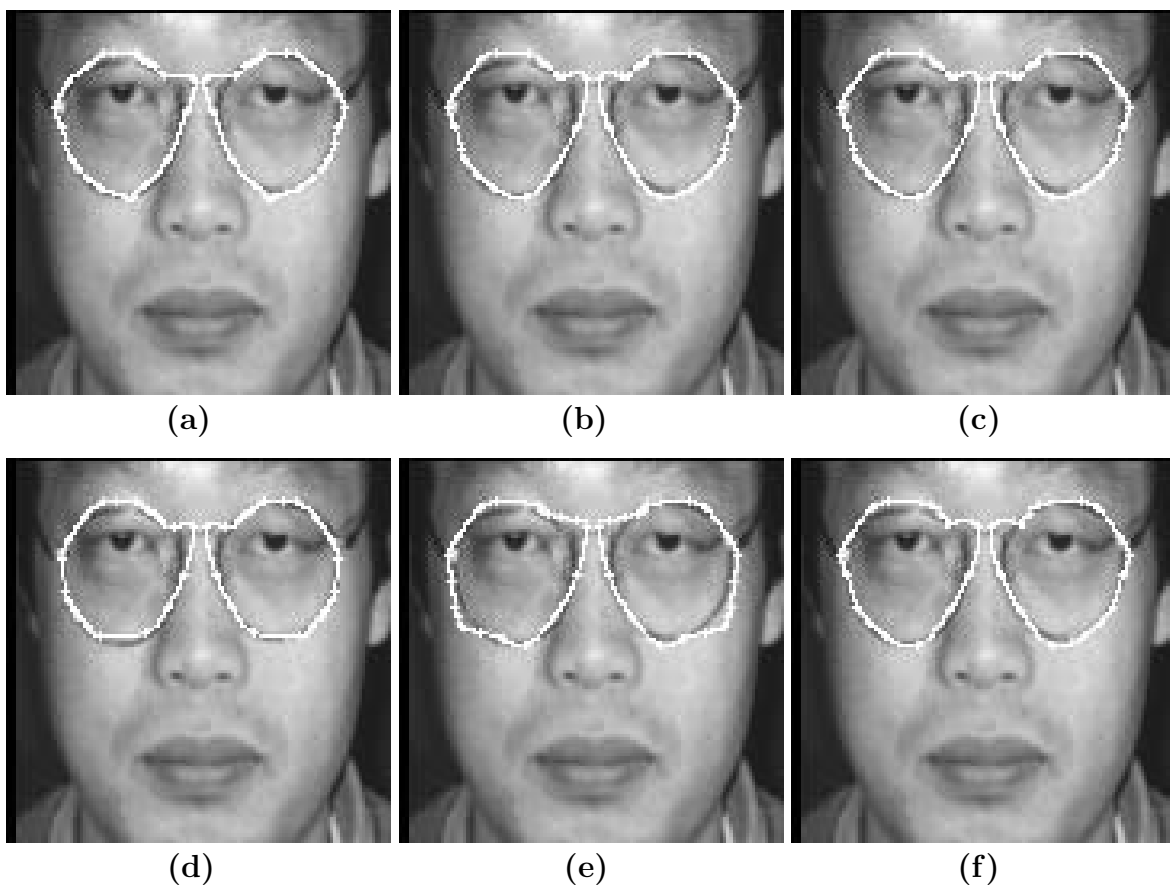


図 5.21: 200 世代目で適応度の最も高い遺伝子を用いた場合の収束結果の例 (制御点間の最小距離 $dist$ も考慮した場合)

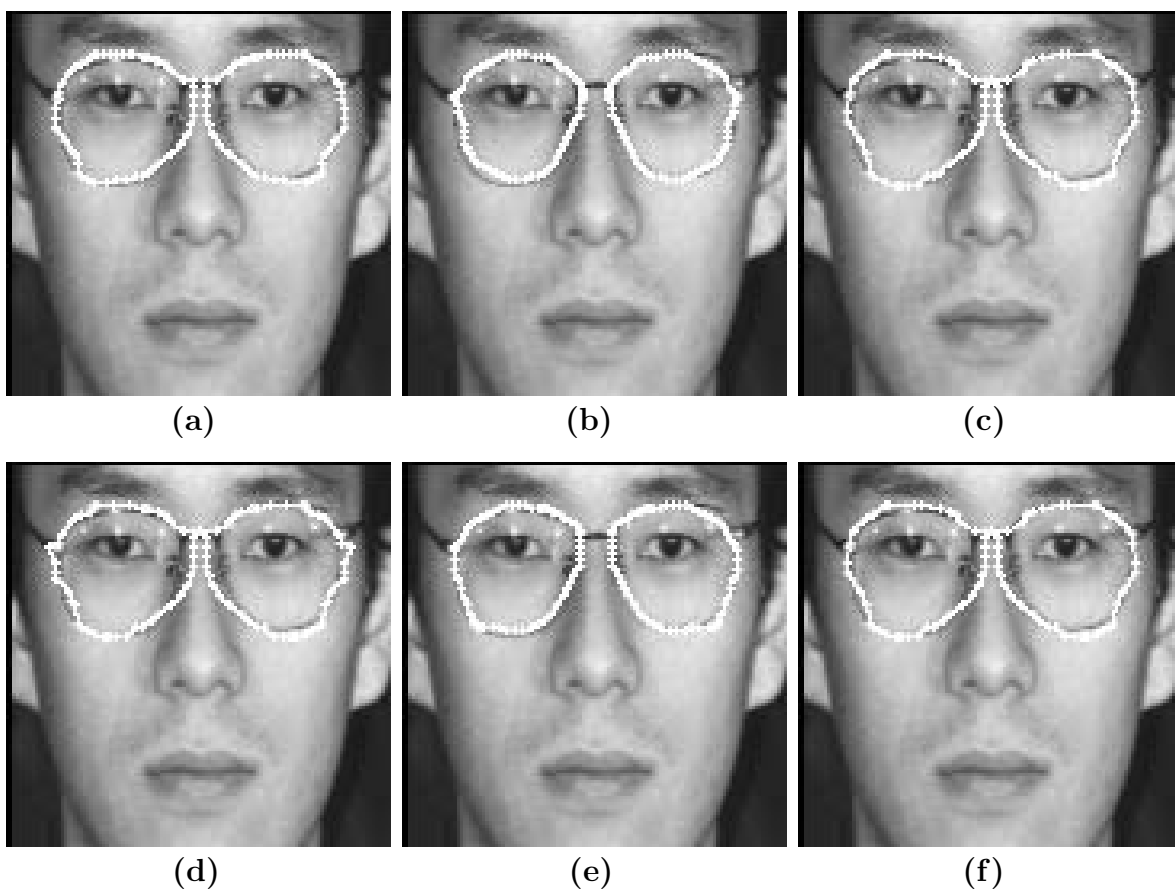


図 5.22: 200 世代目で適応度の最も高い遺伝子を用いた場合の収束結果の例（制御点間の最小距離 $dist$ も考慮した場合）

表 5.5: GA により得られたパラメータ値（制御点間の最小距離 $dist$ も考慮した場合）

	N	α	β	w_{div}	w_{press}
(a)	60	0.460	0.640	-0.090	-0.590
(b)	60	0.400	0.490	-0.020	-0.490
(c)	60	0.410	0.370	-0.640	-0.640
(d)	60	0.330	0.350	-0.150	-0.430
(e)	60	0.350	0.650	-0.020	-0.480
(f)	60	0.470	0.470	-0.480	-0.760

研究が行われつつある [82] が、パラメータ設定の明確な指針は未だ提案されておらず、GA
そのものの研究が期待される。

5.6 結言

本章では対称構造物体に収束する動的輪郭モデルを用いた眼鏡フレーム領域の抽出方法を提案した．

前章では，眼鏡フレームの形状について，各部品毎に関数近似によりモデル化した．画像輪郭を手がかりに探索を行うため，画像輪郭に途切れがある場合は誤抽出をする恐れがある．このため，画像内に分布している画像輪郭をひとまとまりとして扱えることが必要である．Kass らの提案した Snakes は画像輪郭が途切れている場合にも対応でき，連結した滑らかな曲線が反復計算により自動的に求まるなどの利点を持つ．眼鏡フレームの形状は対称構造を持つという特徴があることも踏まえ，Snakes を拡張して対称構造物体に収束する Snakes を設計し，眼鏡フレーム領域の抽出を試みた．

以下に本章で得られた成果を示す．

- 複数の Snakes を用いて対称構造物体へ収束する Snakes を設計した．
- 収束結果に対し，膨張および収縮する Snakes を用いて眼鏡フレームを各部品毎に抽出することにより抽出結果を改善する方法を提案した．
- 遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて Snakes に与える最適な係数を大域的に探索した．60 世代前後で収束することが明らかとなった．優先度を設け，適応度 *ratio* が大きく，*ratio* が同値の場合は制御点間の間隔の最小値 *dist* が大きい遺伝子が上位となるように整列したところ，誤抽出を防ぐことができた．

1 世代における遺伝子数や突然変異の確率などの GA に与えるパラメータに対する検討を行う必要があるが，これらは経験的要素が多く，理論的に最適なパラメータを求めることは困難であるため，本研究では GA に与えるパラメータに対する検討は行わなかった．このような GA を制御するための GA はメタ GA と呼ばれ，メタ GA の研究が行われつつあるが，パラメータ設定の明確な指針は未だ提案されておらず，GA そのものの研究が期待される．

本章の方法により，前章で提案した方法での誤抽出を軽減し，提案方法の適用範囲を広げることができ，本研究で目標としている眼鏡なし顔画像 (原パターン) の推定を行うことができた．ただし，前章の結言で述べたことと同様に，主観的な忠実性や違和感の問題を解決するものではないので，これらのことが重要になる用途には，やはり appearance ベースの方法を選択するのが賢明であろう．本研究の目的・目標とする顔そのものの個性を失

うことなく，原パターンの類似性という基準で眼鏡なし顔画像を推定できているので，充分満足できる結果が得られたと考えている．繰り返すが，appearance ベースによる方法と model ベースによる方法には一長一短があり，適用するシステムでの条件（正規化が実施可能か，など）によっていずれの方法が適しているか選択すべきであろう．

第 III 部では，その他の条件も含め，各方法の特性について述べるとともに，本研究の応用例を示し，本研究の有効性を示す．

第 III 部

各方法の特性と応用

第 6 章

各方法の特性

6.1 序言

本研究では、眼鏡顔画像から顔そのものの個人性を損なうことなく、眼鏡なし顔画像を推定することを目的・目標にして、第 I 部では appearance ベースによる方法として基底ベクトルを用いる方法と非線形射影による方法について、第 II 部では model ベースによる方法としてパラメトリックな眼鏡フレームモデルを用いる方法と対称構造物体に収束する動的輪郭モデルについて述べた。

各章では各々の方法がどの程度目標を達成したのか、または、問題点や課題を個々に述べてきた。その結果、各方法の原パターンとの忠実性を類似度によって計量する基準を用いて評価したところ、目標を満足する結果が得られたと考えている。しかしながら、各方法には条件によって得意・不得意なシチュエーションが存在することも示した。本章では、これらの特性を個々に示すのではなく、互いに比較し、各方法をどのようなシチュエーションにおいて用いるのが適切かということを示す。

6.2 各方法での特性比較

第 I 部および第 II 部で述べた各方法について、実画像において起こり得る、いわゆる悪条件での推定特性を比較するため、以下の 8 つの項目に対する特性の比較を行う。

1. 眼鏡フレーム輪郭の途切れ
2. リムなし眼鏡への対応

3. 眼鏡フレームの影の影響
4. 眼鏡フレームと目領域の重なり
5. 眼鏡フレームの輝度値の影響
6. 顔画像の正規化
7. 顔の水平方向の回転
8. 眼鏡以外の遮蔽物体への対応

6.2.1 眼鏡フレーム輪郭の途切れ

- appearance ベースによる方法では、いずれも眼鏡フレーム輪郭の途切れは影響しない。
- model ベースによる方法のうち、パラメトリックな眼鏡フレームモデルを用いる方法では、プロップとリムの間で画像輪郭の途切れがあると、リムなし眼鏡として判定されてしまう。そのため、本来はリムを持つ眼鏡フレームに対してリムが抽出されず、正しく推定は行えない。
- Snakes を用いる方法は、眼鏡フレーム輪郭の途切れには影響しない。眼鏡フレーム輪郭に途切れがある場合も、画像輪郭上に停留している制御点の影響により、滑らかな曲線を保とうとする作用が働くことで顕著な抽出誤りを回避することができる。

6.2.2 リムなし眼鏡への対応

- appearance ベースによる方法では、いずれも眼鏡フレームのリムの有無は影響しない。
- model ベースによる方法のうち、パラメトリックな眼鏡フレームモデルを用いる方法では、眼鏡フレームにリムが含まれるかどうかをチェックする。そのため、リムなし眼鏡の場合には、リム以外の眼鏡フレーム領域を抽出することができる。
- Snakes を用いる方法では、眼鏡フレーム全体を包含するように収束するように設計している。また、制御点が画像輪郭上に停留している場合でも制御点間の距離が長くなる場合は、その画像輪郭は孤立したノイズと判断して停留することをやめて再

び収束し始める．このため，ブリッジ・プロップ領域およびエンドピース・テンプル領域に停留していた制御点が再び収束し始め，その結果 図 6.1 のように眼領域に収束してしまう場合がある．本手法では，眼鏡フレーム全体を包含するように Snakes を設計しているが，リムなし眼鏡の場合は別の Snakes に切り替えるような条件付けを行ったり，眼鏡フレームの各部分を抽出するような分裂する Snakes[77] を用いるなど，例外処理あるいは拡張をしないと正しく推定は行えない．

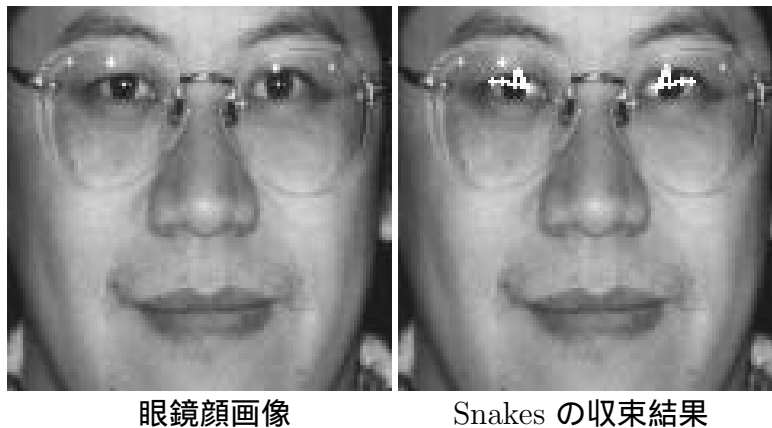


図 6.1: リムなし眼鏡の場合の Snakes の収束結果

6.2.3 眼鏡フレームの影の影響

- appearance ベースによる方法では，眼鏡なし顔には眼鏡フレームの影の特徴を含んでいないため，基底ベクトルにもそのような成分は含まれておらず，推定結果には影が現れることはない．影領域の輝度値は肌領域の輝度値と大きな相違はなく，眼鏡フレームのように広範囲に渡りマスクしないため，眼鏡なし顔画像推定を行う際にはほとんど影響しない．
- model ベースによる方法では，いずれも眼鏡フレームの影については考慮していないため，推定結果には眼鏡フレームの影がそのまま残ってしまう．影の成分が後の認識・識別処理に支障をきたす可能性が高いので，このような用途には model ベースによる方法は適していない．

6.2.4 眼鏡フレームと目領域の重なり

眼鏡フレームが目領域と重なっている場合の各方法による推定結果を図 6.2 に示す。

- appearance ベースによる方法では、基底ベクトル内に眼鏡フレームの特徴が含まれないため、目領域の輝度パターンを表現しようと作用する。そのため、ボケが見られるものの model ベースによる方法と比較して顔としての特徴は良く保存されている。非線形射影による方法は、眼鏡フレーム領域内の輝度値を置換した結果を入力とするので、入力画像の目領域の輝度パターンは本来の目領域の輝度パターンとは異なっているが、基底ベクトルに含まれる目領域の情報を基に、目領域の輝度パターンを比較的忠実に表現している。
- model ベースによる方法では、抽出した眼鏡フレームの周囲にある肌領域の輝度値を用いて補間するため、目としての輝度パターンの特徴が損なわれてしまい、眼鏡なし顔画像に対して忠実性が大きく損なわれている。



眼鏡なし顔画像（原画像）



眼鏡フレームが目領域と重なっている顔画像



基底ベクトルを用いて推定した
推定した結果



非線形射影により推定した結果



眼鏡フレームモデルを用いて
推定した結果



Snakes を用いて推定した結果

図 6.2: 眼鏡フレームが目領域と重なっている顔画像からの推定結果

6.2.5 眼鏡フレームの輝度値の影響

- appearance ベースによる方法である基底ベクトルを用いた眼鏡なし顔画像推定方法では、眼鏡フレームの輝度値が推定精度に影響することを第 4 章で示した。
- 上記以外の方法では、眼鏡フレーム領域の輝度値が肌領域の輝度値と大きく異なっている方がかえって画像輪郭を抽出しやすく、眼鏡フレーム領域を良好に抽出できる。眼鏡フレームの輝度値が肌領域の輝度値に近い場合も画像輪郭が抽出できる限り処理に支障はない。画像輪郭が抽出できない場合は眼鏡フレームの輝度パターンが肌領域の輝度パターンと同等になっており、後段の顔画像解析や処理（印象分析や表情顔画像の合成など）には支障はないと考えられる。

6.2.6 顔画像の正規化

model ベースによる方法であるパラメトリックな眼鏡フレームモデルおよび Snakes を用いる方法では model に基づいて自動的に位置を探索するので顔画像の正規化を要しないが、appearance ベースによる方法では、顔画像の正規化を要する。特に主成分分析では、仮に 1 画素分だけ上下左右にシフトした画像であっても、その元の画像とは異なったものとして扱われるため、位置ずれに対して脆弱である。ここでは appearance ベースによる方法だけについて示す。

図 6.3 に正規化誤りのある顔画像を用いた場合の appearance ベースによる推定結果を示す。 x および y 方向に最大で 1~7 画素ずらすような乱数を与え、正規化誤りのある顔画像を用いて基底ベクトルを求めて眼鏡なし顔画像を推定した。3 画素程度までならば顔の特徴が保存されているが、ずれがそれ以上になるとボケの度合いが大きくなったり、顔の特徴が失われてしまう。

以上より、正規化の誤差は少なくとも 3 画素以内に納めなければならない。

6 画素のずれの場合は、他の場合と比較して傾向が異なっている。比較として、眼鏡顔画像と、最大 6 画素のずれの場合および最大 7 画素のずれの場合の基底ベクトルとの内積値を図 6.4 に示す。最大 6 画素のずれの場合は、高次の主成分において高い内積値となっている。低次の基底ベクトルは顔の大まかな特徴を表すため輝度変化の少ない領域が大きく、高次の基底ベクトルは頬領域において輝度変化が大きくなる傾向にある。そのため、最大 6 画素のずれの場合では、頬領域の輝度変化の大きな推定結果になったと考えられる。図

6.5 に内積値の大きな基底ベクトルの例を示す．ただし，これは乱数系列の影響があると考えられ，数回の実験試行において，最大 6 画素のずれにおいても他の場合と同様な傾向を得られた．逆に，最大 5 画素以上のずれの場合において，ここで示した 6 画素のずれのように，頬領域の輝度変化が大きくなる場合があった．いずれにせよ，正規化の誤差は少なくとも 3 画素以内に納める必要があると言える．

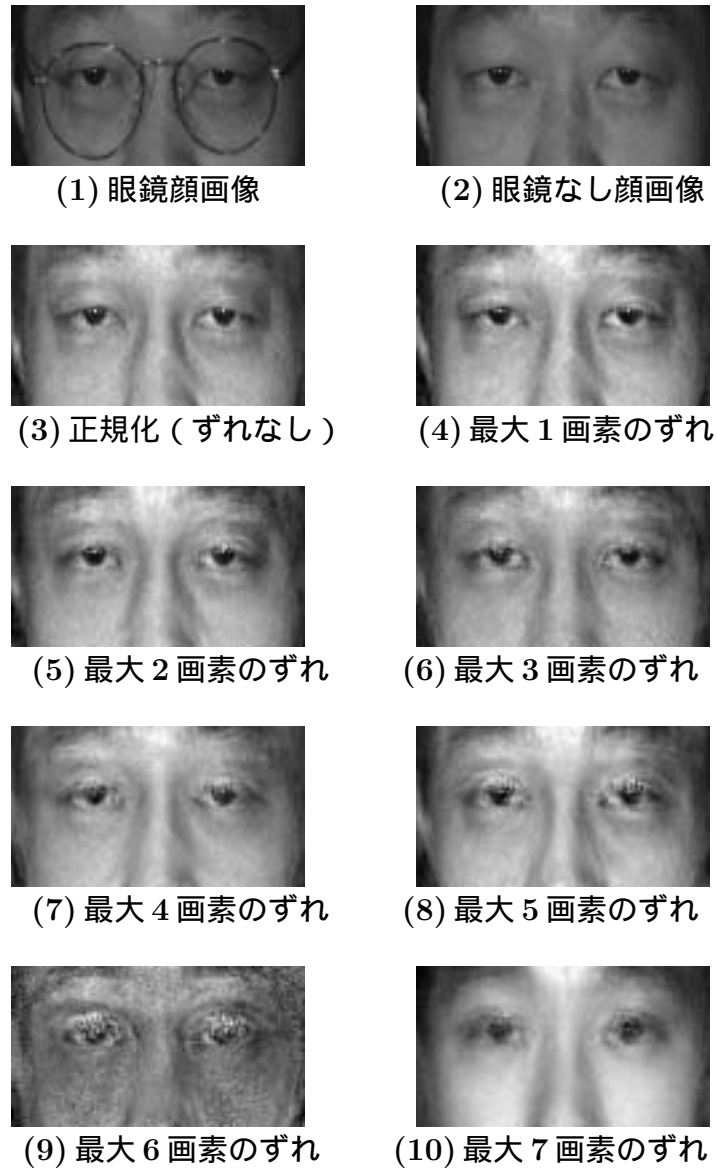


図 6.3: 正規化誤差を含む顔画像集合から求めた基底ベクトルによる推定結果

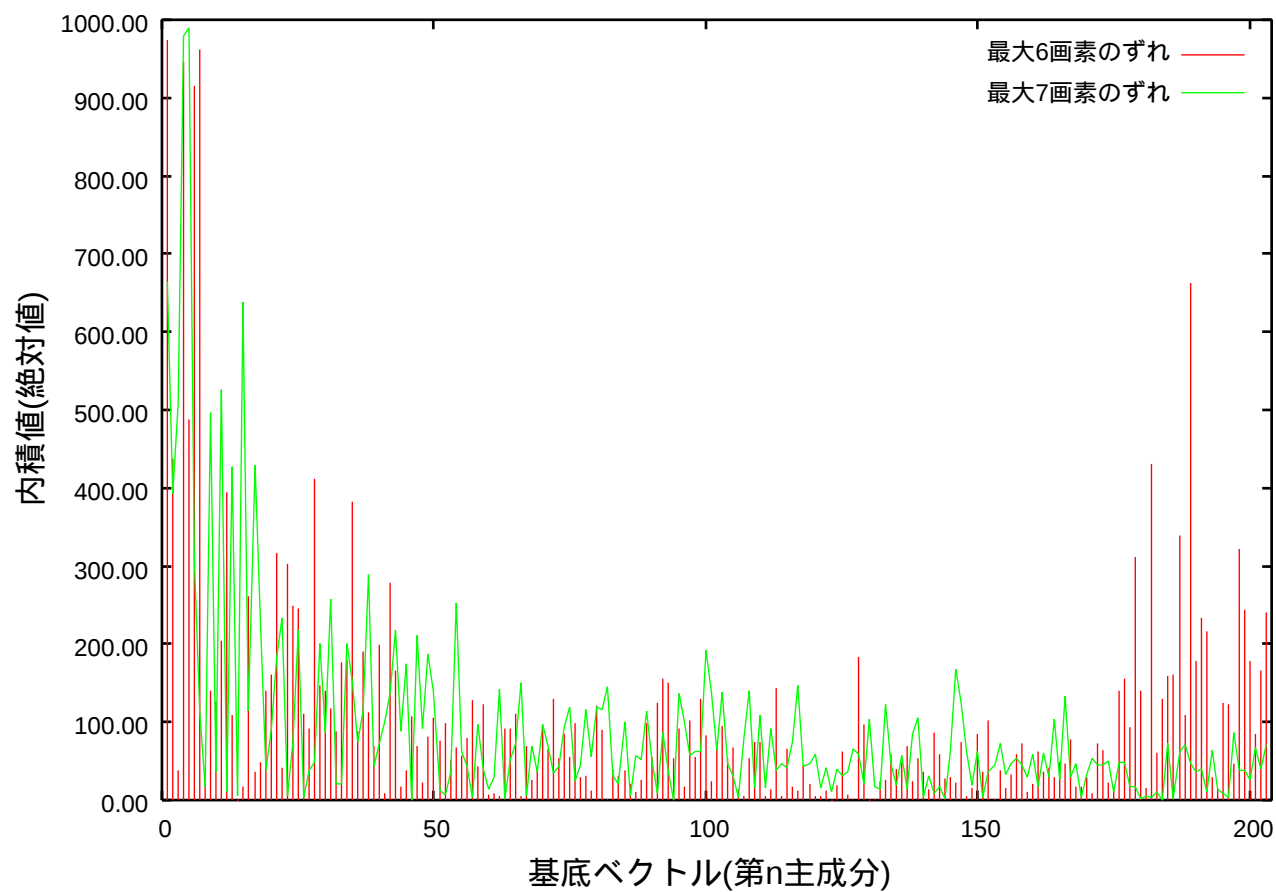


図 6.4: 眼鏡顔画像と基底ベクトルとの内積値の絶対値



図 6.5: 最大 6 画素のずれの場合における内積値の大きい基底ベクトルの例

6.2.7 顔の水平方向の回転

図 6.6 のように水平方向に顔が回転している場合は本研究の設定条件を大きく越えているが、実画像においてはよく起こり得ることなので、推定実験を試みた。



図 6.6: 水平方向に回転している眼鏡顔の画像の例

- appearance ベースによる方法において基底ベクトルを用いた場合の眼鏡なし顔画像推定の結果を図 6.7 に示す。PCA は、位置ずれに対して敏感であるため、顔画像の正規化を欠かすことはできない。顔の水平方向の回転により顔の縦横比と位置の正規化を施しても、顔部品に位置ずれが生じる。このため、良好な推定を行うことができない。図 6.8 に水平方向に 5 度回転した場合の顔画像に対する非線形射影による眼鏡なし顔画像推定結果を示す（10 度の場合は、眼鏡フレーム領域の抽出が良好に行うことができなかったため、ここでは 5 度の場合だけを示す）。また、表 6.1 に眼鏡なし顔画像に対する類似度を示す。非線形射影による方法では PCA による方法に比べて推定精度が改善されているものの、顔の回転により推定精度が低下していることが判る。精度良く推定を行うには、回転顔画像により基底ベクトルを求める必要があり、また、顔を 3 次元物体として扱うためにパラメトリック固有空間法 [87] などを適用して推定方法を拡張することが望まれる。
- model ベースによる方法において図 6.6 に対する眼鏡フレームモデルによる眼鏡フレーム領域の抽出結果を図 6.9 に示す。水平方向の回転角が 5 度の場合は向かって右側のエンドピースとテンプルの抽出が行われていないものの、他の部分は良好に抽

出されている．回転角が10度になると，眼鏡フレーム領域は抽出されなかった．これは，図6.10に示すように，低解像度輪郭画像において眼鏡の中央部分が対称構造となっていないことによるものと考えられる．顔が水平方向に回転することにより，パッドの見え方が変化し，その影響により眼鏡中央部分の対称性が失われている．カメラを注視するように指示する場合，顔の回転や傾きは1度程度に抑えられるという報告もあることから[30]，5度程度で眼鏡フレーム形状が良好に抽出できる眼鏡フレームモデルによる抽出方法は，ゲート入場時における認証などのように，カメラを意識して注視する場合には有効と言える．Snakesを用いた場合の眼鏡フレーム領域抽出例を図6.11に示す．回転角が5度の場合は，向かって左側のリム形状は良好に抽出できているが，右側のリム形状の誤差が大きくなっている．これは，顔の水平方向の回転により左右のリムの大きさが不均衡となったため，相対的に大きな形状となっている左側のリム形状でSnakes1が先に収束し，対称形状を保つために右側のSnakes2の収縮が停止したと考えられる．回転角が10度の場合も同様に右側のリム形状の誤差が大きく，5度の場合よりも大きくなっていることが判る．本Snakesは，正面顔を仮定しているため，制約条件を緩和するような拡張が望まれる．

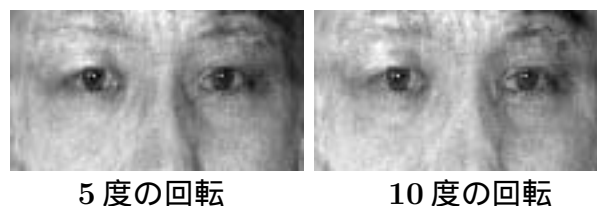


図 6.7: 水平方向に回転した眼鏡顔の画像に対する基底ベクトルを用いた眼鏡なし顔推定結果



図 6.8: 非線形射影による眼鏡なし顔推定結果（水平方向の回転角：5度）

表 6.1: 水平方向に回転した顔の画像からの推定結果の類似度

	類似度	
	回転角 5 度	回転角 10 度
PCA	0.519	0.374
非線形射影	0.588	-



図 6.9: 水平方向に回転した顔の画像に対する眼鏡フレームモデルによる眼鏡フレーム領域の抽出

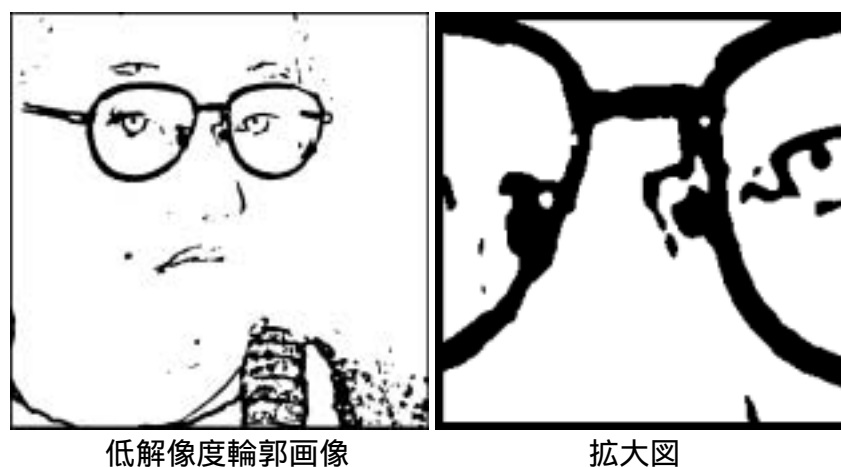


図 6.10: 回転角 10 度の場合の低解像度輪郭画像と眼鏡中央部の拡大図

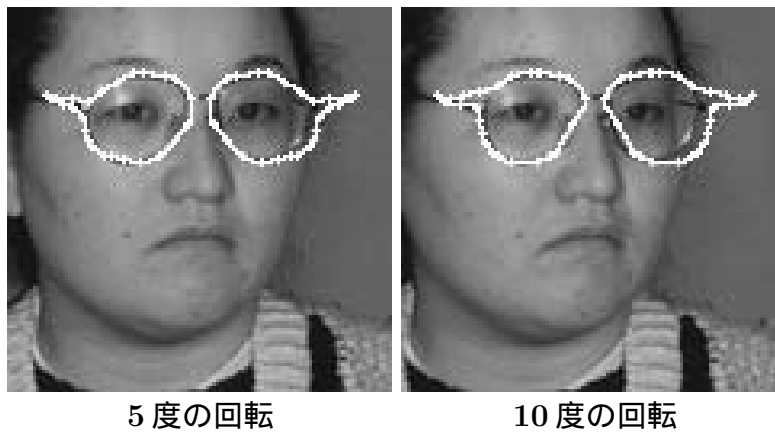


図 6.11: 水平方向に回転した眼鏡顔の画像に対する Snakes による眼鏡フレーム領域の抽出

6.2.8 眼鏡以外の遮蔽物体への対応

序論で示したように本研究の目的は、人の顔画像上にある不要領域を顔本来の個人性を損なうことなく除去することであり、これに該当する最も重要なものとして眼鏡を除去し、眼鏡なし顔画像を推定する方法を与えた。ただし、序論でも示した通り、個人性が多少失われても（個人性を定量化することはここでは論じない）眼鏡以外の不要領域の除去を望まれる場合もある。本項では、不要領域をより一般化し、眼鏡以外の顔画像に存在する不要領域の除去についていくつかの例を取り上げて検討を試みる。

まず、眼鏡以外の顔の不要領域の例として、顔画像に髭やほくろがある場合について検討を行う。これらは、個人性を有するので本研究ではこれまで不要領域とはしていなかったが、個人性が失われることを許容して除去したい場面が比較的多くありそうなので、本研究で提案した手法がこれらに対してどこまで適用できるか検討する。

model ベースの手法の場合、眼鏡フレーム形状のモデルを構築して推定に用いたので、眼鏡以外の髭などには対応は困難である（髭のモデルを作成するということも考えられるが、不要領域の種類毎にモデルを作成しなければならず、一般化という目的には適さない）。一方、appearance ベースの手法の場合、PCA は不要領域の存在しない顔画像により基底を算出し、この基底により不要領域によって遮蔽された顔画像から、顔画像そのものを抽出、推定する手法であるから、不要領域の種類、形状、位置を限定する必要はない。ただし、不要領域の面積や輝度値の分散が大きいと、PCA の主成分として上位の成分となり、これを除去する操作は画像の重要な成分を失うことになり、ボケや歪みなどが大きく発生

することは避けられない．ここでは，下半分顔画像集合について PCA により算出した基底ベクトルを用い，髭を含む顔画像を入力して髭のない顔画像の推定を試みた．結果を図 6.12 に示す．

推定結果を見ると，口髭と顎髭のある場合では顎の部分に大きなボケが生じている．これは，髭の面積が顔領域全体に対してかなり大きな部分を占めているので，先に述べた理由により，ボケが生じたものと考えられる．比較のため口髭だけの場合の推定結果（図 6.13）を見ると，ボケがほとんどない良好な推定が行えている．どれだけの面積の髭に適用できるか特性を議論する必要がある．今後の課題と考えている．

ただし，髭については別の問題もある．それは，顎髭の場合，顔そのものの輪郭を正確に計れないので，appearance ベースによる方法のウイークポイントである正規化が難しいため，正規化誤差によって推定画像に大きな歪みが生じることである．これは避けられない問題であり，appearance ベースの手法における不要領域の一般化の限界といえよう．

次に，ほくろについて考える（図 6.14）．基底ベクトル u_{j_1} , u_{j_2} を用いて推定した場合には，推定結果にほくろが現れている．一方， u_{j_3} の場合は，ほくろのない顔画像が推定されている．これは，基底ベクトルの算出に本人の顔画像が含まれていなければほくろが除去できることを意味している．ただし，本人の顔画像が含まれていなくても，同じ位置にたまたまほくろのある人がいて，これを含めて基底ベクトルを算出した場合にはほくろは残ってしまう．したがって，ほくろを除去したいという目的の場合には，ほくろが全くない人の顔画像を集めて基底を算出すればよい．髭の場合とは異なり，ほくろの領域は小さいので，PCA による推定の限界，正規化の限界などの影響が小さいので，本研究の手法は有効な不要領域除去が行える．

ここまでは，髭やほくろといった顔固有のオブジェクトを不要領域とみなして，不要領域の一般化と本研究の適用について例を挙げながら述べてきた．さらに一般性を高めるために，顔とは関係のないオブジェクトに対して本研究の手法の適用を試みる．ただし，前述のように model ベースの手法はモデルの適用範囲が狭く，一般化への議論には適さないので appearance ベースの手法についてだけ示す．

図 6.15 に原画像，ノイズを付加した画像，ノイズを除去した推定結果を示す．ノイズは， $rand$ を標準正規分布 $N(0, 1)$ にしたガウシアン乱数を表すとして，

$$I'(x, y) = I(x, y) + 255 \cdot rand \bmod 30 \quad (6.1)$$



口髭と顎髭のある顔画像



推定結果

図 6.12: 口髭と顎髭のある顔画像からの推定結果



口髭のある顔画像



推定結果

図 6.13: 口髭のある顔画像からの推定結果



m_3



$\hat{n}_3|m_3, u_{j_1}$



$\hat{n}_3|m_3, u_{j_2}$



$\hat{n}_3|m_3, u_{j_3}$

図 6.14: ほくろのある顔画像からの推定結果

のように -29 から 29 までの値をとるものとした．ここで， $I(x, y)$ は原画像の座標 (x, y) における輝度値， $I'(x, y)$ はノイズを付加した後の輝度値とする．model ベースによる方法ではノイズ領域は抽出できないので，PCA による方法だけ示す．

推定結果は，主観的に忠実度の高い顔画像となり，精度よく推定ができています．また，推定結果と原画像との類似度を表 6.2 に示す．いずれも 0.900 を越える高い類似度が得られた．ノイズ量を変えて実験をする必要があるが，本論文で示した程度のノイズ量であれば，先に示した PCA の限界の影響はほとんど問題とはならないようである．

最後に，フィルムの傷やテロップの一部により顔が遮蔽されたと仮定し，頬・鼻・目の各領域が矩形領域により遮蔽された場合について示す．

図 6.16, 6.17, 6.18 に原画像，頬・鼻・目の各領域が遮蔽された顔画像，推定結果を示す．なお，遮蔽領域はいずれも 20×20 画素である．比較的良好な推定ができていますが，遮蔽領域の影響が残っており，輝度が高くなっている部分がある．頬や鼻の部分は，照明の反射が起きやすい部分なので，これらの部分の輝度が高くなっても違和感はほとんどない．一方，目が遮蔽された場合の推定結果は，目の輪郭形状は比較的良好に推定できているが，輝度が高くなっているため，違和感のある顔画像となっている．

PCA による推定方法は，不要領域の種類，形状，位置を問わない優れた方法であるが，4 章でも示したように，不要領域の輝度値の影響を受けるため，対象とする不要領域を一般化することはできるものの推定精度は不要領域の輝度値に依存する．

各推定結果と原画像との類似度を表 6.3 に示す．PCA による方法は，基底ベクトルを求める画像集合内に原画像を含んでいる場合は，0.900 を越える高い類似度が得られている．ただし，目が遮蔽されている場合は，推定結果では輝度変化が大きくなっており，他の領域に比べて類似度が低下している．

ところで，model ベースの手法は不要領域の形状毎にモデルが必要なことから一般化の議論では不適としてきた．仮定として，形状と位置が与えられるものとする．model ベースの手法でも眼鏡以外の不要領域に適用できる可能性がある．先に示した矩形領域による遮蔽の場合を例にとり，model ベースの手法により推定を試みた結果を図 6.16, 6.17, 6.18 に示す．ただし，model ベースによる推定方法は，model ベース単独によるものと，appearance ベースの手法と組み合わせた非線形写像によるものとがあるので，これらによる推定結果および比較のために PCA による推定結果を図示する．model ベースによる方法では，頬

のように輝度変化が滑らかな場合には輝度補間が容易なため良好に推定できているが、陰影や輝度変化の大きな鼻や目の部分では推定誤差が大きくなっている。また、非線形写像による推定方法では、先の眼鏡顔での検討結果と同様に、PCA による推定方法よりも良好な結果が得られた。このように、遮蔽領域の形状や特徴情報が与えられれば、model ベースの手法も適用できるようになり、より一般的な不要領域への適用が可能となる（ただし、複雑な形状特徴を有する不要領域でモデルが構築できない場合は適用できない）。

PCA や非線形射影による方法は、画像集合内に原画像を含んでいる場合には非常に良好に原画像の推定を行うことができるが、実際にはこのようなシチュエーションはごくまれである。一方、撮影条件が異なっているものの、本人の顔画像を含めることは十分可能であり、本研究では顔画像集合 F_2 がこれに相当する。主観的な観察、類似度による評価ともに、顔画像集合 F_2 から求めた基底ベクトルを用いた場合は、比較的良好に推定ができている。また、不要領域がどのようなものであるかは問わない。このことから、本研究で提案した appearance ベースによる推定方法は実用的であると言える（繰り返すが、顔画像の正規化を行う必要があること、さらに非線形射影では不要領域の抽出と除去が実行できることを忘れてはならない）。

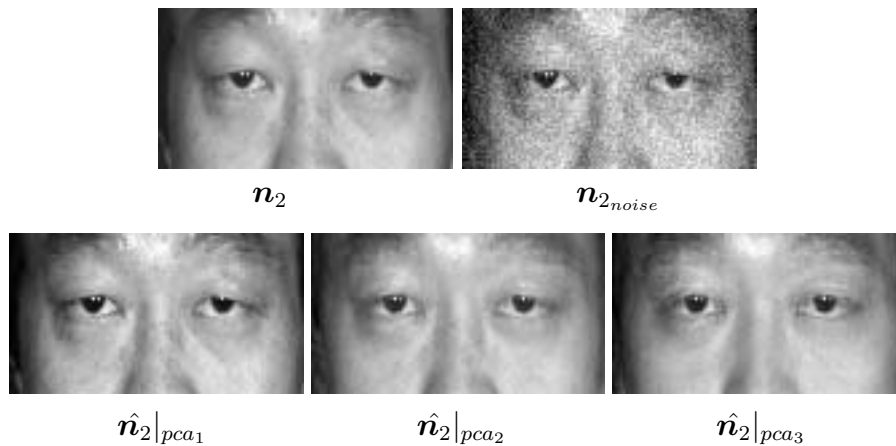


図 6.15: ノイズが付加された顔画像からの原画像推定結果

表 6.2: ノイズが付加された顔画像からの PCA による推定結果と原画像の類似度

推定方法	不要領域	ノイズ
pca_1		0.997
pca_2		0.966
pca_3		0.952

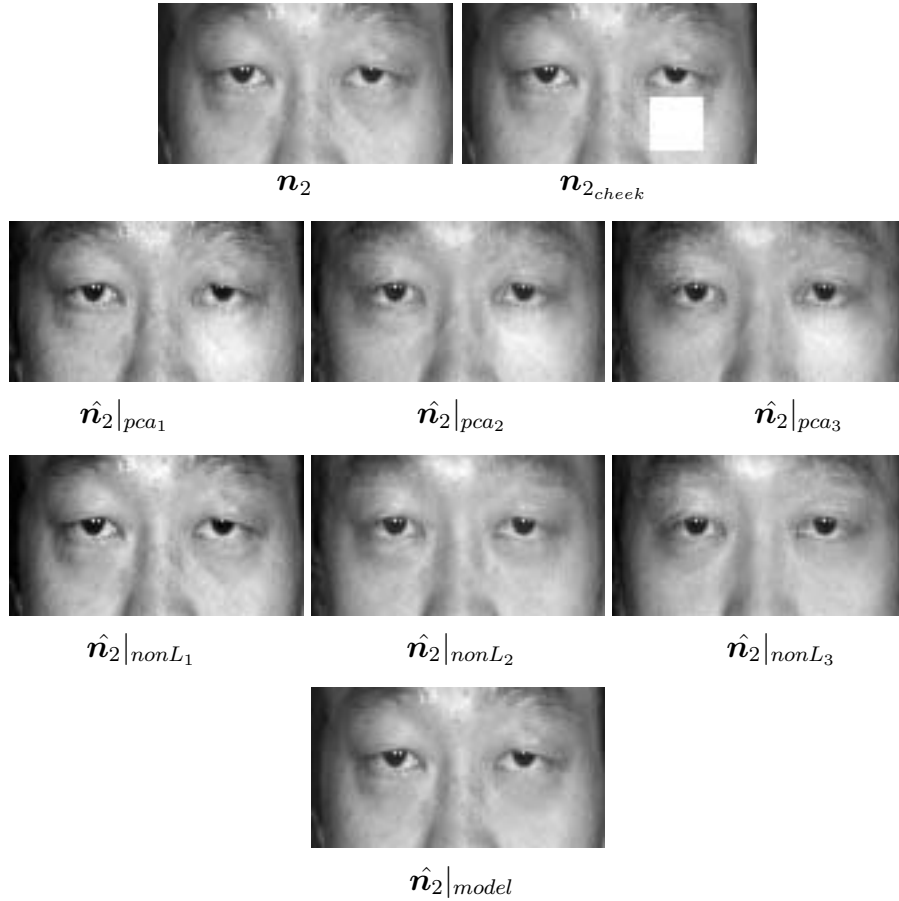


図 6.16: 矩形領域により頬が遮蔽された顔画像からの原画像推定結果 ($\hat{n}|_{pca_k}$: PCA による推定結果, $\hat{n}|_{nonL_k}$: 非線形射影による推定結果, $\hat{n}|_{model}$: model ベースによる推定結果)

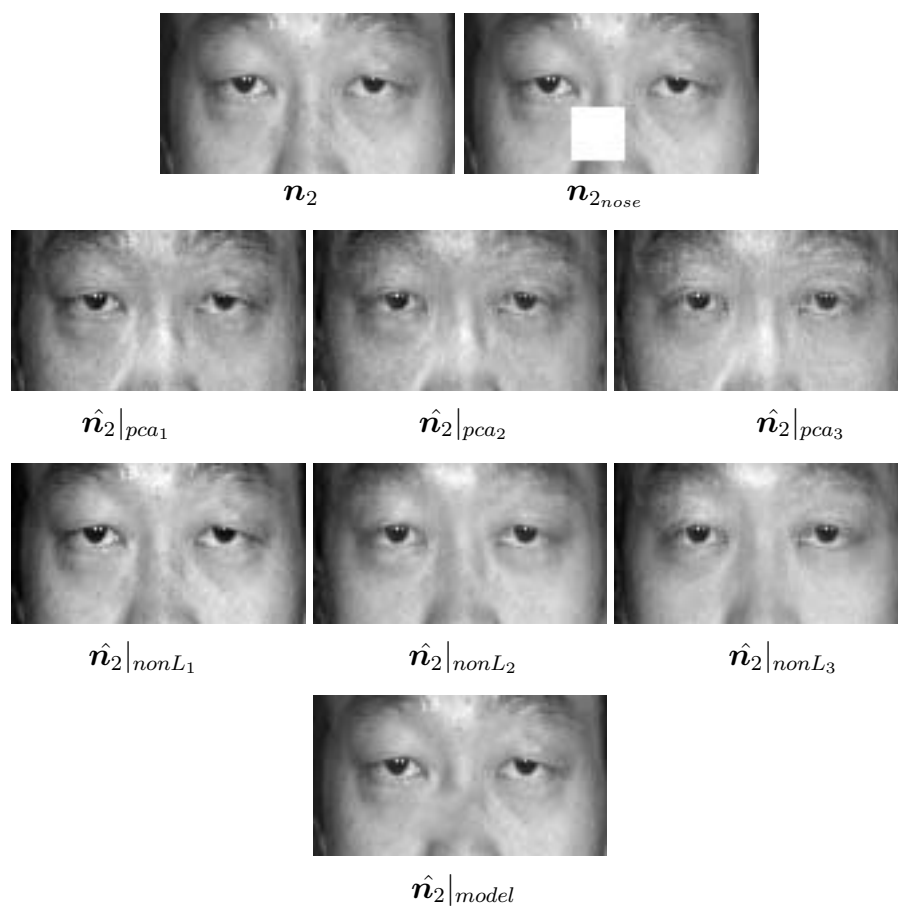


図 6.17: 矩形領域により鼻が遮蔽された顔画像からの原画像推定結果 ($\hat{n}|_{pca_k}$: PCA による推定結果, $\hat{n}|_{nonL_k}$: 非線形射影による推定結果, $\hat{n}|_{model}$: model ベースによる推定結果)

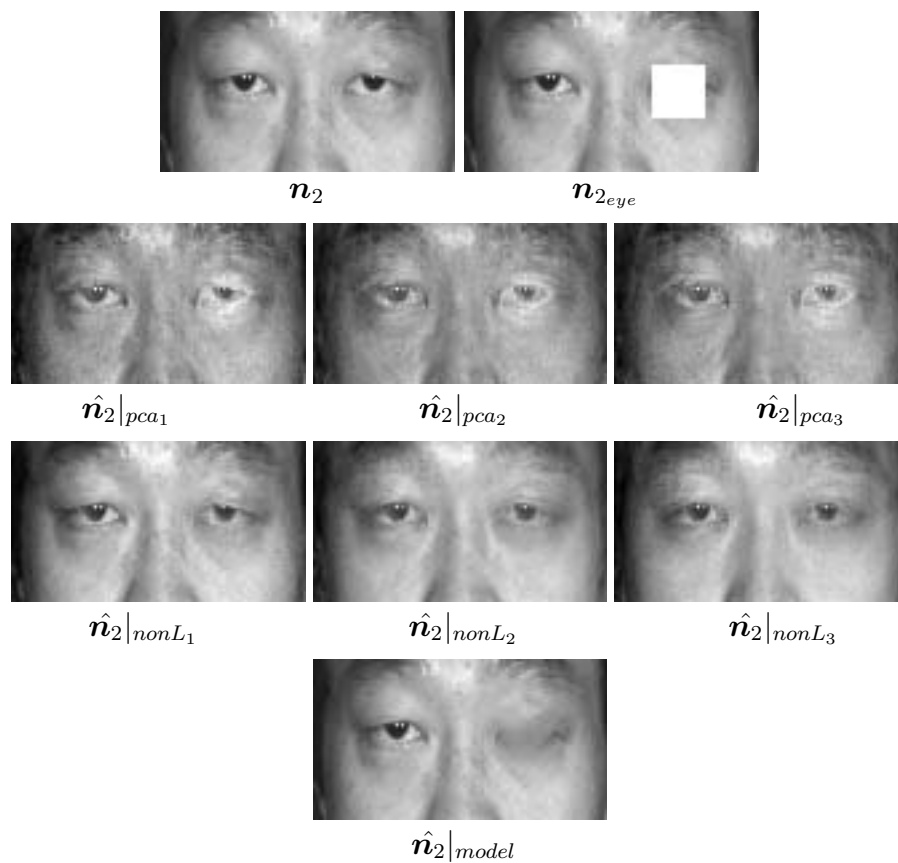


図 6.18: 矩形領域により目が遮蔽された顔画像からの原画像推定結果 ($\hat{n}|_{pca_k}$: PCA による推定結果, $\hat{n}|_{nonL_k}$: 非線形射影による推定結果, $\hat{n}|_{model}$: model ベースによる推定結果)

表 6.3: 頬・鼻・目が矩形領域に遮蔽された顔画像からの推定結果と原画像の類似度 (pca_k : PCA による推定結果, $nonL_k$: 非線形射影による推定結果, $model$: model ベースによる推定結果)

推定方法 \ 遮蔽領域	頬	鼻	目
pca_1	0.965	0.913	0.783
pca_2	0.935	0.882	0.752
pca_3	0.923	0.868	0.739
$nonL_1$	1.000	0.996	0.986
$nonL_2$	0.968	0.965	0.956
$nonL_3$	0.955	0.951	0.872
$model$	0.998	0.970	0.963

対象とする不要領域の一般化について、本項の結論を以下にまとめる。

- appearance ベースによる方法

- * 基底ベクトルを用いる方法は、不要領域の種類、形状、位置を限定する必要がないため、対象とする不要領域を一般化できる。ただし、
 - * 不要領域により顔画像の正規化が邪魔される場合がある。
 - * 不要領域の大きさや輝度値に影響を受ける。

ということに注意が必要である。

- * 非線形射影による方法は、不要領域を抽出・補間する必要があるため、対象とする不要領域の一般化をすることはできない。ただし、顔画像の正規化が実行でき、不要領域が抽出できるという条件が満たされた場合に限り、輝度値の補間を行うことで不要領域の輝度値の影響を低減でき、良好な推定が行える。

- model ベースによる方法

- * model ベースによる方法は、個々の不要領域毎にモデルを作成しなければならないので、対象とする不要領域を一般化することはできない。また、目の領域が

遮蔽された場合の推定結果に示したように，仮に不要領域が抽出できたとしても，複雑な原パターンを良好に推定することは難しい．したがって，model ベースによる方法の場合は，

- * 個々の不要領域毎にモデルを作成しなければならない．

というモデルそのものの一般化が困難なことに加え，さらに，

- * 複雑な原パターンを推定しなければならない．

という補間の困難さもあるため，対象とする不要領域を一般化することはできない．

6.3 各方法の用途

各方法がどのようなシチュエーションにおいて用いるのが適切かということについて考察する．

- appearance ベースによる方法によって眼鏡なし顔画像を推定した結果は，照明による高輝度領域や眼鏡フレームの影を含まず，忠実な眼鏡なし顔画像になる（ここでは眼鏡を付けずに撮影した同じ人物の顔画像を正解とし，これに対する忠実性のことを指す）．さらに，眼鏡フレームが目領域と近接または重なっている場合にも眼鏡なし顔画像を推定することができる．したがって，appearance ベースによる方法は，顔画像推定結果の忠実性が重要な場面に有効である．ただし，十分な精度の正規化が不可欠であるので，これが許容される場合に限られる．適用例として，顔画像の人物の表情を評価する心理実験やアミューズメントなど，眼鏡なし顔画像推定結果を直接的に用いる場合が挙げられる．また，顔画像解析方法が appearance ベースの場合には有効であろう．
- model ベースによる方法では，顔画像の正規化を要しないため，広範囲な用途に有効である．ただし，肌の輝度値の補間の難しさから，推定結果は主観的に若干の非忠実性があり，また，眼鏡フレームの影についてはそのまま残る．これは，後段の顔画像解析や処理において，推定結果の主観的な非忠実性が支障にならない場合がある．例えば，顔部品領域分割においては，目，鼻，眉などの領域が他の顔部品領域と融合しなければ良い．眼鏡フレームが重ならない領域は原画像から輝度値が変化しないので，顔部品領域に眼鏡フレームが重ならない限り，領域を正しく抽出できる．このように，目的達成の中間時点で推定結果の主観的な忠実性がさほど重要ではない場合では，model ベースによる方法を用いることが有効であろう．また，model ベースによる方法は，眼鏡フレーム領域を抽出するので，顔画像への眼鏡フレーム領域の合成や眼鏡フレーム領域内の輝度変換なども行える（眼鏡フレーム領域の合成については次章で述べる）．また，パラメトリックな眼鏡フレームモデルを用いる方法は，リムの有無に左右されず，動的輪郭モデルを用いる方法は，眼鏡がリムを持つ場合に有効である．

6.4 結言

本章では，第 I 部および第 II 部で述べた眼鏡なし顔画像の推定方法の各々の特性について互いに比較して述べた．本章で論じた事項についてまとめたものを表 6.4 に示す．

表 6.4: 眼鏡フレームの状態・制約条件に対する各方法の特性（○：対応，　：一部対応，×：非対応）

項目 \ 方法	PCA	非線形射影	眼鏡フレームモデル	Snakes
眼鏡フレーム輪郭線の途切れ	○	○	（鏡像を加味）	○
リムなし眼鏡への対応	○	○	○	×
眼鏡フレームの影の影響	○	○	×	×
眼鏡フレームと目領域の重なり	○	○	×	×
眼鏡フレームの輝度値の影響	×	○	○	○
顔画像の正規化不要	×	×	○	○
顔の水平方向の回転	×	×	×	×
眼鏡以外の遮蔽物体への対応	○	×	×	×

また，各方法の特徴から，どのようなシチュエーションにおいて用いるのが適切かということについて考察した．

appearance ベースによる方法

- 正規化が良好に実行可能な場合
- 推定結果が主観的に忠実な眼鏡なし顔画像になることが必要な場合
- 後段の顔画像解析方法が appearance ベースの場合
- 眼鏡フレームが目領域と近接または重なっている場合

model ベースによる方法

- 正規化が許容されない場合
- 後段の顔画像解析や処理において，目的達成の中間時点で推定結果の主観的な忠実性がさほど重要ではない場合

- 後の処理において眼鏡フレーム形状を用いる場合

appearance ベースによる方法では、顔画像正規化を要するという制約があり、model ベースによる方法では、肌の輝度値の補間に限界がある。どちらの方法を用いるのが適切かは、適用する場面の条件に委ねられる。

次章では、眼鏡なし顔画像推定の応用例を示す。

第 7 章

眼鏡なし顔画像推定の応用例

7.1 序言

ここまでに述べてきた眼鏡なし顔画像推定方法の応用例について述べる．ここではその例として，表情眼鏡顔画像の合成，顔部品抽出（目領域の抽出），顔画像を用いた個人識別について示す．

7.2 表情眼鏡顔画像の合成

無表情顔画像から表情顔画像を合成する方法に，ワイヤースケルトンモデルを用いた合成方法がある [13, 14]．ワイヤースケルトンモデルは，多数の三角形パッチから構成されている．このモデルの特徴点を顔画像内の顔の特徴点と一致させ，モデル上の各特徴点を移動させる．このとき，各頂点の移動によりモデル内の各三角形パッチが変形する．この三角形パッチの変形に伴い，顔画像のテクスチャを変化させることで表情を合成することができる．

7.2.1 眼鏡顔画像を入力とした場合の表情眼鏡顔画像の合成

図 7.1 に示すように，眼鏡顔画像から直接的に表情顔画像を作成すると，剛体であり本来変形しないはずの眼鏡フレームが表情変化に伴い変形し，違和感がある．



図 7.1: 眼鏡顔画像から直接的に合成した表情眼鏡顔画像

7.2.2 眼鏡フレーム処理による忠実な表情眼鏡顔画像の合成

眼鏡顔画像から直接的に表情眼鏡顔画像を合成すると，眼鏡フレームが変形する．この問題を回避するため，眼鏡フレーム領域をあらかじめ抽出および除去しておき，その結果を用いて表情顔画像を合成する．抽出しておいた眼鏡フレーム領域内の輝度値により合成した表情顔画像内の対応する画素の輝度値を置換することで表情眼鏡顔画像を獲得する．合成した表情眼鏡顔画像を図 7.2, 7.3 に示す．

Snakes を用いた場合は，眼鏡フレーム領域除去結果では，眉間の周辺において補間が良好に行われておらず，低輝度領域が現れている．眼鏡フレーム領域除去結果を用いて表情を合成した表情顔画像においても，その影響が残っている．しかしながら，眼鏡フレーム領域を付加するとき，その影響は眼鏡フレーム領域の輝度値により置換されるために最終的な結果には現れていない．

表情眼鏡顔画像の合成は，眼鏡フレーム領域をあらかじめ抽出することではじめて実現できる．したがって，眼鏡の影響を回避して顔部品抽出を行う研究 [34, 100, 101] ではこの問題には対応できないと考えられる．同様に，眼鏡フレーム領域を抽出していない appearance ベースによる眼鏡なし顔画像の推定は，このような場面で応用することはできない．顔画像内の眼鏡フレーム領域だけを抽出するような appearance ベースによる方法ができるならば表情眼鏡顔画像の合成へ応用できる．しかしながら，眼鏡フレームの形状は多様であるために，少なくとも位置ずれに対して弱い基底ベクトルを用いる方法においてはその実現は困難であると考えられる．

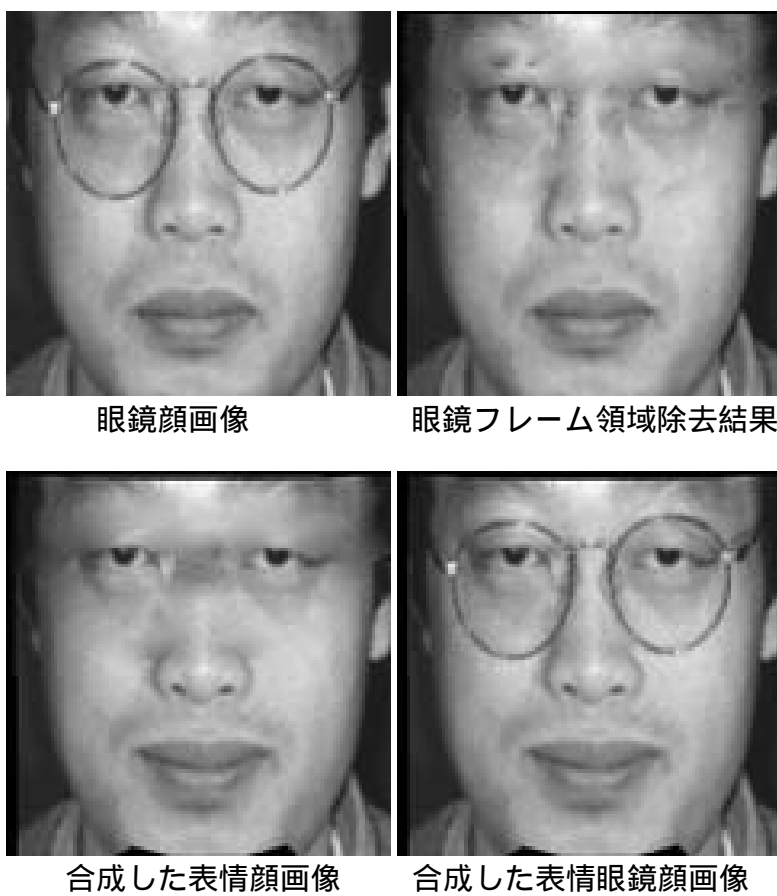


図 7.2: 表情眼鏡顔画像の合成 (眼鏡フレームモデルを使用)



眼鏡顔画像

眼鏡フレーム領域除去結果



合成した表情顔画像

合成した表情眼鏡顔画像

図 7.3: 表情眼鏡顔画像の合成 (Snakes を使用)

7.3 顔部品抽出（目領域の抽出）

目領域を抽出することは，例えば，遠隔コミュニケーションにおける視線一致を行う際や，目形状を用いた個人識別や表情識別に必要となる [102, 103, 104] ．

本節では，フラクタル次元値 [105] に基づいた画像分割法（フラクタル分析法）により眼鏡顔画像内の顔部品領域を分割し，目領域を抽出する [35] ．この方法は，画像の輝度値によって形成される濃淡面の複雑さを表すフラクタル次元値に基づいて画像の領域分割を行う．

7.3.1 フラクタル次元値

Peleg らによって提案された Covering-Blanket 法によりフラクタル次元値を求める [106, 107, 108] ．スケール s の変化に対する画像の濃淡面の変化 $A(s)$ を求め，次式によりフラクタル次元 D_{fct} を求める．

$$D_{fct} = 2 - \frac{\log A(s)}{\log s} n \quad (7.1)$$

濃淡面の変化 $A(s)$ は，入力画像の輝度値 $I(x, y)$ から $2s$ 離れた上・下の濃淡面の最大値で置換する操作 U_s と，最小値で置換する操作 L_s ($s = 1, 2, \dots$) により以下のように求められる．

$$A(s) = \frac{1}{2s} \sum_{y=0}^Y \sum_{x=0}^X [U_s(x, y) - L_s(x, y)] \quad (7.2)$$

$$U_s(x, y) = \max \left[U_{s-1}(x, y) + 1, \max_{|(i,j)-(x,y)|=1} \{ U_{s-1}(i, j) \} \right] \quad (7.3)$$

$$L_s(x, y) = \min \left[L_{s-1}(x, y) - 1, \min_{|(i,j)-(x,y)|=1} \{ L_{s-1}(i, j) \} \right] \quad (7.4)$$

$$U_0(x, y) = L_0(x, y) = I(x, y) \quad (7.5)$$

ここで，画素 (i, j) は (x, y) の4近傍画素， X と Y は画像の横と縦の大きさを示す．

隣接するブロックの持つ D_{fct} が閾値 Th_c 以下の場合は，各ブロックを統合する．統合後のブロックのフラクタル次元値を次式により求め，ブロック統合処理を続ける．

$$D_{fct}(x, y) = \frac{1}{2} \{ D_{fct}(x, y) + D_{fct}(x + i, y + j) \} \quad (7.6)$$

7.3.2 眼鏡顔画像に対するフラクタル分析結果

眼鏡顔画像に対するフラクタル分析結果を図 7.4 に示す．眼鏡フレームの影響により，目，鼻，顔の輪郭などの領域が融合していることが判る．このため，このままでは目領域を抽出することは困難である．

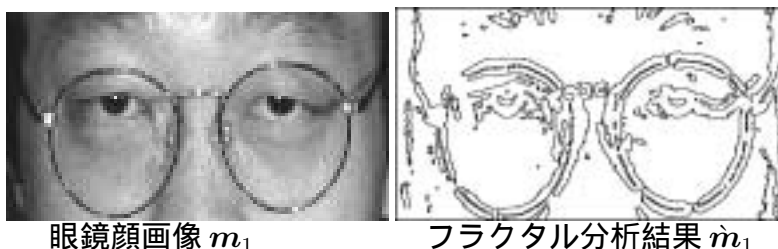


図 7.4: 眼鏡顔画像とフラクタル分析結果

7.3.3 眼鏡なし顔画像推定結果に対するフラクタル分析結果および目領域抽出結果

眼鏡なし顔画像推定結果を図 7.5 に示す．ここで， $\hat{n}_1|_{model}$ と $\hat{n}_1|_{snakes}$ はパラメトリック眼鏡フレームモデルを用いた推定結果と Snakes を用いた推定結果を示す．そして，図 7.5 に対するフラクタル分析結果 $\hat{m}$ を図 7.6 に示す．眼鏡フレーム領域の影響を受けないために，目，鼻，顔の輪郭などの領域が互いに融合することなく良好に分離されている．推定結果 $\hat{n}_1|_{m_1, u_{j_3}}$ には目領域にボケが現れているが，それは領域分割において影響していない．

フラクタル次元値の大きい上位 2 位の領域について，その領域を囲む矩形領域 eye_k を原画像（眼鏡顔画像）に重ねて表示したものを図 7.7 に示す．基底ベクトル u_{j_3} を用いた推定結果に対する目領域抽出結果 $m_1|_{eye_{pca_3}}$ では， y 方向に 4 画素広く抽出しているが，これは，眼鏡なし顔画像推定における目蓋領域のボケの影響によるものと考えられる．非線形射影による推定結果に対する目領域抽出結果についても同様な傾向が見られる．また，パラメトリック眼鏡フレームモデルおよび対称構造物体に収束する Snakes を用いた場合は，左目（向かって右側の目）の目尻方向に 4～9 画素広く抽出しているが，これは眼鏡フレームの影の影響によるものと考えられる．フラクタル分析の場合，画像の濃淡面の複雑さとしてフラクタル次元を求めるため，滑らかな肌の輝度パターンを推定する必要があると考えられる．このことから，目領域を広く抽出した場合の推定結果をフラクタル分析に適用

するためには，肌の輝度パターンをより高精度に推定する必要がある．このように，改善の余地があるものの，目領域を包含する領域が抽出されていることから，フラクタル分析を行う際に眼鏡なし顔画像推定結果を用いることは有効であると言える．

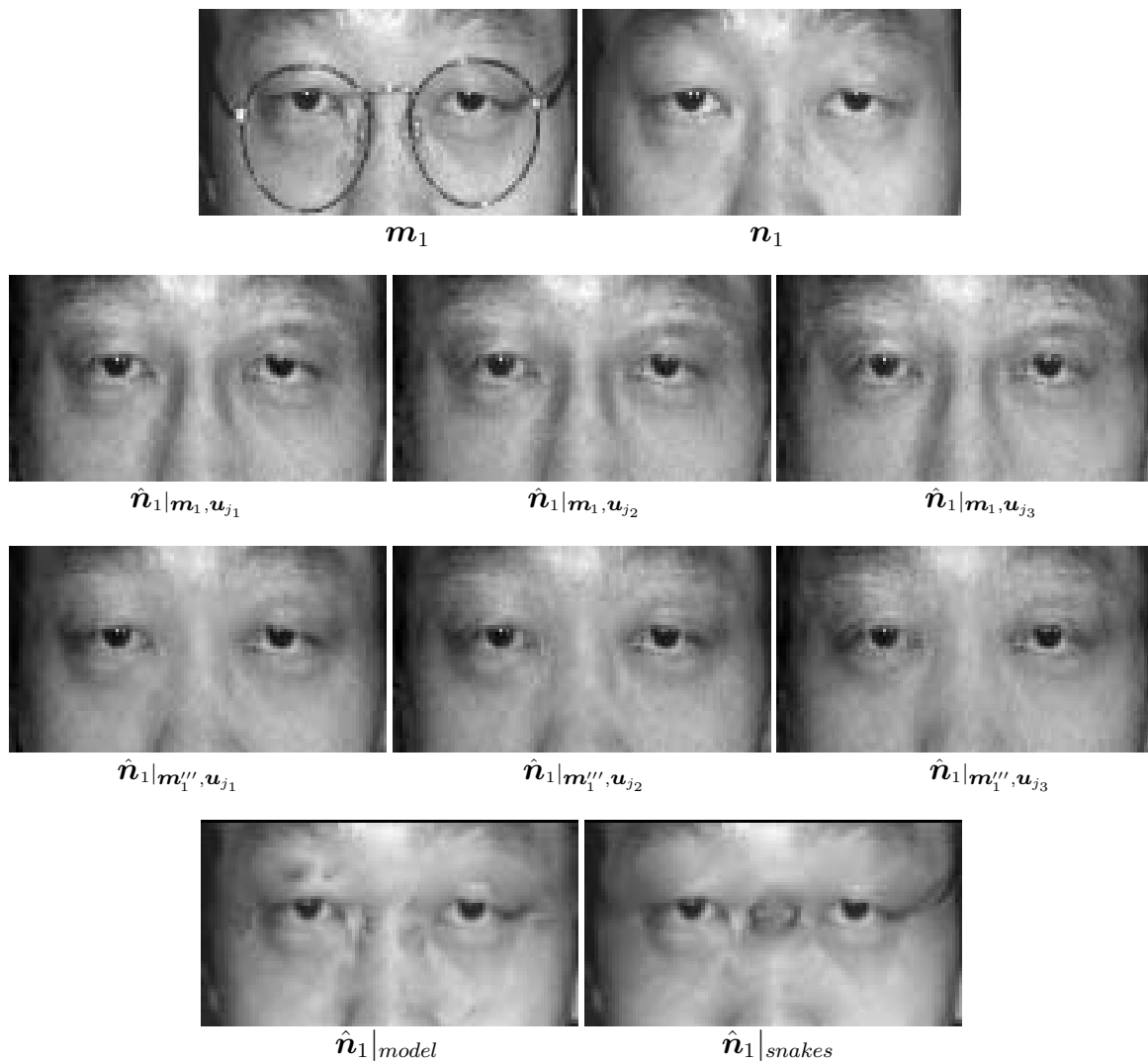


図 7.5: 眼鏡なし顔画像推定結果

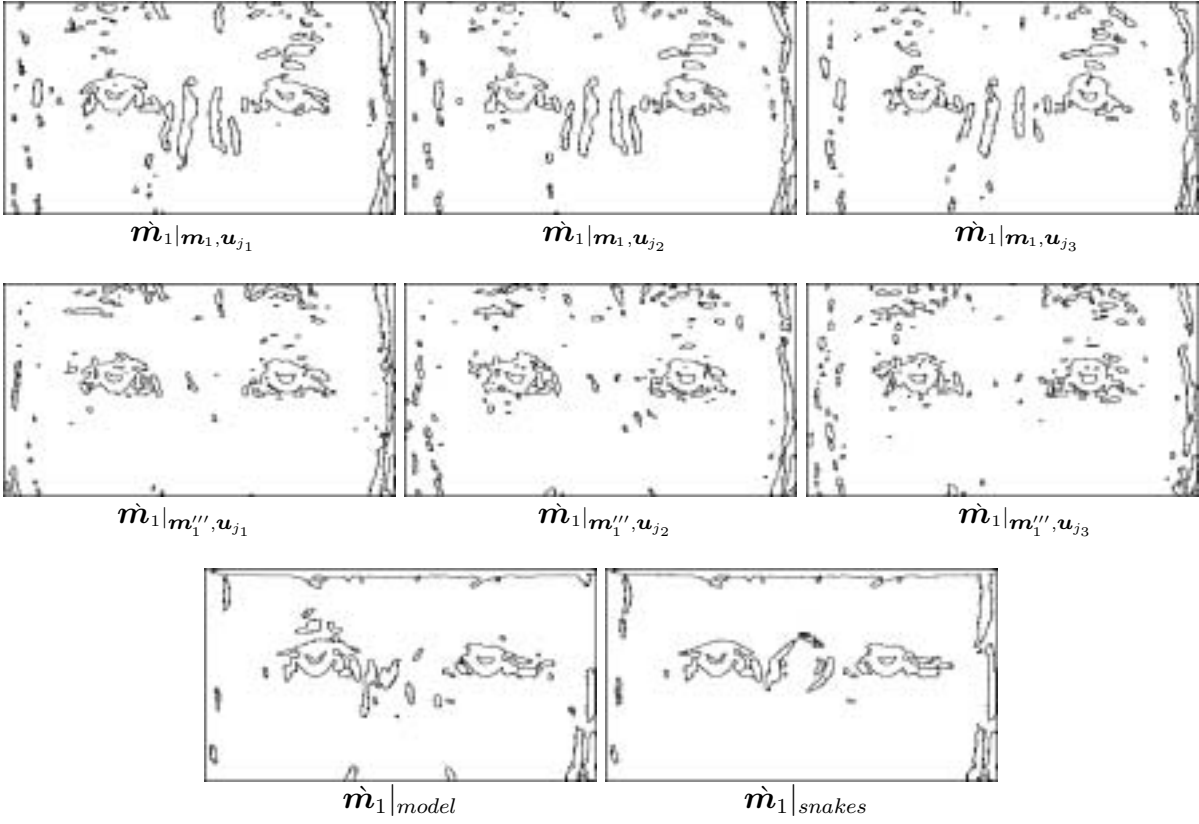


図 7.6: 眼鏡なし顔画像推定結果に対するフラクタル分析結果

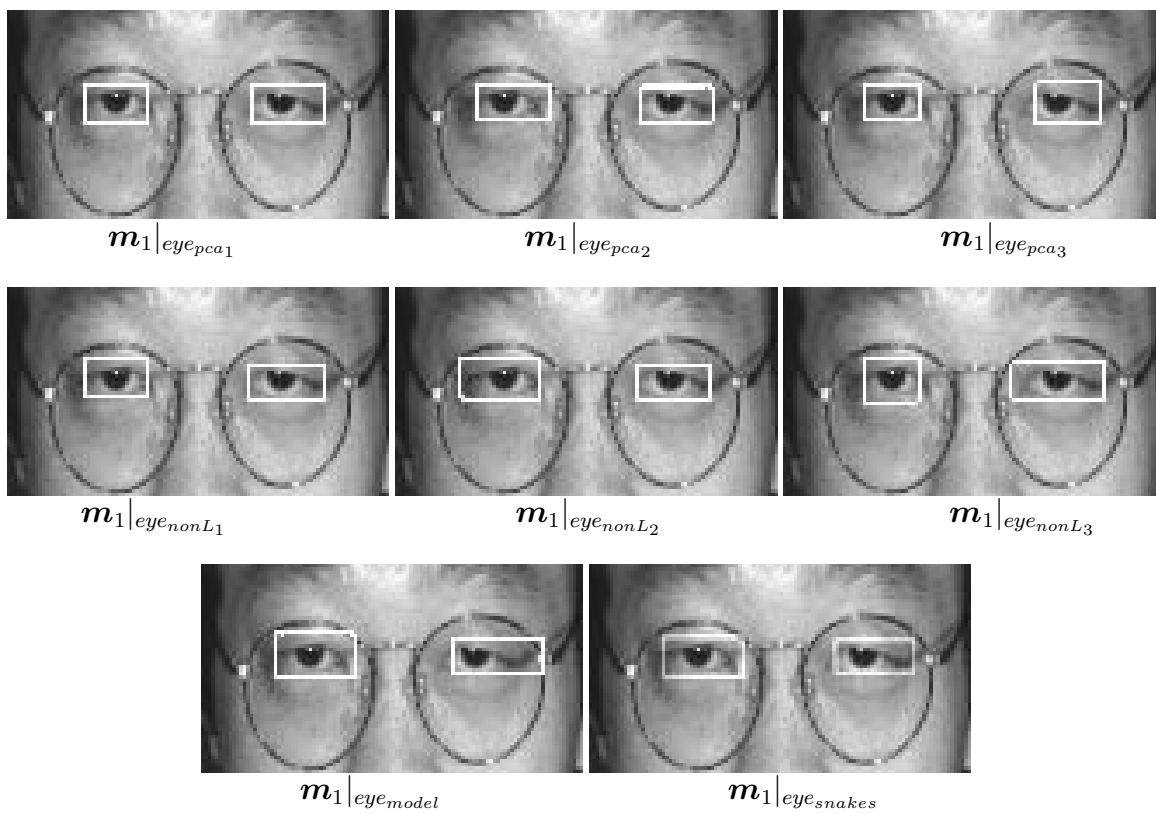


圖 7.7: 目領域抽出結果

7.4 顔画像を用いた個人識別

顔は個人によって異なり，また，パスワードのように忘れることもないため，鍵として用いることができる．顔の他にも，身体特徴を用いた認証（生体認証；バイオメトリクス）があり，例えば，指紋，声紋などがある．しかしながら，顔による認証は人が日常的に行っており，顔画像を用いた認証は非接触で行われることから，利用者の抵抗感や負担が少ない．

顔に眼鏡が含まれると個人識別精度が低下する．本節では，重判別分析法による個人識別法 [31] について検討し，本研究の有効性を示す．

7.4.1 重判別分析法による個人識別法

重判別分析法はクラス内分散とクラス間分散の比を最大にするような線形変換を求める手法である．ここではここでは個人識別を行うので，各クラスは各人物に対応する．

重判別分析法を適用するには，クラス内変動行列が正値対称行列でなければならないので，使用するベクトルの次元数 L は

$$L \leq R - S \quad (7.7)$$

を満たす必要がある．ここで R は全画像枚数， S は人物数である．また，画像空間内の各クラスの分布を得るために各人物毎に複数の画像を準備する必要がある．そこで，各人物毎に表情顔画像（笑い，怒り，悲しみ，嫌悪，恐怖，驚き）を撮影し，人物クラスを形成する．取得した顔画像を正規化し，主成分分析により次元圧縮して特徴ベクトルを求め，その特徴ベクトルに対して重判別分析を適用する．

i 番目の人物の表情 j の顔画像 n_{ij} について主成分分析した後の L 次元特徴ベクトルを r_{ij} とする（ここでは $L=R-S$ と設定した）．ここで重判別分析法によって H 次元（ $H \leq S-1$ ）に次元圧縮される特徴ベクトルの h 番目の要素 p_{hij} は L 次元ベクトル a_h （ $h=1,2,\dots,H$ ）と r_{ij} との内積で表される．

$$p_{hij} = r_{ij}^t a_h \quad (7.8)$$

この a_h は，式 (7.9) の一般固有値問題を解くことにより求まる．

$$B a_h = \lambda_h W a_h \quad (7.9)$$

$$B = \sum_{i \in S} R_i (\bar{r}_i - \bar{r}) (\bar{r}_i - \bar{r})^t \quad (7.10)$$

$$W = \sum_{i \in S} \sum_{j=1}^{R_i} (\mathbf{r}_{ij} - \bar{\mathbf{r}}_i) (\mathbf{r}_{ij} - \bar{\mathbf{r}}_i)^t \quad (7.11)$$

$$\bar{\mathbf{r}} = \frac{1}{S} \sum_{i \in S} \sum_{j=1}^{R_i} \mathbf{r}_{ij} \quad (7.12)$$

$$\bar{\mathbf{r}}_i = \frac{1}{R_i} \sum_{j=1}^{R_i} \mathbf{r}_{ij} \quad (7.13)$$

ここで R_i は i 番目の人物の画像枚数である。

$\mathbf{z}_i$ は i 番目の人物の眼鏡顔画像を PCA で次元圧縮したベクトルを表し， $\bar{\mathbf{r}}_i$ は i 番目の人物の平均顔画像を PCA で次元圧縮したベクトルを表すとし，MDA の基底ベクトル $\mathbf{a}_h$ で張られる部分空間での各々の特徴量を求める。

$$p_{ih} = \mathbf{z}_i^t \cdot \mathbf{a}_h \quad (7.14)$$

$$l_{ih} = \bar{\mathbf{r}}_i^t \cdot \mathbf{a}_h \quad (7.15)$$

このとき，射影空間での特徴ベクトル p_i からのユークリッド距離が最短となる辞書画像の特徴ベクトル l_i の人物 i を識別結果とする。

7.4.2 個人識別結果

識別実験は，入力として，眼鏡顔画像，基底ベクトルを用いた推定結果，非線形射影による推定結果，model ベースによる推定結果の4つのグループに対して行った（各々20人分）。その結果を表7.1に示す。なお，重判別分析法および識別実験は撮影1で取得した眼鏡なし顔画像および眼鏡顔画像を使用し，撮影2の無表情眼鏡なし顔画像を用いて他人排除を行うための閾値を決定した。また，appearance ベースによる方法では，いずれも集合 F_2 の基底ベクトル $\mathbf{u}_{j_2}$ を用いた。

識別結果から，入力が眼鏡顔画像の場合は辞書との距離が大きく，いずれの結果も他人排除用の閾値を上まわった。そのため，他人を許容することがなかったが，本人の識別も行われにくくなった。本人識別数を向上させるために閾値を変動させると，今度は他人許容数が上昇してしまう。このように，本人識別と他人許容の間には，常にトレードオフの関係がある。本人識別を優先するときは利便性を重視する場合であり，一方，他人排除を優先するときは，セキュリティを重視する場合であり，いずれを重視するかはシステムの設計に依存する。本研究の各方法で眼鏡なし顔画像を推定した結果を入力した場合，いずれの場合も眼鏡顔画像を直接用いた場合に比べて識別数が向上した。基底ベクトルを用い

表 7.1: 個人識別実験結果 (20 人分)

入力画像	識別結果	
	本人識別数	他人許容数
眼鏡顔画像	4	0
基底ベクトルを用いた推定結果	17	1
非線形射影による推定結果	19	1
model ベースによる推定結果	19	1
眼鏡なし顔画像に対する基底ベクトルを用いた推定結果	20	0
眼鏡なし顔画像に対する非線形射影による推定結果	20	0
眼鏡なし顔画像に対する model ベースによる推定結果	20	0

た推定結果での識別数の低下は肌の輝度パターンの推定誤差や目領域のボケの影響によるものと考えられる．重判別分析法による個人識別は，appearance ベースによる方法であり，画像の輝度パターンを扱う．そのため，輝度パターンをより精度良く表現している非線形射影による方法が有効であり，また，model ベースによる推定結果における輝度パターンの非忠実性は許容範囲内であったと考えられる．

また，眼鏡なし顔画像を，本研究の各方法を通した場合の推定結果を入力とした場合は，全ての例について本人識別，他人排除が正しく行われた．眼鏡なし顔画像に対する基底ベクトルを用いた推定結果は，眼鏡なし顔画像を忠実に再現するため，識別も良好に行われる．model ベースによる方法では眼鏡なし顔画像から眼鏡フレームを抽出できないので，結果としてそのまま眼鏡なし顔画像が入力される．同じ理由により，非線形射影による方法も基底ベクトルを用いる方法と同等となる．

眼鏡顔・眼鏡なし顔のいずれの場合も，本研究の各方法を適用することにより，識別系統に入力する段階で眼鏡なし顔画像となるため，入力顔画像の眼鏡の有無を意識することなしに個人識別を行うことができる．

7.5 結言

本章では，眼鏡フレーム領域の抽出・除去方法の応用例を示した．

第 1 に，ワイヤフレームモデルを用いた表情眼鏡顔画像の合成について検討した．

- 眼鏡顔画像から直接的に表情顔画像を合成すると，剛体であり本来変形しない眼鏡フレームが表情変化に伴い変形し，違和感のある顔になることを示した．
- 眼鏡フレーム領域の抽出・除去方法により眼鏡顔画像から一旦眼鏡フレームを抽出・除去した後に表情を合成し，表情顔画像に対して抽出した眼鏡フレームを付加することにより表情眼鏡顔画像を生成する方法を提案した．

眼鏡フレーム領域内の輝度値の補間において眼鏡フレームの消え残りがある場合でも，あらかじめ抽出しておいた眼鏡フレームを合成することにより最終的に異和感のない忠実性の高い表情眼鏡顔画像を得ることができる．

第 2 に，フラクタル分析法により顔部品抽出（目領域の抽出）を行った．

- 眼鏡顔画像を直接的に用いた場合は，眼鏡フレームの影響により，目，鼻，顔の輪郭などの領域が互いに融合するため，目領域を抽出することは困難であることを示した．
- 眼鏡なし顔画像推定結果を用いた場合は，目領域が他の顔部品領域と融合せず，目領域を抽出できた．
- 基底ベクトル u_{j_3} を用いた場合，目蓋領域のボケの影響により 4 画素広めに目領域を抽出した．
- model ベースによる方法では，眼鏡フレームの影の影響により，4～9 画素広く抽出した．

フラクタル分析の場合，画像の濃淡面の複雑さとしてフラクタル次元を求めるため，滑らかな肌の輝度パターンを推定する必要があると考えられる．このことから，目領域を広く抽出した場合の推定結果をフラクタル分析に適用するためには，肌の輝度パターンをより高精度に推定する必要がある．このように，改善の余地があるものの，目領域を包含する領域が抽出されていることから，フラクタル分析を行う際に眼鏡なし顔画像推定結果を用いることは有効であると言える．

第 3 に，重判別分析法により顔画像個人識別を行った．

- 本研究の各方法とも，眼鏡顔画像を直接用いた場合よりも本人識別を正しく行うことができ，本研究の有効性を示した．
- 基底ベクトルによる方法では，肌の輝度パターンの推定誤差や目領域のボケの影響により識別数が低下したが，非線形射影では高い識別数を得た（20 人分の顔画像に対し，本人識別 19，他人許容 1）．
- model ベースによる方法は眼鏡なし顔画像の輝度パターンの非忠実性が許容範囲内であったと考えられる．

眼鏡顔・眼鏡なし顔のいずれの場合も，本研究の各方法を適用することにより，識別システムに入力する段階で眼鏡なし顔画像となるため，入力顔画像の眼鏡の有無を意識することなしに個人識別を行うことができる．

以上 3 例を通じ，本論文で述べた眼鏡なし顔画像推定の有効性を示した．

第 IV 部

結論

第 8 章

本論文の結論

8.1 本論文の総括

本研究を総括し，研究の幹となる主要部分を再び強調すると，

本研究の幹の部分は，眼鏡顔画像から顔の個人性を損なうことなく眼鏡なし顔画像を推定することであり，枝に相当するのは appearance ベースによる推定方法と model ベースによる推定方法の双方により目的を達成するための手段（推定方法）を与えることである．さらにこれらから結実した実として 推定結果が目標とする原パターンにどれだけ類似するものが得られたかを示す．

本研究の幹，枝，果実について本論文を総括する．

顔画像処理や顔画像解析，顔画像合成などの顔画像情報を活用する研究は，人の顔から，

- 顔の個人性
- 顔の属性
- 顔の表情
- 顔に表れる非言語的な意図

を抽出，解析，処理，合成することを目的にしている．顔画像にはこれら目的を妨げる成分が存在し，これを本研究では不要領域と呼ぶ．不要領域が存在しても影響を受けない頑健な顔画像処理方法を与えることができれば理想的であるが，容易ではない．本研究によ

り、不要領域を除去した後に処理を実行するのが实际的であろう。ただし、不要領域を除去する際に顔本来の個人性や表情特徴が失われては顔画像処理の目的が達せられなくなる。本研究では、顔の個人性を保存しつつ不要領域を除去する方法を与えることを条件とした。

対象物体（顔）をマスクしている遮蔽物体（不要領域）には眼鏡の他、髭、顔の傷、頭髮なども考えなければならないが、眼鏡とこれらは本質的に異なる。それは、髭や顔の傷などが顔における人の個人性を与える成分の一つであるのに対して、眼鏡は道具として顔につけられた遮蔽物であり、さらに取り外しや取り替えができることから個人性と考えるべきでないからである。このため、本研究では顔画像に存在する眼鏡領域を不要領域とみなして、これを除去する方法を提案した。一方、個人性が多少失われることは許容して髭や傷などを除く処理が望まれる場合もあるので、これについても言及し、眼鏡除去を目的として与えた本研究の手法が顔画像中の他の不要部分をどの程度除去できるか示した。

顔画像中の不要領域（眼鏡）を除去し、原パターン（顔）を自動的に推定する試みは本研究が最初であり、他に例を見ないが、顔画像以外の一般的な画像では、フィルムの傷、字幕、風景画像などでの電線の映り込みなどの不要領域を除去し、原パターンを推定する研究例は多くある。これらの推定方法は、次の2つのカテゴリに大別できる。

- appearance ベースによる推定方法（画像の輝度情報を用いる方法）
- model ベースによる推定方法（対象物体あるいは遮蔽物体の形状情報を用いる方法）

本研究ではこれら2手法各々による顔画像推定方法を提案し、各々において、その特徴・特性を示した。

本研究は眼鏡顔画像から顔そのものの個人性を損なうことなく眼鏡なし顔画像を推定することを目的にしているので、推定方法において

- 眼鏡の影響が除去できたか
- 顔そのものの個人性は保存されているか

を目標にして、推定したパターン（眼鏡を除去した顔画像）の原パターン（眼鏡をつけていない顔画像）との忠実性を評価すべきと考える。ただし、厳密に正解となる原パターンそのものは存在しないので、本研究では別に眼鏡を外して撮影した対象人物の顔画像を原パターンと見なして推定画像との一致度を評価した。本研究では、顔の個人性と顔画像の輝度パターンを密接に関係づけ、顔画像の個人性を「顔画像の輝度パターンの特徴によって個人が特定できるもの」と定義し、推定結果が目標とする原パターンを表現していれば

顔の個人性が忠実に表現されたと考えた．推定結果の輝度パターンが，眼鏡なし顔画像の輝度パターンをどれだけ忠実に表現しているかについて，両者の輝度パターンの類似度によって定量的に評価した．本研究では，推定結果と眼鏡なし顔画像の類似度が，個人識別の研究などで見られる辞書パターンとの類似度と同程度以上の値（0.800 以上）になることを示すことができた．

さらに，各提案方法の特性の比較を行い，どのようなシチュエーションにおいてどの方法が適しているかを考察した．以下のように結論づける．

- 画像の位置などの正規化を精度よく行える場合には appearance ベースの推定方法が類似度として（および主観的に）目標とする原パターンとの忠実性が高い推定画像が得られる．すなわち，顔そのものの個人性を損なうことなく眼鏡なし顔画像を得ることができた．
- 実画像に対して上記の正規化はかなり厳しい条件であり，実環境条件では正規化を要しない model ベースの推定方法が適している．ただし，提案手法によって appearance ベースよりもよい類似度が得られたものの，主観的に見た原パターンとの忠実性はわずかであるが劣っていた．このため主観的な忠実性が高く要求される用途には appearance ベースの方法が適している．

いずれの提案方法も目標とする原パターンに対して良好な忠実性を得ることができた．適用範囲や推定精度のさらなる向上など，特性の分析や改善がさらに必要であるが，本研究で目的とする「眼鏡顔画像から顔の個人性を損なうことなく眼鏡なし顔画像を推定する」について満足できる結果が得られたものと考えている．

以下に各章毎に総括を行う．

第 I 部では，appearance ベースによる眼鏡なし顔画像推定方法を提案した．

第 2 章では主成分分析により求めた眼鏡なし顔画像の基底ベクトルを用いた，新しい顔画像推定方法を提案した．眼鏡顔画像から眼鏡なし顔画像を良好に安定して推定するためには，閾値に依存せず，かつ，広範囲にわたる遮蔽物体を除去する方法を構築する必要がある．そのためには，眼鏡なし顔画像の輝度パターンの特徴を的確に表現する必要がある．本章では，相関を持った眼鏡なし顔画像集合の特徴を効率よく表現する部分空間を主成分分析により解析的に求めた．得られた基底ベクトルにより「眼鏡をかけていない顔」の特徴

を表現し、眼鏡顔画像をこの基底ベクトルで張られる空間に射影することにより、眼鏡顔画像内に含まれる眼鏡なし顔の特徴だけを抽出する方法を提案した。この基底ベクトルと眼鏡顔画像との内積の値は、その基底ベクトルに含まれる眼鏡顔の人物の特徴を表すと考えられる。そこで、眼鏡顔画像と基底ベクトルとの内積値を荷重とした、基底ベクトルの荷重線形和により眼鏡なし顔画像を推定した。以下に、第2章で得られた成果をまとめる。

- 眼鏡なし顔画像の基底ベクトルを用いた新しい顔画像推定法を提案した。本手法は、対象人物の顔の特徴を有した主観的に忠実な眼鏡なし顔画像を推定できる。また、表情顔画像（笑い顔）へも適用できる柔軟な方法であることを示した。
- 眼鏡なし顔画像の推定は、服の襟などの影響を抑制するために顔の上部領域を用いて検討したが、種々の応用に適応できるよう、眼鏡なし顔画像推定結果に下半分顔画像を合成する方法を提案した。
- 本手法により求めた基底ベクトルの妥当性を評価するために、眼鏡なし顔画像を忠実に推定するための基底ベクトルの条件を明らかにし、求めた基底ベクトルがその条件を満足していることを示した。
 1. 眼鏡なし顔画像の対象人物の個性が表現できる。
 2. 眼鏡の成分と直交している。

まず、求めた基底ベクトルが眼鏡なし顔画像を表現できることを示した。次に、各基底ベクトルは眼鏡の成分と完全には直交していないものの、推定結果に眼鏡の成分が現れないことから条件をほぼ満足していると結論づけ、本手法の妥当性を示した。

- 推定精度の定量的な評価方法の検討を行い、眼鏡なし顔画像との類似度により評価する方法を採用し、0.800 を越える高い推定精度を得た。表情顔画像の場合には眼鏡なし顔画像との表情の違いから 0.795 となった。

第3章では、第2章で提案した、基底ベクトルを用いた眼鏡なし顔画像における眼鏡フレーム領域の輝度値の影響を明らかにし、この影響を低減するために、眼鏡フレーム領域を抽出・除去した後に、線形射影する方法（系全体として非線形射影する方法）を提案した。以下に、第3章で得られた成果をまとめる。

- 合成眼鏡顔画像を用いて、眼鏡フレーム領域の輝度値と、基底ベクトル用いた眼鏡なし顔画像推定結果の推定精度の関係を明らかにした．推定精度が高くなる場合は、眼鏡フレーム領域の輝度値が画像平均付近であることが明らかとなった．
- model ベースによる方法を用いて眼鏡顔画像内の眼鏡フレーム領域の抽出し、画像平均輝度で置換した後に線形射影する方法を提案した．基底ベクトルを用いた方法に比べて推定精度が改善できた（30 例中 8 例）．
- より精度よく推定するために、眼鏡フレーム領域の輝度値の置換において、線形補間により肌の輝度パターンを近似した後に線形射影する方法を提案した．全ての場合について、眼鏡顔画像から直接的に推定した場合の類似度を 0.04 ポイント上回り、本手法の有効性を示した．

第 II 部では、model ベースによる眼鏡なし顔画像推定方法を提案した．

第 I 部で述べた appearance ベースによる方法は、眼鏡顔画像内の眼鏡なし顔の特徴を抽出し、忠実性の高い推定画像が得られたが、画像の位置ずれに敏感なため、高精度に眼鏡なし顔画像を推定するには顔画像の正規化が不可欠である．顔画像の正規化が十分に実行できる場合は appearance ベースによる方法は有効であるが、実際には顔画像の正規化が常に良好に行えるとは限らない．そこで、より汎用的な眼鏡なし顔画像の推定を行うためには、顔画像の正規化を要しない方法を構築する必要がある．

appearance ベースによる方法は、顔画像の輝度情報を扱い、眼鏡顔画像から「眼鏡をかけていない顔」の特徴だけを抽出する方法であるのに対して、画像内の不要領域を取り除き、対象物体を抽出するには、このように遮蔽された対象物体を抽出する方法だけでなく、対象物体の前面に位置する遮蔽物体を抽出して除去する方法も考えられる．これは「model ベースによる方法」と呼ばれ、抽出する物体のモデルを構築し、画像内でこのモデルに当てはまる領域を抽出する方法である．

第 4 章では、眼鏡フレームの形状特徴はそれほど大きくはばらつかないことから十分にモデル化できると考え、上記の后者「model ベースによる方法」の考え方にに基づき、眼鏡フレームの各部品を関数で近似したパラメトリック眼鏡フレームモデルを構築した．分布範囲が広く安定した抽出が期待できない輝度情報は扱わず、画像輪郭により物体形状を求め、本モデルにマッチする領域を抽出し、肌の輝度値で置換することにより眼鏡なし画像

を推定する方法を提案した．以下に，第 4 章で得られた成果をまとめる．

- 眼鏡フレームの各部品を関数近似し，パラメータ値によりさまざまな形状を生成できるパラメトリック眼鏡フレームを構築した．
- 本モデルを用いて眼鏡顔画像内の眼鏡フレームの各部品を抽出でき，本モデルの有効性を示した．
- 抽出した眼鏡フレーム領域内の画素の輝度値を，肌の輝度値を用いて置換することにより眼鏡なし顔画像を推定する方法を確立した．平均類似度は 0.871 となり，良好な結果を得た．

パラメトリック眼鏡フレームモデルを用いた方法により画像内の眼鏡フレーム領域を抽出・除去することができたが，本手法は画像輪郭を手がかりに探策を行うため，画像輪郭に途切れがある場合には誤抽出をする恐れがある．この問題を回避するためには，画像内に分布している物体や画像輪郭をひとまとまりとして扱えることが必要である．第 5 章では，眼鏡フレーム領域をひとまとまりとして扱い，さらに，眼鏡フレームの形状は対称構造を持つという特徴があることも踏まえ，Kass らの提案した Snakes を拡張して対称構造物体に収束する Snakes による眼鏡フレーム領域の抽出と除去を試みた．以下に本章で得られた成果を示す．

- 対象構造物体へ収束する Snakes を複数の Snakes を用いて設計した．
- 収束結果に対し，膨張および収縮する Snakes を用いて眼鏡フレームを各部品毎に抽出することにより抽出結果を改善する方法を提案した．
- 遺伝的アルゴリズムを用いて Snakes に与える最適な係数を大域的に探索した．60 世代前後で収束することが明らかとなった．優先度を設け，適応度 *ratio* が大きく，*ratio* が同値の場合は制御点間の間隔の最小値 *dist* が大きい遺伝子が上位となるように整列したところ，誤抽出を防ぐことができた．

第 III 部では，第 I 部および第 II 部で述べた眼鏡なし顔画像の推定方法の各々の特性と応用例について述べた．

第 6 章では，眼鏡フレーム輪郭の途切れ，リムなし眼鏡への対応，眼鏡フレームの影の影響，眼鏡フレームと目領域の重なり，眼鏡フレームの輝度値の影響，顔画像の正規化，顔の水平方向の回転，眼鏡以外の遮蔽物体への対応について述べるとともに，各方法の特徴から，どのようなシチュエーションにおいて用いるのが適切かということについて考察した．以下に，考察内容を要約する．

appearance ベースによる方法

- 正規化が良好に実行できる場合
- 推定結果が主観的に忠実な眼鏡なし顔画像になることが必要な場合
- 後段の顔画像解析方法が appearance ベースの場合
- 眼鏡フレームが目領域と近接または重なっている場合

model ベースによる方法

- 正規化が許容されない場合
- 後段の顔画像解析や処理において，目的達成の中間時点で推定結果の主観的な忠実性がさほど重要ではない場合
- 後の処理において眼鏡フレーム形状を用いる場合

appearance ベースによる方法では，顔画像正規化が必要という制約があり，model ベースによる方法では，肌の輝度値の補間特性に限界がある．どちらの方法を用いるのが適切かは，適用する場面の条件に委ねられる．

第 7 章では，眼鏡なし顔画像推定方法の応用例を示した．

第 1 に，ワイヤースタイルモデルを用いた表情眼鏡顔画像の合成について検討した．

- 眼鏡顔画像から直接的に表情顔画像を合成すると，剛体であり本来変形しない眼鏡フレームが表情変化に伴い変形し，違和感のある顔になることを示した．

- 眼鏡フレーム領域の抽出・除去方法により眼鏡顔画像から一旦眼鏡フレームを抽出・除去した後に表情を合成し、表情顔画像に対して抽出した眼鏡フレームを付加することにより表情眼鏡顔画像を生成する方法を提案した。

眼鏡フレーム領域内の輝度値の補間において眼鏡フレームの消え残りがある場合でも、あらかじめ抽出しておいた眼鏡フレームを合成することにより最終的に異和感のない忠実性の高い表情眼鏡顔画像を得ることができる。

第2に、フラクタル分析法により顔部品抽出（目領域の抽出）を行った。

- 眼鏡顔画像を直接的に用いた場合は、眼鏡フレームの影響により、目、鼻、顔の輪郭などの領域が互いに融合するため、目領域を抽出することは困難であることを示した。
- 眼鏡なし顔画像推定結果を用いた場合は、目領域が他の顔部品領域と融合せず、目領域を抽出できた。
- model ベースによる方法では、眼鏡フレームの影の影響により、4～9画素広く抽出した。
- 基底ベクトル u_{j3} を用いた場合、目蓋領域のボケの影響により4画素広めに目領域を抽出した。

フラクタル分析の場合、画像の濃淡面の複雑さとしてフラクタル次元を求めるため、滑らかな肌の輝度パターンを推定する必要があると考えられる。このことから、目領域を広く抽出した場合の推定結果をフラクタル分析に適用するためには、肌の輝度パターンをより精度よく推定する必要がある。このように、改善の余地があるものの、目領域を包含する領域が抽出されていることから、フラクタル分析を行う際に眼鏡なし顔画像推定結果を用いることは有効であると言える。

第3に、重判別分析法により顔画像個人識別を行った。

- 本研究の各方法とも、眼鏡顔画像を直接用いた場合よりも本人識別を正しく行うことができ、本研究の有効性を示した。
- model ベースによる方法は眼鏡なし顔画像の輝度パターンの非忠実性が許容範囲内であったと考えられる。

- 基底ベクトルによる方法では，肌の輝度パターンの推定誤差や目領域のボケの影響により識別数が低下したが，非線形射影では model ベースによる方法と同様，高い識別数を得た．

眼鏡顔・眼鏡なし顔のいずれの場合も，本研究の各方法を適用することにより，識別システムに入力する段階で眼鏡なし顔画像となるため，入力顔画像の眼鏡の有無を意識することなしに個人識別を行うことができる．

以上 3 例を通じ，本論文で述べた眼鏡なし顔画像推定の有効性を示した．

8.2 今後の検討課題

今後の課題として，以下に示すものが挙げられる．

表情を損なわない眼鏡なし顔画像の推定

本研究では，顔画像内の不要領域除去において，顔の個人性が保存できれば顔の表情も保存され则认为，顔の個人性が損なわれないことを条件とした．今後は，表情も考慮し，表情が損なわれない眼鏡なし顔画像推定を検討することを考えている．第 2 章では笑い顔画像について検討を行ったが，表出度合いの異なる場合や他の表情についても実際に適用できるかどうか，さらに検討を進める予定である．

推定精度の改善

7 章で示したように，処理目的によっては眼鏡なし顔画像の推定精度をより向上させることが望まれる．線形・非線形射影ともに基底ベクトルを用いる方法では，ボケの発生を防止する必要がある．これは，輝度情報と形状情報を分離して扱い，各々について基底ベクトルを求めることで対応できると考えられる [62]．眼鏡フレームモデルを用いる方法および対称構造物体に収束する Snakes を用いる方法では，抽出した眼鏡フレーム領域内の輝度値の補間方法の改善を行う必要がある．特に，顔の輪郭周辺では髪の影響により低輝度領域が生じる場合があるので，輝度値の低い画素の影響が周囲に波及しないように付帯条件を持たせる必要があると考えられる．

また，カラー画像をモノクロ画像に変換することで，本論文で述べた方法を適用することができるが，色情報を用いることで誤抽出（例えば，パラメトリック眼鏡フレームモデルを用いた場合の耳領域の誤抽出）を回避でき，より精度よく眼鏡なし顔画像を推定できる

と考えられる．しかしながら，記憶色でもある顔色を忠実に再現することは容易ではないとも考えられる．どのような色空間を用いるのが適切なのかについても併せて検討したい．

顔の向きに対する頑健性の向上

本研究を進めるにあたり，画像の顔の向きは正面と仮定した．しかしながら，実際には顔の動きにより水平方向に回転した状態の顔画像が取得されうる．より頑健な方法とするために，これらの条件を取り除いた場合でも対応できることが望まれる．本論文で述べた方法を歪み対称形状を抽出できるように拡張したり [109]，顔の回転を補正する方法を適用することで対応することを検討したい [110]．

目の大きさ変化の推定

実際に眼鏡を外すとレンズの屈折により目の大きさが変化する．より高精度な眼鏡なし顔画像推定を行うには，眼鏡フレーム領域の抽出・除去についてだけでなく，レンズの影響を考慮して目の大きさを変化させる必要がある．眼鏡のレンズが凸であるか凹であるかによって拡大・縮小する処理が全く正反対となるため，度や凹凸などの眼鏡のレンズに関する事前知識を用いて処理を行うことを考える．眼鏡顔画像だけからレンズの特性を推定する研究を行う場合には，レンズの度が強くなると，背景の写り込みや屈折による高輝度領域が現れやすくなることから，これらの情報も活用することを考えたい．

心理的变化の検討

眼鏡による顔への影響は物理的な変化だけでなく，心理的な変化もある．本研究では，眼鏡による物理的な変化について焦点を絞り，顔画像解析・処理における眼鏡の影響を取り除くために眼鏡顔画像からの眼鏡なし顔画像の推定を行った．今後，眼鏡フレーム形状や色，レンズの色による顔の印象への影響について客観的評価尺度を構築し，個々の眼鏡の影響量を解析する必要がある．眼鏡による表情や印象への影響量が明らかになれば，眼鏡を含めた眼鏡顔画像全体の表情や印象などを計算機により評価・推定できる．眼鏡顔画像から推定した眼鏡なし顔画像の印象について眼鏡の影響を補整すれば，眼鏡顔画像全体の最終的な評価・推定結果が得られる．また，別の眼鏡を用いた場合の表情や印象などを推定することができるであろう．

付録 A

眼鏡 ～ その歴史と機能 ～

眼鏡がいつ、誰によって作られたのかは明らかではなく、1280 年頃にイタリアで作られたということしか判っていない [111]-[115]。一方、レンズによる光の屈折作用については古くから知られており、イラク北方で栄えたアッシリアの古都ニネヴェの遺跡から水晶製の平凸レンズ（直径 38cm，焦点距離 114cm）が発見されている [112]。紀元前 400 年頃の古代ギリシア最大の喜劇作家アリストファネスは「雲」という戯曲の中で太陽光を集めて羊皮紙に穴を開ける火取りガラス（虫眼鏡）について書いている [113]。レンズについて最初に述べた文献は 11 世紀にアラビアのアルハゼンが書いた「視覚論」であり、平凸レンズについて書かれている。これが 1266 年にラテン語に翻訳され、多くの修道院で読まれるようになった。アルハゼンの述べたレンズはその厚さが半径よりも厚いので読書には適さなかったが、1268 年頃にイギリスの哲学者ロジャー・ベーコンは半径よりも厚みが薄いレンズを用いた手持ちの単玉眼鏡を読書用に使い始めた。目は 2 つあるものだからレンズも 2 つ必要ということになり、また、各々のレンズを 2 つの目から等距離に置けば良いと考えられ、レンズを入れた鉄の輪の柄を鋏打ちして固定したりベット眼鏡が作られた。当初、眼鏡は凸レンズのものだけが作られており、老眼鏡として用いられていた。

視力を矯正するためにはレンズを目の前面に配置できれば良いので、リベット眼鏡は手で持ったり、注意深く鼻の上に載せられていた。このように、眼鏡を使用するために片手が塞がったり鼻の上に置いただけでは不安定であったが、眼鏡を顔に固定する方法は眼鏡が開発されてからしばらくの間はあまり改善されないままとなっていた。15 世紀後半によろやく鼻の上にくっつくだけのしなやかさを持った眼鏡や、帽子で止めるための固定用のホックの付いた眼鏡が作られるようになった。また、鼻に載せるタイプの眼鏡としてヒンジ眼鏡（2 つのレンズフレームを鋏で固定せず可動式とし、鼻幅に合わせて調節できるも

の)や鼻眼鏡(バネを用いて鼻を挟むもの)が作られた。日本への最初の眼鏡は、1551年にイエズス会の宣教師フランシスコ・ザビエルが周防(現在の山口県)の国主・大内義隆に献上したものとされている。なお、現存する最古の眼鏡は、室町幕府8代将軍・足利義政(1436~1490年)が使用したものを12代将軍・足利義晴が京都大徳寺大仙院の開祖・古岳禅師に与えたとされているものであるが、大徳寺の寺伝以外には資料が一切ないために詳細は不明である。したがって、文献的に眼鏡の日本伝来の年を明確に特定できるのは、大内義隆に献上された1551年である[114]。

そして、16世紀後半に鼻眼鏡に紐をつけて耳で結ぶように工夫した紐付き眼鏡(スパニッシュイタリアン型眼鏡)が作られた。西洋人は彫りが深く鼻が高いので、紐付き眼鏡を掛けてもレンズとまつ毛が接触しないが、東洋人は鼻が低いのでレンズとまつ毛が接触してしまう。そこで、日本人がパッド(鼻あて)を付けて高さを出したとされている。

現在用いられているようなつる付き眼鏡は、眼鏡が発明されてから450年ほど後の1727~1730年の間にロンドンの眼鏡商エドワード・スカーレットにより開発された。それでも、18世紀には片眼鏡(把手付き単玉眼鏡)が流行し、19世紀ではモノクル(単眼鏡・レンズを頬骨とまぶたにより固定するもの)が作られるようになった。また、18世紀後半には鉋眼鏡(二股の柄付き手持ち眼鏡)が流行し、これは後に小型・軽量化された女性用のローネット(柄付き手持ち眼鏡・眼鏡フレームの片側に柄が付いているもの)となった。公の場では眼鏡の使用は避けるべきとされていた上流社会では、鉋眼鏡やローネットは19世紀になっても使用され続けた。

このように、眼鏡は13世紀以降、主にレンズの屈折による視力の矯正を目的として開発・改善されてきた。視力矯正が不要な正視(像が鮮明に見える状態)ではない場合、近視、遠視、乱視に分けられる[116, 117]。

人間の目は、調節力を全く働かせない場合は一番遠くに焦点が合う状態になり、調節力を働かせることにより近い位置に焦点が合う。近視の場合は、調節力を働かせない状態では近くの物体に焦点が合うが、調節力を働かせると焦点は手前の方に移動するだけなので、遠方の物体を鮮明に見ることができない。近視には、屈折性近視と軸性近視がある。屈折性近視とは、目の角膜や水晶体の屈折力が強すぎて焦点距離が短く、遠方の物体が網膜より前方で像を結びふために鮮明に物を見ることができない状態を指す。また、軸性近視とは、角膜や水晶体の焦点調節機能は正常であっても、目の奥行き(眼軸)が大きく、網膜より前方で像が結ばれる状態を指す(図A.1)。近視を矯正するには、凹レンズの眼鏡を用いる。

遠視の場合は、目の調節力を全く働かせない場合は遠方も付近も焦点が合わない。調節力を働かせると手前の方に焦点が移動するので、遠方の物体に焦点を合わせることができる。遠視の場合は近視の場合と同様に、屈折性遠視（目の水晶体の焦点距離が長い）と軸性遠視（眼軸が短い場合）がある。遠視は、凸レンズの眼鏡によって矯正する。なお、老視（老眼）は遠視と同様に近くの見えにくく症状が似ているが、老視では目の水晶体の弾力が弱まり毛様体筋が緊張しても十分に調節できない点が異なる。老視に用いられる遠近両用の眼鏡は、落雷実検で有名なベンジャミン・フランクリンにより 1784 年に考案され、2 つのレンズの半分ずつを 1 つの眼鏡フレームに入れたものが作成された。

乱視は通常軸性乱視を指し、目の経線毎の屈折力に相違があり鉛直線に対する角度により度数の差があり、目に入った光が焦点を結ばない状態をいう。また、目のいずれかの光学系における不規則な凹凸による乱視は不正乱視と呼ばれ、眼鏡による矯正は困難である。乱視は、近視や遠視と併発することもあり、乱視を矯正するには、方向によって曲率の異なる円柱レンズを用いる。

眼鏡には、視力矯正という目的の他にも直射日光などの強い光から目を保護するためのサングラスや色付きレンズの眼鏡がある。1586 年にイギリスで刊行された「視力保護小論～節食のすすめと薬品の使用法について～」と題する本では、色付きレンズの効用について述べられており、18 世紀には透明レンズと同じくらい色付きレンズが製造されていたようである。また、最近ではファッション性の高いものもあり、眼鏡使用者の中には顔の見え方を変化させる目的のためにレンズを入れずにフレームだけを掛けている場合もある。

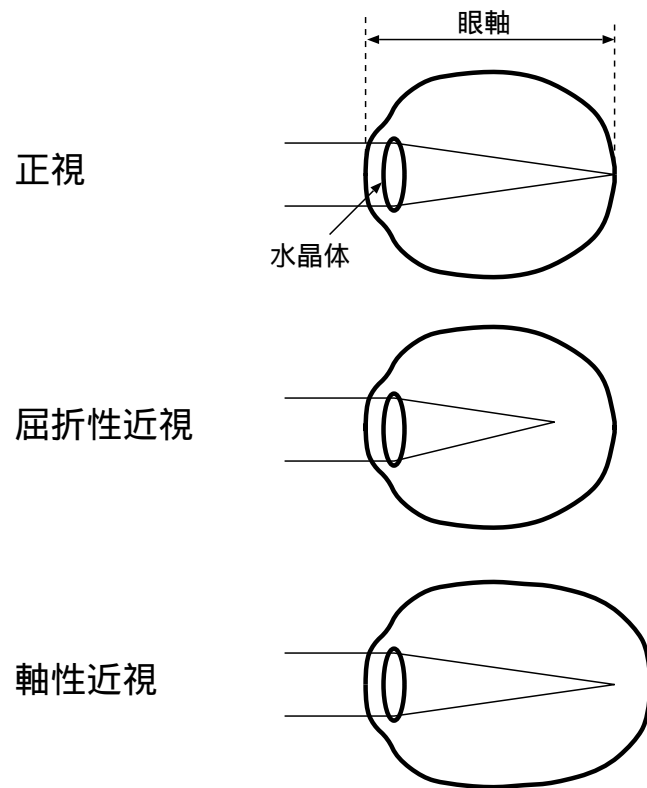


圖 A.1: 正視，屈折性近視，軸性近視

付録 B

眼鏡による顔画像への影響

眼鏡をかけることにより、顔の見え方は物理的に変化し、画像の輝度パターンが変化する。ここでは、眼鏡による顔画像への影響について述べる。

B.1 眼鏡による顔の見え方の物理的影響

顔の見え方の物理的な影響として、以下の項目が挙げられる。

- 眼鏡フレームによる顔のマスキ
- 眼鏡フレームの影による肌の輝度値の変化
- レンズの屈折作用による高輝度領域の表出
- レンズへの背景の映り込みによる顔のマスキ
- レンズ上の照明反射による顔のマスキ
- レンズの色による肌の輝度値の変化
- レンズの屈折作用による見かけ上の目の大きさの変化
- レンズ上の汚れや傷による顔のマスキ

以下、各項目について詳しく述べる。

眼鏡フレームによる顔のマスキ

眼鏡は眼鏡フレームとレンズから構成されている．そして，眼鏡フレームはブリッジ，プロップ，リム，エンドピース，テンプル，バー，ノーズパッドから構成されている（図 B.1）．リム，バー，ノーズパッドの無い眼鏡フレームもある [88, 89, 90]．



図 B.1: 眼鏡フレームの各部の名称

眼鏡はモノクルやコンタクトレンズなどと違い，眼鏡フレームによりレンズを支え，ノーズパッドとテンプルにより鼻と耳を支点として目の前面にレンズを固定する．したがって，眼鏡フレームは顔よりも前に位置し，眼鏡フレームにより顔がマスクされる．眼鏡をかけた人の顔を見たとき，眼鏡フレームが目，まぶた，眉と重なって見える場合がある．また，鼻筋，眉間，こめかみ周辺をマスクし，輝度変化を生じる（図 B.2）．

眼鏡フレームの影による肌の輝度値の変化

眼鏡のテンプルは顔の側面に位置し，それ以外の部品は顔の前面に位置する．そして，眼鏡は鼻と耳を支点として顔に固定されるものの，ブリッジやリムなどは顔表面から離れている．

そのため，照明により眼鏡フレームの影が顔表面上に現れる．特に，顔の正面に対して斜め方向からの照明により，顔表面に眼鏡フレームの影が現れやすい．眼鏡フレームの影により，肌領域の輝度値が変化する（図 B.3）．

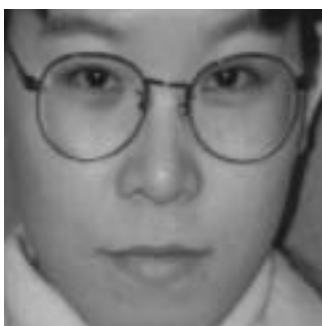


図 B.2: 眼鏡フレームによる顔のマスク



図 B.3: 眼鏡フレームの影による肌の輝度値の変化

レンズの屈折作用による高輝度領域の表出

視力が弱い場合には、矯正するため用いるレンズの屈折率も大きくなる。レンズの屈折率を大きくするためには、屈折率の大きい材質を用いてレンズを作成するか、レンズ厚を大きくする必要がある。屈折率の大きい凹レンズの場合、コバ（レンズ外周部近傍）では拡散光と直接光および回折光が合わさるため顔に輝度の高い領域が現れる。エンドピース側（目尻の周辺）ではレンズと顔との距離が長くなるためこの影響は大きくなり、顔の正面から見た場合に三日月状の高輝度領域が現れる、画像に輝度変化が生じる（図 B.4）。

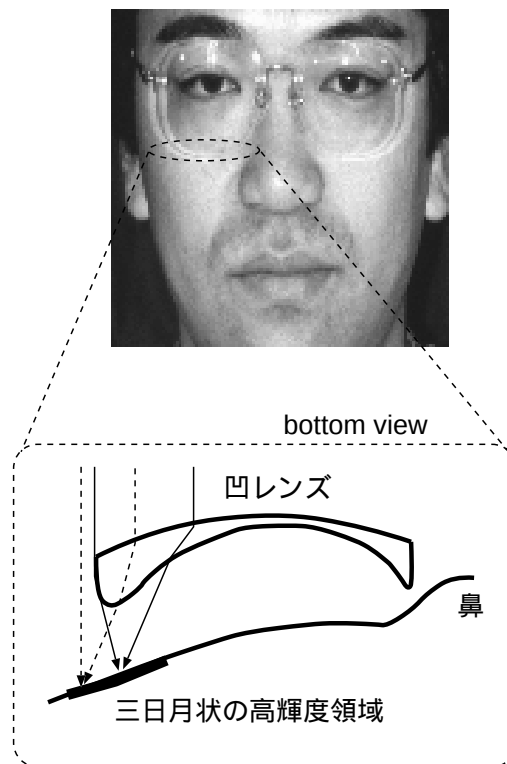


図 B.4: 凹レンズの屈折作用による高輝度領域

レンズへの背景の映り込みによる顔のマスキ

特に、度の強いレンズや厚みのあるレンズの場合、レンズの屈折作用により背景がレンズの外周付近に映り込む。この映り込みにより顔がマスクされ、肌領域の輝度パターンが変化する（図 B.5）。



図 B.5: レンズへの背景の映り込みによる顔のマスク

レンズ上の照明反射による顔のマスク

眼鏡をかけた人の顔を見るとき，その視点がレンズの照明反射方向にある場合，レンズ上に高輝度領域が見える．このレンズ上の照明反射領域は，照明とレンズの距離が小さい場合や照明強度が強い場合は，目を多い隠すほど大きく反射光強度の強い領域となる（図 B.6）．



図 B.6: レンズ上の照明反射による顔のマスク

レンズの色による肌の色の变化

目が光の刺激に過敏な場合や，強い光から目を保護するために，色付きレンズの眼鏡またはサングラスが用いられる．最近では黄色や紫色などのファッション性の高い色付きレ

レンズの眼鏡が用いられている．また，色の濃さが均一ではなく，グラデーションのかかっている場合もある．

透明レンズの場合に比べ，顔表面の肌の色がレンズの色により大きく変化してしまう．色付きレンズの眼鏡をかけた人の顔を正面から見ると，肌の色ではなくレンズの色そのものが画像に表出することもある．

レンズの屈折による見かけ上の目の大きさの変化

眼鏡をかけている人の顔を見たとき，その眼鏡使用者の目の大きさは眼鏡をかけていないときの本来の目の大きさとは異なって見える．近視用の眼鏡をかけている人の目は，本来の目の大きさよりも小さく見え，遠視用の眼鏡をかけている人の目は，本来の目の大きさよりも大きく見える．

図 B.7 は左右の瞳の位置を用いて傾きおよび大きさを正規化した顔画像から抽出した目領域である．正規化処理は，まず， x_{el} ， x_{er} ， y_{el} ， y_{er} を各々左右の瞳の x および y 座標としたとき，式 (B.1)(B.2) により左右の瞳を結ぶ線分が x 軸と平行になるように回転した．ここで X と Y は回転後の x および y 座標を示す．

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (\text{B.1})$$

$$\theta = \text{Tan}^{-1}\left(\frac{y_{er} - y_{el}}{x_{er} - x_{el}}\right) \quad (\text{B.2})$$

次に，眼鏡顔画像を拡大・縮小し，眼鏡顔画像内の顔の幅を眼鏡なし顔画像内の顔の幅に合わせた．レンズの影響により左右の瞳の距離が眼鏡顔画像と眼鏡なし顔画像で異なる恐れがあるため，ここでは，眼鏡なし顔画像および眼鏡顔画像の鼻翼の幅 W_{hn} と W_{hm} (図 B.8) を用い， W_{hn} と W_{hm} が一致するように式 (B.3) により眼鏡顔画像を横方向に拡大・縮小した．

$$X = \frac{W_{hm}}{W_{hn}} x \quad (\text{B.3})$$

図 B.7(b) および (d) の瞳の幅 W_{pn} ， W_{pm} は

- $W_{pn} = 65$ 画素
- $W_{pm} = 61$ 画素

である．近視用の眼鏡をかけているために，眼鏡顔画像内の目の大きさは本来の目の大きさに対して縮小されている．

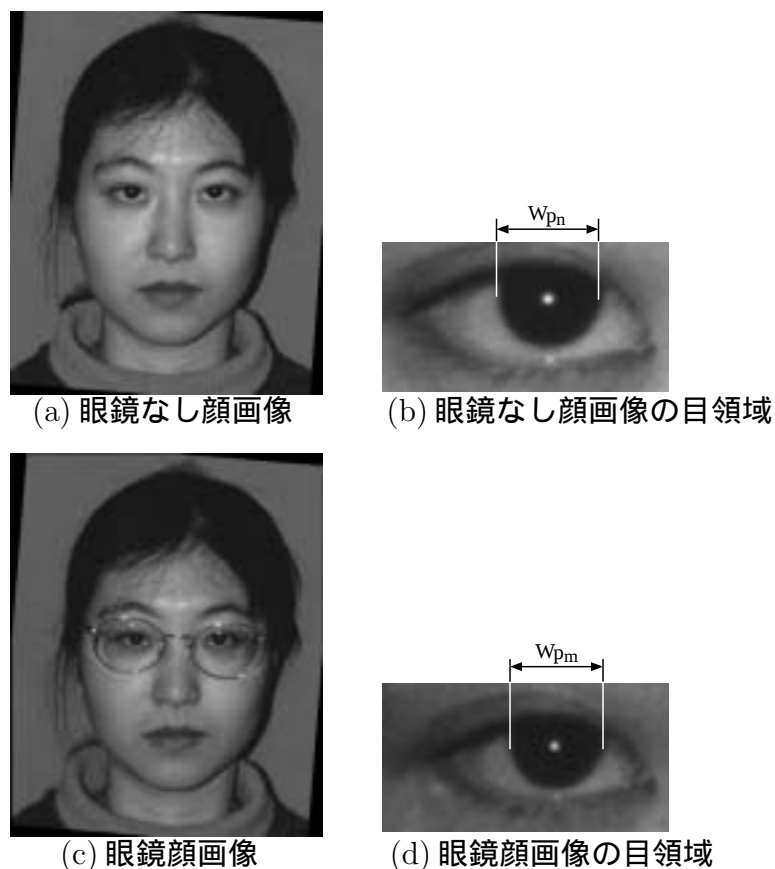


図 B.7: レンズの屈折による見かけ上の目の大きさの変化

レンズ上の汚れや傷による顔のマスク

レンズ上に汚れや傷がある場合は，顔をマスクすることになる．特に，指の汚れなど人体の脂による汚れは，照明反射を起こしやすく，マスクされた領域の輝度値が変化する（図 B.9）．

B.2 眼鏡による顔の見え方の心理的影響

眼鏡による顔の見え方の心理的な影響には以下の項目が挙げられる．

- 眼鏡フレーム形状の影響による顔の表情や印象の変化

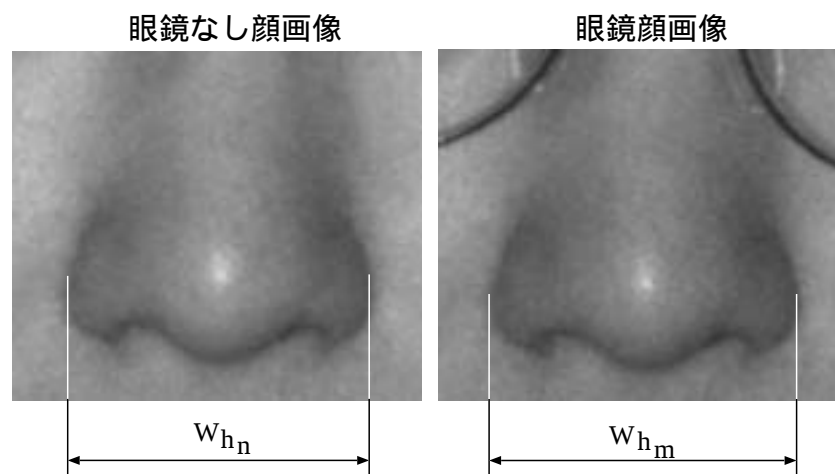


図 B.8: 鼻翼の幅 W_{h_n} , W_{h_m}



図 B.9: レンズ上の汚れによる照明反射

- 眼鏡フレームの色の影響による顔の表情や印象の変化
- レンズの色の影響による顔の表情や印象の変化

以下，各項目について詳しく述べる．

眼鏡フレーム形状の影響による顔の印象の変化

眼鏡フレームは人工物であり，その形状は任意である．顔にかけて使用するという目的のため概形はほぼ同一であるが，レンズ形状およびその縦横比，眼鏡フレームの太さや材質など，さまざまな眼鏡フレーム形状が存在している．

眼鏡フレーム形状により顔の印象などに影響を及ぼす．例えば，眼鏡フレーム形状が丸いと顔全体が丸みを帯びたように感じやすく，表情が和らぎ，柔和な印象を与える．また，角張った眼鏡フレーム形状の場合は同じ表情でも堅い表情に感じやすく，その一方で落ち着いた雰囲気や真面目さなどの印象を与える．

丸顔の人がレンズ部の丸い眼鏡フレームをかけると，顔の丸みが強調され過ぎてしまうので，横長のやや角張った眼鏡をかけるとすっきりとした顔立ちとなる．このように，ある人物の顔に対して美的側面から相応しい眼鏡，相応しくない眼鏡がある．先に述べたように，顔の印象として，その人物の性格的な印象を変化させることもあるので，店頭で眼鏡を購入する際には眼鏡の試装が欠かせない．そして，眼鏡フレーム形状による表情や印象などの変化を積極的に利用し，顔のイメージチェンジを図ることも少なくない．

このように，眼鏡フレーム形状の影響により，顔の表情や印象などが変化する．図 B.10 は眼鏡なし表情顔画像に眼鏡フレーム画像を合成したものである．合成眼鏡表情顔画像 1 はリム（レンズの周囲部分の眼鏡フレーム）の形状がやや角張った眼鏡フレーム，合成眼鏡表情顔画像 2 はリムの形状が丸みを帯びた眼鏡フレームを用いて作成した．いずれの顔画像も人物そのものの表情は同一であるが，眼鏡なし表情顔画像よりも合成眼鏡表情顔画像 1，そして，合成眼鏡表情顔画像 1 よりも合成眼鏡表情顔画像 2 の方が笑いの度合いが強調されているように感じる．

眼鏡フレームの色の影響による顔の表情や印象の変化

眼鏡フレーム形状だけでなく，その色についても前項と同様に表情や印象などに変化を与える．黒縁の眼鏡フレームは落ち着いた雰囲気などを，銀や金は真面目さなどの印象を



眼鏡なし表情顔画像



合成眼鏡表情顔画像 1



合成眼鏡表情顔画像 2

図 B.10: 眼鏡フレーム形状による表情の印象変化

与える．また，黄色や桃色などはあかぬけた印象を与える．

レンズの色の影響による顔の表情や印象の変化

色付きレンズは，主に目の保護を目的とする．目が光の刺激に過敏な場合や，強い光から目を保護するために，色付きレンズの眼鏡またはサングラスが用いられる．レンズの色によって顔の表情や印象が変化する．黄色のレンズは表情を明るくし，快活な印象を与える．

その他，意図的に色の濃いレンズを用いて目の開き方や動きなどを隠し，感情や動揺などの心理状態が他人に推定されるのを防いだり，目やその周辺の傷や疾患などを隠す場合もある．

謝辞

本論文をまとめるにあたり，主テーマ指導教員として終始熱心に親身になって御指導して頂き，また，研究者としての基本的かつ重要な思考や知識などを説いて下さるとともに，各方面で御配慮下さいました北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 小谷一孔先生に深く感謝致します．

像情報処理学講座 主指導教員として機会あるごとに御指導下さいました同大学宮原 誠先生に深く感謝致します．御教示頂いた数々の御言葉を胸に刻み，今後も精進する所存です．

同大学 赤木正人先生ならびに阿部 亨先生（東北大学 情報シナジーセンタ 併任）には，本論文をまとめる上で有益なコメントを頂いただけでなく，パターングループ研究室における合同ゼミでも熱心に御議論頂きました．また，阿部先生には博士後期課程の副テーマ指導教員として御指導頂きました．赤木先生，阿部先生に深く感謝致します．

学外審査員を御快諾頂き，数回に渡り熱心にディスカッションをして頂いた，金沢工業大学 情報工学科 渡辺弥寿夫先生に深く感謝致します．

前述の合同ゼミで熱心に御議論頂いた，北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科嵯峨山 茂樹先生（東京大学 大学院情報理工学研究科 併任），同大学 下平 博先生ならびに各研究室メンバに深く感謝致します．

剣持雪子先生，亀田昌志先生（現・岩手県立大学 ソフトウェア情報学部 ソフトウェア情報学科），在学当時 Research Associate として赴任されていた小林幸夫先生（現・小山工業高等専門学校 電気情報工学科），在学当時共に学んだ石川智治先生（現・北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科）をはじめとする小谷研究室ならびに宮原研究室メンバ各位に深く感謝致します．

私が木更津高専に着任後も実験に必要な計算機環境を御提供して頂いた，北陸先端科学技術大学院大学 情報科学センタ スタッフ各位に深く感謝致します．

顔画像撮影に協力して下さいました皆様に深く感謝致します．特に，小谷研究室の副テーマ

として撮影および写真のデジタル化を行い，顔画像データベースを構築して頂いた小川知之氏，佐藤弘一氏に深く感謝致します．

各種相談にのって頂き，いろいろなアドバイスを頂いた，岡本研究室ならびに植松研究室の仮配属メンバ各位に深く感謝致します．

北陸先端科学技術大学院大学 保健管理センタを通じてカウンセリングでお世話して頂いた，金沢大学 保健管理センタ 木村敦子先生に深く感謝致します．

その他，北陸先端科学技術大学院大学 附属図書館，研究協力課，学生課 スタッフ各位をはじめ，石川県における研究，勉学，生活を支援して頂いた全ての皆様に感謝致します．

2000 年 7 月より木更津工業高等専門学校 情報工学科 助手として着任後，各種御配慮頂いた前学科主任 天摩勝洋先生，現学科主任 前田 紘先生をはじめとする情報工学科スタッフ各位に深く感謝致します．また，熱心に御討論頂いた同校 人文学系 中村俊昭先生ならびに小澤健志先生に深く感謝致します．そして，激励の御言葉を頂いた同校 各学科・学系 教員各位ならびに各種手続きを円滑に進めて頂いた庶務課，会計課，学生課の職員各位に深く感謝致します．

心身ともに支えとなって下さった，清水美保子様，清水達美様，清水勝美様，清水喜美子様に深く感謝致します．

最後に，私に勉学の機会を与えてくれ，常に暖かく見守ってくれた家族の皆に感謝します．

参考文献

- [1] A.Mehrabian (西田司訳), “非言語コミュニケーション,” 聖文社, 1986.
- [2] L.Young (佐藤素子 訳), “顔の本,” 河出書房新社, 1996.
- [3] R.Bull and N.Rumsey (仁平義明 監訳), “人間にとって顔とは何か,” 講談社, 1995.
- [4] P.Ekman and W.V.Friesen (工藤 力 編訳), “表情分析入門,” 誠信書房, 1987.
- [5] 志水 彰, 角辻 豊, 中村 真, “人はなぜ笑うのか,” 講談社, 1994.
- [6] 友定啓子, “幼児の笑いと発達,” 勁草書房, 1993.
- [7] 遠藤利彦, “喜怒哀楽の起源,” 岩波書店, 1996.
- [8] W.von Raffler-Engel (本名信行, 井出祥子, 谷林真理子 編訳), “ノンバーバルコミュニケーション,” 大修館書店, 1981.
- [9] 香原志勢, “顔と表情の人間学,” 平凡社, 1995.
- [10] 原島 博, 馬場悠男, “人の顔を変えたのは何か,” 河出書房新社, 1996.
- [11] V.Bruce (吉川左紀子 訳), “顔の認知と情報処理,” サイエンス社, 1990.
- [12] 吉川左紀子, 益谷 真, 中村 真, “顔と心 ~ 顔の心理学入門~, ” サイエンス社, 1993.
- [13] 崔 昌石, 原島 博, 武部 幹, “顔の3次元モデルに基づく表情の記述と合成,” 信学論 A, Vol.J73-A, No.7, pp.1270-1280, July 1990.
- [14] 崔 昌石, “知的画像通信における顔画像の分析・合成・処理の研究,” 博士論文 (金沢大学), 1991.

- [15] 海老原 一之, 棚沢 順, 大谷 淳, 中津良平, 岸野文郎, “美術解剖学に基づいた仮想変身システムのための実時間人物表情表現,” 信学論 D-II, Vol.J81-D-II, No.5, pp.841-849, May 1998.
- [16] 柴田大介, 中村剛士, 世木博久, 伊藤英則, “顔画像の線描画による表現手法について,” 信学論 D-II, Vol.J80-D-II, No.8, pp.2095-2101, Aug. 1997.
- [17] オムロン株式会社, “技術紹介 (PC ログイン),”
http://www.okao.net/pc/tech_appli.htm
- [18] 東芝株式会社, “Smartface,”
<http://www3.toshiba.co.jp/pc/catalog/ff/ff1100/katuyou6.htm>
- [19] アットマーク・アイティ株式会社, “バイオメトリクスカタログ (後編),”
<http://www.atmarkit.co.jp/fsecurity/special/11biomet/biomet02a.html>
- [20] アルファデータ株式会社, “AD-CCDF2 (メールガードマン)”,
<http://www.alpha-data.co.jp/ccdf2.html>
- [21] S.Hashimoto, Y.Sato and H.Oda, “Spring Frame Modeling and Synthesis of Human Face Based on Muscles of Expression,” Proc. of Picture Coding Symposium, pp. 4.1-4.2, 1988.
- [22] 足立裕昭, 田中弘美, “ホモボピー掃引法に基づく曲面変形を用いた口唇表情の生成,” 情報処理 CVIM109-11, pp.81-88 Jan. 1998.
- [23] 金子正秀, 羽鳥好律, 小池 淳, “形状変化の検出と 3 次元形状モデルに基づく顔動画像の符号化,” 信学論 B, Vol.J71-B, No.12, pp.1554-1563, Dec. 1988.
- [24] 情報処理振興事業協会 (IPA), “感性擬人化エージェントのための顔情報処理システムの開発,” <http://www.tokyo.image-lab.or.jp/aa/ipa/>
- [25] T.Kanade, “Picture processing system by computer complex and recognition of human faces,” Doctor thesis, Kyoto University, 1973.
- [26] 金出武雄, “人の同定のための画像処理,” 電子通信学会誌, Vol.59, No.11, pp.1278-1285, Nov. 1976.

- [27] 長尾 真, “画像認識論,” コロナ社, 1983.
- [28] 長尾 真, 大山 正, “コンピュータのパターン認識,” 東京大学出版会, 1985.
- [29] 小杉 信, “モザイクとニューラルネットを用いた顔画像の認識,” 信学論 D-II, Vol.J76-D-II, No.6, pp.1132-1139, June 1993.
- [30] 上野邦和, 加藤雅弘, 中村納, 南敏, “等濃線分布に基づく正面顔画像の識別,” 信学論 D-II, Vol.J76-D-II, No.3, pp.494-506, March 1993.
- [31] T.Kurozumi, Y.Shinza, Y.Kenmochi and K.Kotani, “Facial Individuality and Expression Analysis by Eigenspace Method based on Class Features or Multiple discriminant Analysis” IEEE ICIP 99, Vol.I, pp.648-652, Oct. 1999.
- [32] 赤松 茂, 佐々木 努, 深町映夫, 末永康仁, “濃淡画像マッチングによるロバストな正面顔の識別法 ~ フーリエスペクトルの KL 展開の応用 ~,” 信学論 D-II, Vol.J76-D-II, No.7, pp.1363-1373, July 1993.
- [33] R.Brunelli and T.Poggio, “Face recognition: features versus templates,” IEEE Trans. on PAMI, Vol.15, No.10, pp.1042-1052, Oct. 1993.
- [34] 土居元紀, 陳 謙, 眞溪 歩, 大城 理, 佐藤宏介, 千原國宏, “顔画像照合による解錠制御システム,” 信学論 D-II, Vol.J80-D-II, No.8, pp.2203-2208, Aug. 1997.
- [35] 本田明子, 小谷一孔, “フラクタル分析による顔画像の特徴抽出,” 信学技報 IE96-104, pp.43-48, Dec. 1996.
- [36] 横山太郎, 呉海元, 谷内田正彦, “色彩画像からの顔の発見と顔部品の同定,” 情処学研報, CVIM100-11, pp.85-92, May 1996.
- [37] Z.Prochazka, 伊藤崇之, 岡本敏雄, “顔の動き特徴量を用いた表情認識システム,” 信学技報 HIP96-42, March 1997.
- [38] 小林 宏, 高橋久憲, 菊地耕生, “顔器官輪郭の自動抽出と表情認識の自動化,” 信学技報 PRMU99-138, pp.37-42, 1999.
- [39] 石川貴博, 世良 元, 森島繁生, “ニューラルネットワークに基づくマーカ移動量からの顔面筋パラメータの推定,” 信学技報 HCS96-48, pp.29-36, 1997.

- [40] 松野勝弘, 李 七雨, 辻 三郎, “ポテンシャルネットとKL 展開を用いた顔表情の認識,” 信学論 D-II, Vol.J77-D-II, No.8, pp.1591-1600, Aug. 1994.
- [41] 武藤淳一, 藤井英史, 森島繁生 “空間周波数に基づく顔器官の形状認識と再合成,” 情処研 CVIM, No.110-007, 2001.
- [42] 村田 彰, 羽飼直記, 本郷仁志, 加藤邦人, 山本 和彦 “形状変化に強い目・口領域抽出方法の提案,”
http://www.yam.info.gifu-u.ac.jp/~takeshi/murata_home/profile/kenkyu3.html
- [43] 大塚尚宏, 大谷 淳, 中津良平, “連続出力確率密度分布を用いた HMM による動画像からの複数人物の表情認識,” 信学論 D-II, Vol.J80-D-II, No.8, pp.2129-2137, Aug. 1997.
- [44] 小林 宏, 原文雄, “リカレントネットワークによる動的表情認識,” 信学会 秋期全国大会, A-158, 1992.
- [45] “眼鏡 (眼鏡業界向け月刊紙),” HOYA 株式会社.
- [46] あさひ銀行株式会社, “眼鏡小売業が変わる,”
<http://www.asahibank.co.jp/corporation/businessplaza/200108/plaza010802.html>
- [47] ジャストシステム株式会社, “南伸坊の顔あそび,”
<http://www.justsystem.co.jp/news/961/news/j9610171.html>
- [48] 山田博三, 筒井啓輔, “弾性エッジ列整合法が多輪郭化による顔部品の位置決め,” 信学論 D-II, Vol.J80-D-II, No.8, pp.2239-2244, Aug. 1997.
- [49] Y.DAI and Y.Nakano, “Recognition of Facial Images with Low Resolution Using a Hopfield Memory Model,” Pattern Recongition, Vol.31, No.2, pp.159-167, 1998.
- [50] 今泉大輔, 杉山 将, 小川英光, “Subspace Information Criterion による画像復元フィルタのパラメータ最適化,” 信学技報 PRMU2000-243, pp.153-160, March 2001.
- [51] 松下晃久, “ガウス性ノイズによる劣化画像の復元に関する研究,”
<http://joho.densi.kansai-u.ac.jp/isp/gauss-j.html>
- [52] 今井英幸, 桜井裕仁, 佐藤義治, “正則化画像復元法のパラメータ選択について,”
http://isw.main.eng.hokudai.ac.jp/~imai/Tech_Rep/TR-2001-1.pdf

- [53] 井添 慎太郎, 剣持雪子, 小谷一孔, “画像のフラクタル性に基づいたカーネル主成分分析による遮へい領域の原画像推定,” 信学技報 PRMU2001-106, pp.55-62, Oct. 2001.
- [54] 天野敏之, 井口征士, “固有空間法を用いた BPLP による画像補間,” MIRU2000, pp.I217-I222, July 2000.
- [55] 八木伸行, 井上誠喜, 林 正樹, 中須英輔, 三谷公二, 奥井誠人, 鈴木正一, 金次保明, “C 言語で学ぶ実践画像処理,” オーム社, 1992.
- [56] 九州工業大学 情報工学部 制御システム工学科 緒方研究室 “Hough 変換を用いたノイズ除去の流れ,”
<http://keyaki-www.ces.kyutech.ac.jp/IP/Process3/fourier.html>
- [57] 萩原和浩, 加藤誠巳, “ベジェ曲面によるメガネの形状表現とそのメガネオーダメイドシステムへの応用,” 情処論, Vol.36, No.11, pp.2642-2652, Nov. 1995.
- [58] K.Ohzeki, T.Saito, M.Kaneko, H.Harashima, “Interactive Model-based Coding for Non-realtime Environment,” Proc. of Picture Coding Symposium '96, pp.663-668, March 1996.
- [59] 大関和夫, 齊藤隆弘, 金子正秀, 原島 博, “顔動画のインタラクティブ知的符号化におけるローカル動き検出と眼鏡画像処理,” 情処論, Vol.39, No.7, pp.2134-2148, July 1998.
- [60] L.Sirovich and M.Kirby, “Low-dimensional procedure for characterization of human faces,” J. Opt. Soc. America A, Vol.4, No.3, pp.519-524, March 1987.
- [61] L.Sirovich and M.Kirby, “Application of the Karhunen-Loeve Procedure for the Characterization of Human Faces,” IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.12, No.1, pp.103-108, Jan 1990.
- [62] 永田明德, 岡崎 透, 崔 昌石, 原島 博, “主成分分析による顔画像の基底生成と空間記述,” 信学論 D-II, Vol.J79-D-II, No.7, pp.1230-1235, July 1996.
- [63] 齋藤康之, 剣持雪子, 小谷一孔, “眼鏡顔画像の基底ベクトルの解析,” 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, 115-4, pp.25-32, March 1999.

- [64] 齋藤康之, 剣持雪子, 小谷一孔, “領域を限定した顔画像集合の基底ベクトルを用いた眼鏡無し顔画像の再構成,” 電子情報通信学会 総合大会, D-12-76, p.249, March 1999.
- [65] Y. Saito, Y.Kenmochi and K.Kotani, “Estimation of Eyeglasses Facial Images Using Principal Component Analysis,” Proc. of IEEE Inter. Conf. on Image Processing '99, Vol.4, pp.197-201, Oct. 1999.
- [66] 石井健一郎, 上田修功, 前田英作, 村瀬 洋, “わかりやすいパターン認識,” オーム社, 1998.
- [67] 鳥脇純一郎, “認識工学,” コロナ社, 1993.
- [68] 野牧文子, “すてきなメイクアップ,” ナツメ社, 1995.
- [69] 安居院 猛, 長尾智晴, “画像の処理と認識,” 昭晃堂, 1992.
- [70] 飯島泰蔵, “パターン認識,” 森北出版, 1989.
- [71] M.Kass, A.Witkin and D.Terzopoulos, “Snakes: Active Contour Models,” International Journal of Computer Vision, 321-331, 1988.
- [72] 臼田尚志, 松尾啓志, 岩田 彰, “スネークモデルと多重解像度表現を用いた画像マッチング方式,” 信学技報 IE93-133, PRU93-140, pp.33-40, March 1994.
- [73] 白井良明, 谷内田 正彦, “パターン情報処理,” オーム社, 1998.
- [74] 上田修功, 間瀬健二, 末永康仁, “弾性輪郭モデルとエネルギー最小化原理による輪郭追跡手法,” 信学論 D-II, Vol.J75-D-II, No.1, pp.111-120, Jan. 1992.
- [75] 坂口嘉之, 美濃導彦, 池田克夫, “SNAKE パラメータの設定についての検討,” 信学技報 PRU90-21, pp.43-49, 1990.
- [76] 坂上勝彦, 山本和彦, “動的な網のモデル Active Net とその領域抽出への応用,” テレビジョン学会誌, Vol.45, No.10, pp.1155-1163, 1991.
- [77] 荒木昭一, 横矢直和, 岩佐英彦, 竹村治雄, “複数物体の抽出を目的とした交差判定により分裂する動的輪郭モデル,” 信学論 D-II, Vol.J79-D-II, No.10, pp.1704-1711, Oct. 1996.

- [78] 白川英隆, 長尾智晴 “遺伝的手法による画像中の左右対象領域の抽出,” 信学技報 PRU95-161, pp.19-24, Nov. 1995.
- [79] 中嶋正之, 安居院 猛, 春松光男, “高速道路における先行車の同定と追跡に関する検討,” 情処論, Vol.27, No.7, pp.663-670, July 1986.
- [80] 横山太郎, 八木康史, 谷内田 雅彦, 吳 海元, “顔の軸対称性を考慮した顔輪郭の自動抽出,” 信学論 D-II, Vol.J80-D-II, No.8, pp.2178-2185, Aug. 1997.
- [81] 新井朝雄, “対称性の数理,” 日本評論社, 1993.
- [82] 伊庭斉志, “遺伝的アルゴリズムの基礎 ~ GA の謎を解く ~,” オーム社, 1994.
- [83] 北野宏明, “遺伝的アルゴリズム,” 産業図書, 1993.
- [84] Y.Davidor (大橋弘忠, 濱岡 豊 共訳), “遺伝的アルゴリズム,” 培風館, 1996.
- [85] 米澤保雄, “遺伝的アルゴリズム ~ 進化理論の情報科学 ~,” 森北出版, 1993.
- [86] 奥村晴彦, “C 言語による最新アルゴリズム事典,” 技術評論社, 1991.
- [87] 村瀬 洋, S.K.Nayar, “2 次元照合による 3 次元物体認識 -パラメトリック固有空間法-,” 信学論 D-II, Vol.J77-D-II, No.11, pp.2179-2187, Nov. 1994.
- [88] 糸井素一, 所敬, 西信元嗣, 山崎弘仁, 長谷川弘 “眼鏡,” メディカル葵出版, 1986.
- [89] “THE COLLECTION '96,” 名古屋眼鏡, 1996.
- [90] “女性セブン,” 小学館, 7 月 12 日号, 2001.
- [91] 齋藤 康之, 剣持 雪子, 小谷 一孔, “パラメトリック眼鏡フレームモデルを用いた眼鏡顔画像からの眼鏡領域の抽出と除去,” 信学論 D-II, Vol. J82-D-II, No. 5, pp.880-890, May 1999.
- [92] 桜井明監修, “C によるスプライン関数 データ解析/CG/微分方程式,” 東京電機大学出版局, 1993.
- [93] 有本卓, “信号・画像のデジタル処理,” 産業図書, 1980.

- [94] J.Miao, B.Yin, K.Wang, L.Shen and X.Chen, “A hierarchical multiscale and multi-angle system for human face detection in a complex background using gravity-center template,” *Pattern Recognition*, Vol.32, pp.1237-1248, 1999.
- [95] J.Hu, H.Yan and M.Sakalli, “Locating head and face boundaries for head-shoulder images,” *Pattern Recognition*, Vol.32, pp.1317-1333, 1999.
- [96] H.A.Rowley, S.Baluja and T.Kanade, “Neural Network-Based Face Detection,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.20, No.1, pp.23-38, Jan 1998.
- [97] K.Sung and T.Poggio, “Example-Based Learning for View-Based Human Face Detection,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.20, No.1, pp.39-51, Jan 1998.
- [98] 小杉 信, “個人識別のための多重ピラミッドを用いたシーン中の顔の探索・位置決め,” *信学論 D-II*, Vol.J77-D-II, No.4, pp.672-681, April 1994.
- [99] 上木伸夫, 森島繁生, 山田 寛, 原島 博, “多層ニューラルネットによって構成された感情空間に基づく表情の分析・合成システムの構築,” *信学論 D-II*, Vol.J77-D-II, No.3, pp.573-582, March 1994.
- [100] 須賀弘道, 羽鳥好律, 樽松 明, “眼鏡を含む顔画像からの構成部品の抽出,” *映像情報メディア学会誌*, Vol.51, No.10, pp.1781-1784, 1997.
- [101] 角 保志, 大田友一, “分散型 2 次元見え方モデルに基づく顔画像の解析,” *信学論 D-II*, Vol.J77-D-II, No.12, pp.2342-2452, Dec. 1994.
- [102] 島村和典, 志和新一, 神 力, 安田 浩, “視線一致動画ウインドウインターフェースの開発,” *テレビジョン学会誌*, Vol.45, No.1, pp.101-104, Jan. 1991.
- [103] 山口 剛, 富永将史, 興水大和, 村上和人, “Hough 変換を用いた瞳認識と Eye-contact Camera への応用,”
http://www.koshi-lab.sccs.chukyo-u.ac.jp/jface-edit/forum_sample.pdf

- [104] Mitsuru Ishizuka and Hiroshi Dohi, “Multimodal Anthropomorphic Agent Connected with WWW Information Space,”
<http://www.miv.t.u-tokyo.ac.jp/~ishizuka/nec-symp98/necsymp98.html>
- [105] B.B.Mandelbrot, “The Fractal Geometry of Nature,” Freeman, San Francisco, 1982.
- [106] S.Peleg, J.Naor, R.Hartly and D.Avnir, “Multiple Resolution Texture Analysis and Classification,” IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.6, No.6, pp.518-523, July 1984.
- [107] 鄭 且根, 相澤清晴, 斎藤隆弘, 羽鳥光俊, “フラクタル次元に基づく適応的エッジ検出,” 信学論 D-II, Vol.J76-DII, No.11, pp.2459-2563, Nov. 1993.
- [108] 前田純治, 南條英一, “フラクタル次元とエッジ情報の統合による自然画像のセグメンテーション,” 信学論 D-II, Vol.J78-D-II, No.11, pp.1726-1729, Nov. 1995.
- [109] K.Sugimoto, F.Tomita, “Detection of Skewed-Symmetrical Shape,” IEEE ICIP 94, pp.696-700, 1994.
- [110] 堤 正平, 中島真人, “3次元濃淡顔画像を用いた個人照合 ～顔の向きにおける制約条件の緩和～,” 信学技報 PRMU97-49, pp.9-16, 1997.
- [111] R.Corson (梅田晴夫 訳), “メガネの文化史 ～ファッションとデザイン～,” 八坂書房, 1999.
- [112] 東京メガネ株式会社, “眼鏡の進歩,”
<http://www.tokyomegane.co.jp/history/sinpo.html>
- [113] めがねのプリンス株式会社, “眼鏡の豆知識,”
<http://www.prince-eyeland.co.jp/global2.htm>
- [114] 糖尿病ネットワーク事務局, “眼鏡とコンタクトレンズ,”
<http://www.so-net.ne.jp/vivre/soshin/meto/06/0602.htm>
- [115] 眼鏡フレームオープンデータベース推進協議会, “眼鏡博物館,”
<http://www.ofdb.gr.jp/museum.htm>

[116] 新見眼科, “目の事典,”

<http://www.ocular.net/jiten/content1.htm>

[117] 医療法人 樹徳会, “眼鏡のレンズ種類,”

http://www.jutoku.com/megane_renzu_furemu.html

論文

- [1] 齋藤康之, 剣持雪子, 小谷一孔, “パラメトリックな眼鏡フレームモデルを用いた顔画像内の眼鏡フレーム領域の抽出と除去,” 電子情報通信学会 論文誌 D-II, Vol. J82-D-II, No. 5, pp.880-890, May 1999.
- [2] 齋藤康之, 剣持雪子, 小谷一孔, “顔画像の基底ベクトルを用いた眼鏡なし顔画像の推定,” 電子画像学会 学会誌, (採録決定・2002年5月号掲載予定).

国際会議

- [1] Y.Saito and K.Kotani, “Extraction and Removal of Eyeglasses for Region Segmentation of Facial Images Using Eyeglasses Model,” Picture Coding Symposium '97, pp.497-502, Sep. 1997.
- [2] Y.Saito, Y.Kenmochi and K.Kotani, “Estimation of Eyeglasses Facial Images Using Principal Component Analysis,” IEEE Inter. Conf. on Image Processing '99, Vol.4, pp.197-201, Oct. 1999.
- [3] Y.Saito, Y.Kenmochi and K.Kotani, “Extraction of a symmetric object for eyeglass face analysis using active contour model,” IEEE Inter. Conf. on Image Processing 2000, Vol.II, pp.231-234, Sep. 2000.

口頭発表

- [1] 齋藤康之, 本田明子, 小谷一孔, “眼鏡を含む顔画像の表情解析 -眼鏡除去と領域抽出-,” 映像情報メディア処理シンポジウム (IMPS96), I-6.11, pp.25-26, Oct. 1996.
- [2] 齋藤康之, 小谷一孔, “眼鏡顔画像における眼鏡フレーム領域の抽出と除去,” 電子情報通信学会 ヒューマン情報処理研究会, HIP96-33, pp.49-54, Jan. 1997.
- [3] 齋藤康之, 小谷一孔, “顔画像領域分割における眼鏡の影響の除去,” 映像情報メディア学会 年次大会, 30-1, pp.371-372, July 1997.
- [4] 齋藤康之, 小谷一孔, “眼鏡フレーム構造のパラメトリックモデルを用いた顔画像内の眼鏡領域の抽出と除去,” 電子情報通信学会 画像工学研究会, IE97-121, pp.55-60, Dec. 1997.
- [5] 齋藤康之, 小谷一孔, “顔の傾きに対応した眼鏡フレーム領域の抽出と除去,” 映像情報メディア学会 年次大会, 27-7, pp.416-417, Aug. 1998.
- [6] 齋藤康之, 剣持雪子, 小谷一孔, “眼鏡顔画像の基底ベクトルの解析,” 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, 115-4, pp.25-32, March 1999.
- [7] 齋藤康之, 剣持雪子, 小谷一孔, “領域を限定した顔画像集合の基底ベクトルを用いた眼鏡無し顔画像の再構成,” 電子情報通信学会 総合大会, D-12-76, p.249, March 1999.
- [8] 齋藤康之, 剣持雪子, 小谷一孔, “非線形射影による画像推定法の検討 ~眼鏡顔画像からの眼鏡フレーム領域の抽出と顔画像推定~, ” 電子情報通信学会 パターン認識・メディア理解研究会, PRMU2001-98, pp.29-36, Sep. 2001.

第一著者以外の発表

- [1] 本田明子, 齋藤康之, 小谷一孔, “局所的テクスチャ解析による顔画像の領域抽出,” 日本顔学会 フォーラム顔学 96, p.18, Aug. 1996.
- [2] 本田明子, 齋藤康之, 小谷一孔, “フラクタル特徴解析による顔画像の領域抽出,” 電子情報通信学会 システムソサイエティ大会, D-327, p.330, Sep. 1996.
- [3] 黒住隆行, 齋藤康之, 剣持雪子, 小谷一孔, “固有空間法と重判別分析を用いた顔画像の表情解析,” 映像メディア処理シンポジウム (IMPS98), pp.13-14, Oct. 1998.
- [4] Y.Shinza, Y.Saito, Y.Kenmochi and K.Kotani, “Facial expression analysis by integrating information of feature-point positions and gray levels of facial images,” IEEE Inter. Conf. on Image Processing 2000, Vol.I, pp.466-469, Sep. 2000.