

目標モデル形状に基づく顔陰影編集システム

System for Editing Facial Shading based on Model Shape

正会員 高井 勇志[†], 正会員 石垣 智子[†], 松山 隆司[†]

Takeshi Takai[†], Tomoko Ishigaki[†] and Takashi Matsuyama[†]

Abstract Facial information is a principal component in nonverbal communication, and it gives a wide variety of impressions to the observer. If we can clarify the relationships between facial information and impression, we would be able to easily input the right visual information on a face and thus manipulate impression given from a facial expression. We focused on the shading on the face. Although the ability to control the perceived shape by manipulating shading, e.g., through makeup, qualitatively evaluating this has not been easy. To find a way to do this, we developed a system for editing shading on a face by using shading generated from a target model with a known 3-D shape. We have also developed a qualitative method to evaluate the relationship between the shading and the perceived shape. We first describe the system in detail, and then demonstrate how it is effective at providing both qualitative and quantitative evaluations from real images.

キーワード：顔陰影，知覚法線ベクトル，化粧，Shape from makeup

1. ま え が き

1.1 研究背景

我々は他者とのコミュニケーションにおいて、相互の意図や内部状態を言語情報だけでなく非言語情報も含めて総合的に判断している。このような言葉によらないコミュニケーションには、身振り手振りや相槌などがあり、特に重要なチャンネルの一つとして顔情報が挙げられる¹⁵⁾。人は顔から多くの情報を得ているが、本論文では、この人が受ける顔情報を、顔そのものが持っている静的な構造である容貌と動的に変化する表情の二つに分け、前者を議論の対象とする。

言語情報と同程度に容貌から受ける印象が重要な意味を持つ代表的な例として、履歴書に添える写真が挙げられる。顔写真の撮影には蓄積されたノウハウがあり、良い印象を受け手に与えるように、以下に挙げる手法を凝らしながら撮影を行っている¹⁰⁾¹¹⁾。

- 手法 1: 顔周りの照明環境を調整する⁵⁾⁶⁾¹²⁾。
- 手法 2: 顔に化粧を施す⁹⁾¹³⁾。

手法 1 では、顔表面の幾何学的特徴によって生じる陰影を複数の光源や反射板によって制御し、その陰影変化によって容貌を変化させている。一方、手法 2 では、目鼻口の輪郭を修正することによる直接的な形状変化もあるが、ファ

ンデーションやアイシャドウなどを用いて陰影を変化させることによって、物体・光源間における物理的制約に縛られない間接的な形状変化を生じさせて顔印象を操作している。つまり、顔表面の陰影を変化させる手法によって受け手がとらえる容貌を変化させることが可能であり、また、この容貌の変化によって顔印象を操作することが可能であると言える。本論文では、この陰影効果による形状の見えの変化に着目し、目標とする顔形状から生成した陰影を顔表面に与えることによって、実際の顔形状を変形させることなく、その容貌が目標顔に近づくように編集を行う顔陰影編集システムを提案する(図 1)。また、この陰影編集による形状変化を定量的に評価する方法についても述べ、本システムの定性的・定量的評価を行う。

1.2 顔陰影と顔形状の見えの関係

陰影と形状は密接な関係にあり、コンピュータビジョンの分野において、陰影から対象物体の 3 次元形状を復元する方法は数多く提案されている⁴⁾。一般にこれらの方法を用いると、既知の光源環境下(つまり光源の位置や照射方向、放射強度が既知)において撮影された対象表面に表れ

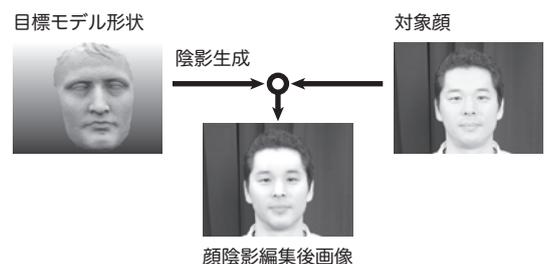


図 1 目標モデル形状に基づく顔陰影編集
Facial shading editing aiming at a model shape.

2008 年 10 月 11 日メディア工学研究会で発表²¹⁾

2010 年 10 月 25 日受付, 2011 年 3 月 14 日再受付, 2011 年 5 月 11 日採録

[†]京都大学 大学院 情報学研究所

(〒 602-8501 京都府京都市左京区吉田本町, TEL 075-753-5058)

[†]Graduate School of Informatics, Kyoto University

(Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 602-8501, Japan)

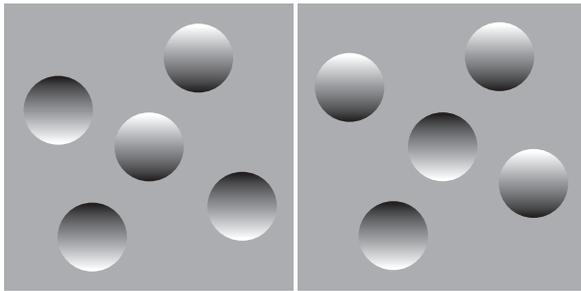


図2 人の形状知覚と陰影の関係

Illusion of convex and concave (shape from shading).

右図は左図を 180 度を回転させたものである。なお、この画像を 90 度回転させると凹凸を感じなくなる。

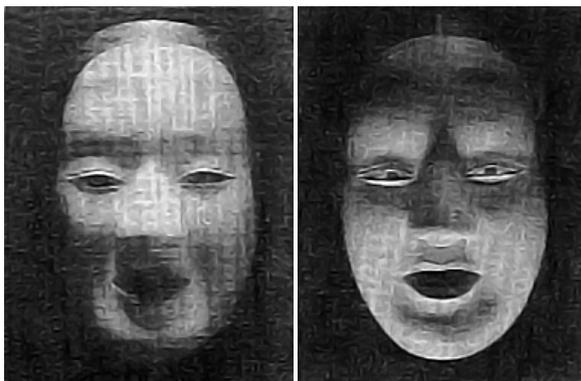


図3 照明方向による能面の表情の違い(文献 18)より引用)

Differences of appearance of Noh mask (Cited from Suzuki¹⁸⁾).

る陰影から、その 3 次元形状を算出することができる。

では、人が陰影を見たときに感じる形状についてはどうだろうか。ここで、図 2 に着目する。この図は平面上の円に白から黒へ単調に変化する濃淡付けを行ったものである。光源環境に関する情報は図には全く示されていないが、上部が白い円は出っぱった球体に見え、上部が黒い円はクレーターのように入った穴に見える。単純に陰影のみからでは、上方から凸物体を照らしているのか、下方から凹物体を照らしているのかは区別できないはずのだが、左右両画像中央の円は、左画像については凸物体に、右画像については凹物体に見え、これを逆に解釈するのは困難である。このように、人が陰影から形状知覚を行う際には、対象物体より上部に光源が存在することを無意識に想定していることがわかる³⁾。この現象は顔の形状知覚にも大きな影響を与えている。例えば、図 3 の能面が示すように、形状に変化がなくとも光の当たり方の違いから受ける印象は全く異なっている。特に、下方向からの照明では他方向に比べて恐怖を感じるという結果が示されている¹⁸⁾が、これは、我々の普段の生活では体験することの少ない下方向からの照明によって、普段見慣れているものとは異なる凹凸を顔表面の陰影より知覚するためだと考えられる。これらのことから、人は対象者の顔陰影を見たときに、上方からの照明によって照らされていることを無意識に想定して形状知覚を行っていると考えて良いだろう。

上記の現象を利用し、実際の顔形状を変化させずに知覚される形状(知覚形状)を変化させる方法の一つが、顔表面の明度を変化させる化粧である。化粧は、直接顔形状を操作する美容整形と異なり、肉体的なリスクがほとんどないために広く利用されている容貌の編集方法である。多くの女性が一般的に好んで用いるのは、凹凸を強調して見せる化粧であり、例えば、アイシャドウを目の凹部分に載せることによってその部分を強調し、鼻筋にハイライトを載せることによって凸部分を強調する方法である⁹⁾¹³⁾。このように陰影を強調することによって、相対的に彫りが深くなったように受け手が知覚することを期待している²²⁾。美容整形と異なり、対象者の目標(鼻を 5mm 高く、など)を明示的に達成しているとはいえないが、失敗してもやり直せる手頃さが美容整形と異なる強みとして挙げられる。

1.3 関連研究と本研究の位置づけ

顔表面の陰影と印象に関してはいくつかの先行研究が行われており、これらを大きく分けると二つの分析視点が挙げられる。一つは、照明に対する対象顔の角度を変化させることによって、顔表面の陰影を変化させるという観点から分析したものである。鈴木らは、能面の感情表現が顔の角度によって演じ分けられていることに着目し、能面の顔の角度が表情認知に及ぼす影響を指摘した¹⁸⁾。また尾田は、人の顔情報を用いて同様の研究を行った²⁰⁾。しかし我々は、一般的に悲しいときにうなだれ、誇り高く感じたときに顔を上に向けることがしばしばあり、尾田は印象変化をもたらした要素が顔の角度変化によって生じた顔表面の陰影によるものなのか、顔の角度に対する受け手の経験則によるものなのかを結論付けるには至らなかった。

もう一つの分析視点として化粧による陰影変化が挙げられ、文献 7)16)23)では化粧による印象の変化について述べられている。これらに共通するのは、アイシャドウによる目の周りの陰影変化が、容貌の変化に重要な影響を及ぼすと述べられている点である。確かに「目は口ほどに物を言う」という言葉にもあるように、目が容貌に占める割合は大きなものであると言えるだろう。これらの研究の問題点は、顔の角度や化粧が顔表面の陰影に変化をもたらし、これが受け手の印象に及ぼす影響について示唆されているものの、陰影変化がもたらした影響の定量的な評価がなされていないため、印象変化が受け手の何らかの経験則を踏まえたものによるのか、純粋な陰影変化のみから得られるものなのか、についての判断が困難であることである。顔陰影と容貌の関係について明確な議論を行うためには、陰影変化による容貌変化を定量的に評価できることが望ましい。また、近年化粧に対して計算機科学に基づくアプローチが研究されており、デジタルメイクシステムとしていくつかの手法が提案されている⁸⁾¹⁴⁾¹⁷⁾¹⁹⁾。したがって、アイシャドウなどの化粧による陰影効果を定量的に扱うシステムは、デジタルメイクシステムの発展にも大きく貢献できると考えられる。

以上より、本研究では、この化粧によって実現されるような陰影と知覚形状の関係をj用いて、間接的に顔の3次元形状を編集するシステムを構築する。ただし、一般に、化粧による容貌の変化を定量的に扱うことは難しく、また目標とする知覚形状になるような化粧を施すことも技術的に容易ではない。そこで本論文では、目標とする3次元形状を持つモデルを用意し、この目標モデルの形状から得られる陰影を用いて容貌編集を行う。これによって、陰影と形状の関係を定量的に扱うことが可能となるため、評価を明確に行うことができる。この際、顔の角度や表情など、陰影以外の要因による形状の変化が生じないようにするために、本論文で扱う対象者の顔画像は無表情の正面顔のみとし、これを用いて評価と議論を行う。

2. 顔陰影編集システム

2.1 用語の定義

本編集システムについて説明するため、下記の用語を定義する。

陰影 物体表面上の点 P での陰影を $S(P)$, ($0 \leq S(P) \leq 1$) と表す。

テクスチャ 物体表面上の点 P でのテクスチャを $T(P)$, ($0 \leq T(P) \leq 1$) と表す。

放射輝度 物体表面上の点 P での放射輝度を $R(P)$ と表す。本研究では、対象顔や後述する参照球の表面は完全拡散反射であると仮定するため、 $R(P) = S(P) T(P)$ が成り立つものとする。

画像輝度 物体表面上の点 P が撮影画像上の画素 p に投影されるとすると、その輝度値 $I(p)$ は $I(p) = \alpha R(P)$ と書ける。本論文では記述を簡単にするため、 $\alpha = 1$ であるとし、また、点 P と画素 p は1対1に対応とする。つまり、 $I(p) = R(P)$ という関係が成り立つものとして議論を進める。

2.2 アルゴリズム

本システムの処理の流れを図4に示す。撮影対象の顔画像に陰影編集を施すには、目標となる陰影画像(目標陰影画像 I_M^S)と、撮影した対象顔から撮影時の光源環境によって生じる陰影を取り除いた画像(対象顔テクスチャ画像 I_O^T)が必要となる。

目標陰影は、目標モデルの3次元形状 G_M と、一般化光源環境(詳細は後述)によって生成される(処理I)。一方、対象顔テクスチャは、対象顔画像 I_O^A 、対象顔の3次元形状 G_O 、および、参照球より生成される(処理II)。以上の処理によって生成された画像を用い、処理IIIによって最終的な結果である陰影編集済対象顔画像 \tilde{I}_O^A が生成される。

(1) 目標陰影画像生成(処理I)

まず目標モデルの3次元形状 G_M を3Dデジタルイザを用いて獲得し、次にこの形状に対して何らかの光源環境 L を用いて目標陰影画像 I_M^S の生成を行う。ここで、この陰影は目標モデルの凹凸を適切に反映している必要があるた

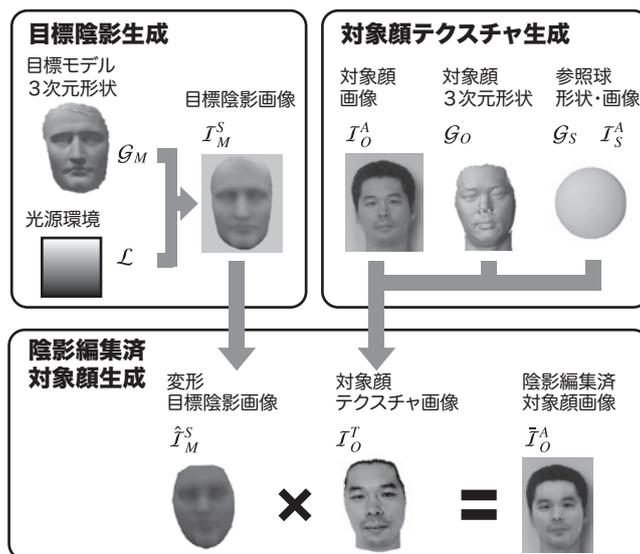


図4 陰影編集処理の流れ
Process flow of editing of facial shading.

め、光源環境設計の際、陰影から受ける形状知覚に関する知見(1.2節)を利用する。つまり、我々が自然に感じる上方より光が照射される光源環境を用いることによって、目標モデルの3次元形状を持つ凹凸を知覚させる陰影が生成できる。

ここで単純に天頂に光源を配置した光源環境で目標モデルを照射すると、あたかも宇宙空間にいるような非常に強い影(shadow)が顔表面に生成されてしまい不自然となる。我々が普段見慣れている陰影は、大気による散乱や相互反射によって全方位から照射される光によって生成された柔らかいものである。そこで、単純にこれを実現するには、3次元モデルの周囲に配置した多数の光源の放射強度を適切に変化させた光源環境を用いる方法が挙げられるが、本論文ではより簡便な方法として、アンビエントオクルージョンを利用した陰影付け*を用いて目標陰影画像を生成する。この処理によって得られる陰影は、形状の法線方向に依存するもの(額や頬、鼻の先など)と、形状に基づくセルフシャドウによるもの(眼の周囲や鼻の下など)によって構成されている。また、目標モデルの表面反射モデルについては、実際の肌近く、柔らかい影を生成する表面下散乱(subsurface scattering)モデルを用いる。

(2) 対象顔テクスチャ画像生成(処理II)

対象顔テクスチャ画像 I_O^T は、撮影された対象顔画像 I_O^A から撮影時の光源環境における陰影を除去することによって生成される。この処理を正確に行うためには、撮影時の光源環境を推定する必要があるが、一般光源環境を推定するのは容易ではない。そこでテクスチャのない白色の完全拡散反射面を持つと見なせる球体(陰影参照球)を用いて、その光源環境下での陰影を取得し、これを利用して対象顔画像からテクスチャと陰影を分離する。

* 天頂色を白、地平色を黒として陰影生成を行う。

まず始めに、3Dディジタイザを用いて対象顔の3次元形状 G_O を獲得し、同時に対象顔画像 I_O^A を撮影する。このとき、顔表面になるべくセルフオクルージョンが生じないような照明を設定しておく。また、参照球についても同様にその3次元形状 G_S と画像 I_S^A を獲得する。

さて、参照球上の点 P の放射輝度は、

$$R_S(P) = S_S(P) T_S(P) \quad (1)$$

と書ける。ここで、参照球の表面にはテクスチャがないことより $T_S = 1$ と置くと、

$$R_S(P) = S_S(P) \quad (2)$$

となる。 S_S は参照球表面の陰影を表しており、これは以下のように書き下せる。

$$S_S(P) = \int_{\Omega} L(P, \vec{\omega}) \vec{N}(P) \cdot \vec{\omega} d\omega \quad (3)$$

ここで、 $L(P, \vec{\omega})$ は $\vec{\omega}$ 方向の入射光の強度、 $\vec{N}(P)$ は点 P における法線ベクトル、 $\vec{N}(P) \cdot \vec{\omega}$ は法線ベクトルと入射光ベクトルの内積を示している。したがって、参照球を撮影した画像上の点 p の輝度値 $I_S^A(p)$ は以下のように書ける。

$$I_S^A(p) = R_S(P) = S_S(P) = \int_{\Omega} L(P, \vec{\omega}) \vec{N}(P) \cdot \vec{\omega} d\omega \quad (4)$$

一方、対象顔上の点 Q の放射輝度は以下のように表せ*、

$$R_O(Q) = S_O(Q) T_O(Q) (= I_O^A(q)) \quad (5)$$

参照球と同じ光源環境下にて対象顔を撮影した場合、その陰影 $S_O(Q)$ は、

$$S_O(Q) = \int_{\Omega} L(Q, \vec{\omega}) \vec{N}(Q) \cdot \vec{\omega} d\omega \quad (6)$$

と書ける。ここで、光源が無遠光源であると仮定すると、陰影は表面上の位置ではなく法線方向のみに依存することになる。そこで、もし $\vec{N}(Q) = \vec{N}(P)$ であるなら、

$$S_O(Q) = S_S(P) = I_S^A(p) \quad (7)$$

が成り立ち、参照球と対象顔それぞれの陰影を対応づけることができる。このようにして、対象顔の陰影を得た後、式(5)と式(7)より、以下のように対象顔テクスチャを求めることができる。

$$\begin{aligned} T_O(Q) &= R_O(Q)/S_O(Q) \\ &= R_O(Q)/S_S(P) \\ &= I_O^A(q)/I_S^A(p) \end{aligned} \quad (8)$$

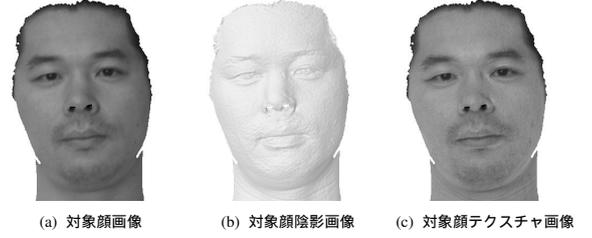


図5 対象顔テクスチャ画像の生成
Object's texture image generation.

図5に、対象顔画像と本アルゴリズムによって求めた対象顔陰影画像、対象顔テクスチャ画像を示す。なお、本アルゴリズムの実装においては、物体表面のサンプリング密度や計算誤差の影響によって、対象顔上の点と参照球上の点について、完全に一致する法線ベクトルが得られる保証はない。したがって、対象顔上の点と参照球上のすべての点における法線ベクトルの内積を求め、最も高い値をもつ点の組において式(7)が成立するとし、その点の輝度値を対象顔陰影とする。

(3) 陰影編集済対象顔画像生成(処理III)

処理Iによって得られた目標陰影を、処理IIによって得られた対象顔テクスチャに施すことによって、対象顔が本来持つ凹凸ではなく、目標モデルが持つ凹凸を反映した陰影を対象顔に与えることができる。

目標陰影画像 I_M^S の顔構造(目鼻などの位置)は、当然、対象顔とは異なっているため、陰影画像をそのまま対象顔テクスチャ画像 I_O^T に重畳することはできない。そこで、まず、両者の目鼻の位置などの特徴点をもとに目標陰影画像を変形し、対象顔画像と一致させた変形目標陰影画像 \hat{I}_M^S を生成する。

最終結果である陰影編集済対象顔画像 \tilde{I}_O^A は、 \hat{I}_M^S と I_O^T を用いて以下のように求められる。

$$\tilde{I}_O^A(i) = \Delta \hat{I}_M^S(i) I_O^T(i) \quad (9)$$

ここで、 i は画像上の点を示している。 $\Delta \hat{I}_M^S$ は \hat{I}_M^S より求められた陰影変化であり、以下の式より求められる。

$$\Delta \hat{I}_M^S(i) = \beta \{ \hat{I}_M^S(i) - \bar{I}_M^S \} + 1 \quad (10)$$

ここで、 β は与える陰影変化の強さを調節するパラメタであり、 \bar{I}_M^S は目標陰影画像 I_M^S の顔領域における輝度の平均値を示している。つまり、式(9)、式(10)によって、平均値より輝度値の高い点については凸感が強調され、逆に低い点については凹感が強調されることになる。

2.3 顔陰影編集システムの実験結果

(1) 撮影環境

男性、女性各一名ずつを顔陰影編集対象者とし(対象A、対象Bとする)、それぞれの顔の3次元形状 G_O を3Dディジタイザ(コニカミノルタ VIVID 910)を用いて計測した。対象顔画像 I_O^A については、3Dディジタイザにて同時に撮影されるカラー画像の解像度・画質が低いため、3

*セルフオクルージョンはないものとする。



(a) 対象 A (b) 対象 B

図 6 対象顔画像上の特徴点
Feature points on an object's face.

表 1 目標モデルの分類
Classification of models.

	若	中間	老
男性	Hermes	Napoleon	Gattamelata
女性	Girl	Venus	
	Jehanne Darc		
中性的		Miroku	

次元形状計測時に別のカメラ（ニコン D700）を用いて撮影した画像を用いた。この際必要となる対象顔画像と 3 次元形状との対応付けは、顔の特徴点をもとに手動で行った（選択した特徴点は図 6 を参照）。目標モデルには、性別や年齢の違う 7 体の石膏像を用いた（表 1, 図 7）。これらの石膏像を 3D デジタイザを用いて計測し、それぞれの目標モデル 3 次元形状 G_M を得た。

(2) 陰影編集済対象顔画像生成の結果

前節で獲得した目標モデルの 3 次元形状 G_M より、目標陰影画像 I_M^S を CG ソフト (Blender¹⁾) を用いて生成した* (図 7 下段)。これらの目標陰影画像を用いて陰影編集を行った結果を図 8 に示す（それぞれ、上段は変形陰影画像 \tilde{I}_O^S 、下段は陰影編集済対象顔画像 \tilde{I}_O^A である）。また、それぞれの下段 (h) には、参考のため未編集の対象顔画像を示している。なお、 \tilde{I}_O^A を生成する際の式 (10) における β の値は 0.5 とした。また、変形陰影画像を生成するために選択した特徴点は、前節にて選んだ点と同様である（図 6）。

実験に用いた目標モデルの多くは、目元の窪みが深く鼻梁が高い特徴を持っている。これらの特徴は明らかに対象に反映されており、陰影編集後の画像を見ると、鼻筋や額、頬が元画像より明るくなっていることより、凸感が強調されており、また、逆に目元は暗くなっているため、凹感が強調されている。男性像は女性像と比べると、頬や顎に骨格や筋肉による凹凸が多く、特に Gattamelata には多くの凹凸が見受けられる。この特徴も陰影画像に現れており、編集後の対象画像にも反映されていることがわかる。個々の像を見ると、Napoleon や Gattamelata に特徴的な顎の凹凸感や、Girl の特徴である大きく出た頬と小さくまとまった顎のラインが見て取れる。また、Hermes や Venus は他の像と比べて非常に鼻筋が通っているが、この特徴も陰影編集を行った対象画像から感じることができる。

以上の特徴が、程度の差はあるものの、対象 A, B 両方に現れており、本システムによって目標モデルの持つ陰影を対象顔上に反映させられることが確認できた。次節では、この陰影編集によって対象顔画像に目標モデルの形状がどのように反映されているのかについて定量的な評価を行う。

3. 陰影編集による形状変化の評価

3.1 知覚法線ベクトル

陰影編集による形状変化を定量的に評価するためには、陰影によって人が知覚する形状—本論文の場合は法線ベクトル—を、定量的に扱う必要がある。本論文では、この人が陰影から知覚する法線ベクトルを知覚法線ベクトルと名付ける。ここで、図 2 をもう一度解釈してみると、人は図中の陰影付きの円を見たときに、

- 凹球面或は凸球面の存在を想像し、
- 明度変化を法線ベクトルの天地方向の変化と対応**させることによって、形状、つまり知覚法線ベクトルを得ていると考えられる。

そこで、顔表面に施した陰影を見たときも同様のことが起きていると考える。つまり、人は、顔構造に関する知識を持っており、顔上の明度変化を法線ベクトルの天地方向の変化と捉えることによって、実際の形状とは異なる形状を感じているとする。以上を基に、知覚法線ベクトルについて次のような前提を立てる。

前提 1 知覚法線ベクトル $\vec{N}^p(P)$ の上方向成分は、陰影の明度に直接対応するものであるとする。

前提 2 人には顔の形状に関する知識があり、微少な陰影変化によって法線方向が極端に変化したと捉えることはないと仮定する。これはすなわち、元の対象顔の法線ベクトルを $\vec{N}(P)$ とすると、 $\vec{N}(P)$ と $\vec{N}^p(P)$ は極端には異なる、ということである。

ここで、この知覚法線ベクトルは、陰影生成に用いた目標モデルの形状は問わず、陰影の明度と編集対象の形状のみに基づいて求められるものであることに注意されたい。

以上の前提より、知覚法線ベクトル $\vec{N}^p(P)$ は次のように求められる。まず、水平方向を x 軸、垂直上方向を y 軸、顔正面方向を z 軸となるように座標系を定義する（図 9）。前提 1 より、 $\vec{N}^p(P)$ の上向き成分 $N_y^p(P)$ は、この点 P における陰影を用いて次式のように書ける。

$$N_y^p(P) = \Delta S(P) \quad (11)$$

ここで、 $\Delta S(P)$ は点 P における陰影変化値、つまり、顔陰影の平均値 $\bar{S}(P)$ から点 P の陰影値を引いたものであり、

$$\Delta S(P) = S(P) - \bar{S}(P) \quad (12)$$

とする。この式を満たすベクトルは、図 9 中の円錐の側面上に存在する。前提 2 より、この側面上に存在するベクトル

* Ambient Occlusion を有効にし、目標モデルの Material は Subsurface Scattering の Skin2 を用いた²⁾。

** 1.2 節にて述べたように、上方に光源があることを無意識に仮定している。

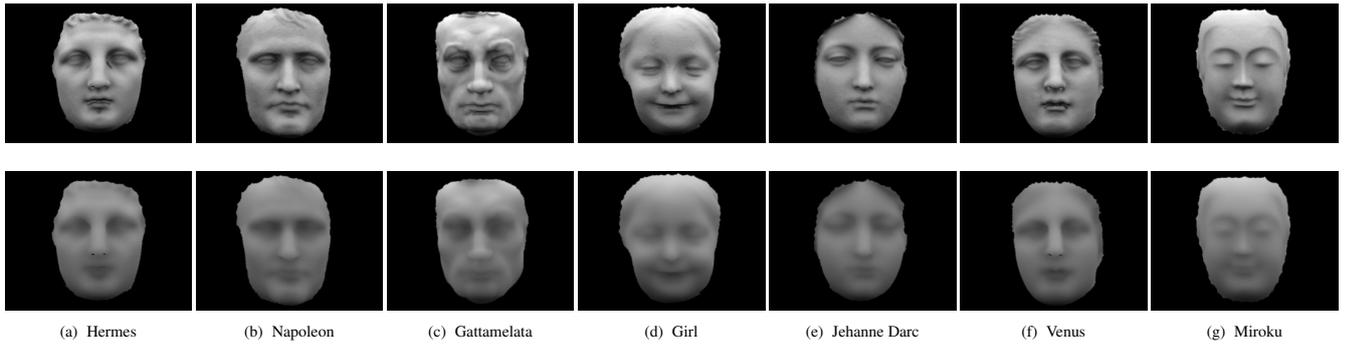


図7 目標モデルの形状と陰影画像
Images of target models' shapes and shading.

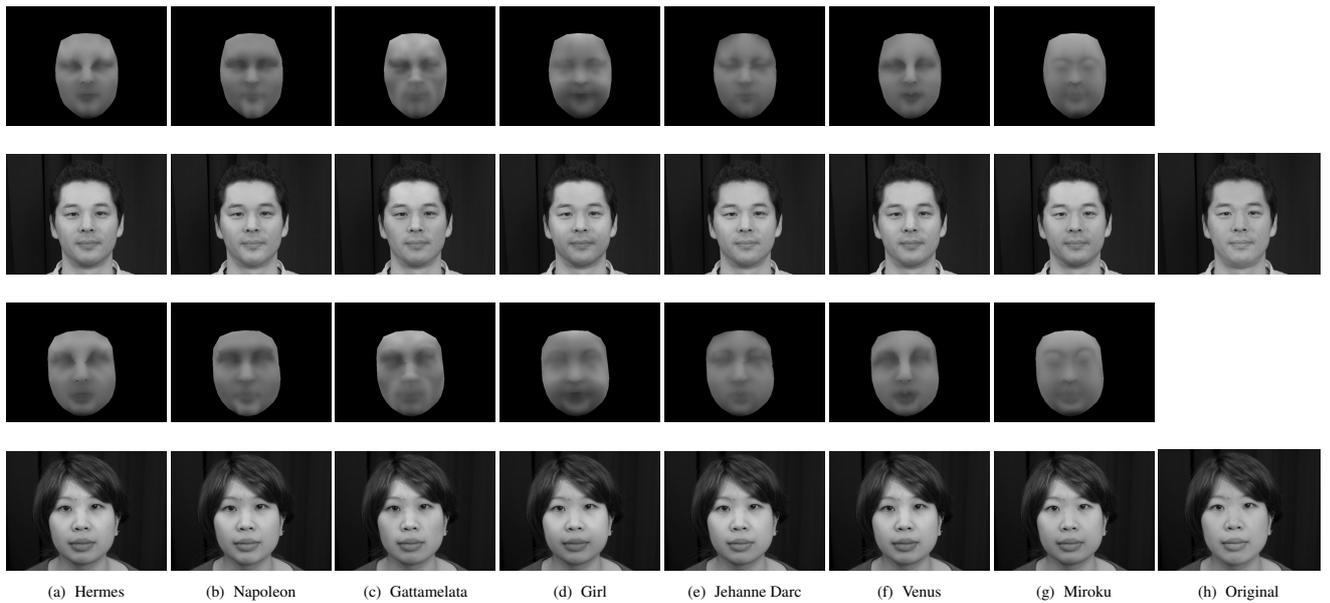


図8 変形目標陰影画像と編集済対象顔画像
Images of deformed target model's shading and edited object's face.

ルの中で、最も元の法線ベクトルに近いものが、知覚法線ベクトルである。以上をまとめると、ノルムが1となり、式(11)を満たし、上向きベクトル $\vec{U} = (0, 1, 0)$ と $\vec{N}(P)$ がなす平面上にあるベクトル(式(13)を参照)のうち、 $N_z^p(P) > 0$ となる方を選ぶことによって、知覚法線ベクトル $\vec{N}^p(P)$ が求められる。

$$\{\vec{U} \times \vec{N}(P)\} \cdot \vec{N}^p(P) = 0 \quad (13)$$

ここで、 \times および \cdot は、それぞれベクトルの外積と内積を示している。

3.2 知覚法線ベクトルを用いた陰影編集による形状変化の評価法

上記によって得られた陰影によって引き起こされた知覚法線ベクトルと、3D デジタイザを用いて得られた対象顔および目標モデルの法線ベクトルを比較することによって、陰影編集による形状の変化を定量的に評価する。

具体的な処理の流れは以下の通りである(図10)。まず、予め計測した目標モデルの3次元形状 G_M より、その法線ベクトル \vec{N}_M を示す画像(目標モデル法線画像 I_M^N) を生

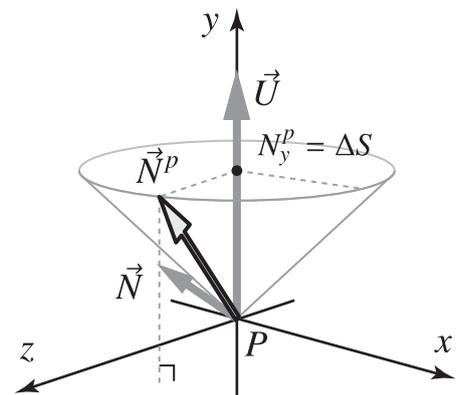


図9 知覚法線ベクトル
Perceived normal vector.

成する。この法線画像は各画素のRGB成分が、その画素に投影される物体表面上の点の法線ベクトルのxyz成分と対応している画像である。これを2.2.3節と同様の処理を用いて対象顔画像と一致するように変形し、変形目標モデル法線画像 \hat{I}_M^N を得る。また、対象顔の3次元形状 G_O より、その法線ベクトル \vec{N}_O を示す画像(対象顔法線画像

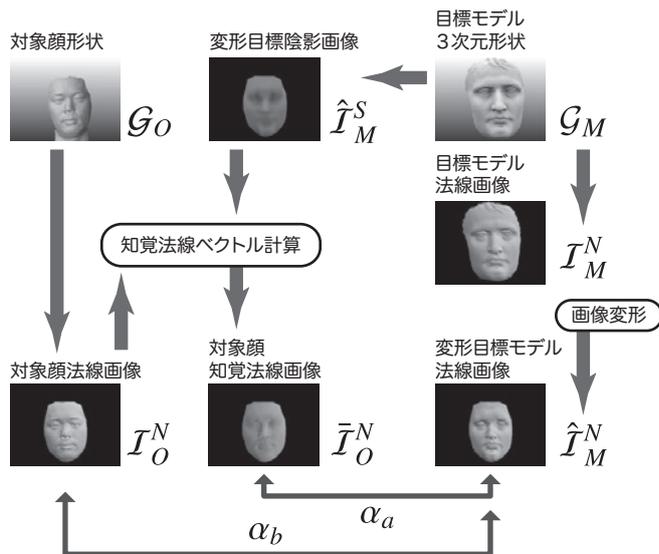
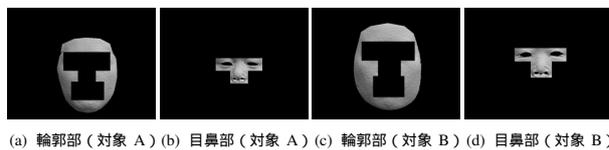


図 10 陰影編集による形状変化の評価法の流れ
Process flow of evaluating perceived normal vector.



(a) 輪郭部 (対象 A) (b) 目鼻部 (対象 A) (c) 輪郭部 (対象 B) (d) 目鼻部 (対象 B)

図 11 評価用選択領域例

ExamSples of selected regions for evaluation.

I_O^N) を生成する。この I_O^N と 2.2 節で得た変形目標陰影画像 \hat{I}_M^S より知覚法線ベクトルを求め、対象顔知覚法線画像 \hat{I}_O^N を得る。

このようにして得られた $I_O^N, \hat{I}_O^N, \hat{I}_M^N$ それぞれの画像において同位置にある画素は、顔表面上における同一点の法線ベクトルを示している。そこで、 I_O^N と \hat{I}_M^N, \hat{I}_O^N と \hat{I}_M^N 、それぞれの画像間における法線ベクトルの内積の値を、編集前一致度 α_b 、編集後一致度 α_a とし、その変化

$$\Delta\theta = \arccos(\alpha_b) - \arccos(\alpha_a) \quad (14)$$

を見れば、陰影編集によって顔形状がどのように変化したのかがわかる。この $\Delta\theta$ は、陰影編集後に対象顔形状が目標モデル形状に近づけば正の値に、遠ざかれば負の値となる。評価は、顔全体と手動にて選択した輪郭部および目鼻部の計 3 部位* について、対象とするすべての画素から求めた一致度の平均値 $\bar{\alpha}_b, \bar{\alpha}_a$ を用いて求めた角度変化 $\Delta\bar{\theta}$ を用いて行う。評価に用いた輪郭部と目鼻部の選択領域の例を図 11 に示す。

3.3 陰影編集による形状変化の評価結果

本システムによる形状変化の評価のために、対象 A, B の他に目標モデルである Hermes, Napoleon, Gattamelata, Girl, Jehanne Darc, Venus, Miroku についても、相互に変形目標陰影画像を生成して知覚法線画像を生成した (図 12)。

* 口唇部については、一部うまく計測できなかった箇所があったため除外した。

表 2 対象と目標モデルの編集前一致度 $\bar{\alpha}_b$

Correlation of faces before editing.

	A	B	H	N	Ga	Gi	J	V
Object B	0.927							
Hermes	0.925	0.914						
Napoleon	0.919	0.905	0.948					
Gattamelata	0.916	0.900	0.929	0.919				
Girl	0.913	0.910	0.930	0.928	0.891			
Jehanne Darc	0.939	0.932	0.954	0.953	0.920	0.944		
Venus	0.924	0.905	0.962	0.950	0.925	0.931	0.955	
Miroku	0.925	0.921	0.937	0.924	0.913	0.936	0.949	0.933

最上段に示すアルファベットは、左から対象 A, 対象 B, Hermes, Napoleon, Gattamelata, Girl, Jehanne Darc, Venus を示している。

以下では、陰影編集による知覚法線の一致度について定量的な評価を行うが、その前に、それぞれの顔同士がどの程度似ているのか (類似性) と元々の顔の凹凸の程度 (平坦性) について調べておき、これらを基に議論を行う。

類似性 顔形状の類似性が陰影編集効果に与える影響を議

論するために、編集前の対象や目標モデルの顔形状がどの程度似ているかを調べておく。つまり、これらの法線画像同士の一貫度を求めて、多次元尺度構成法によって散布図を生成し、顔同士の類似性を定量的に示す。散布図生成の手順は以下の通りである。

- (1) 基準顔画像を決める。
- (2) 他の法線画像を基準顔画像と一致するように変形する (変形方法は 2.3 節と同様)。
- (3) 法線画像の一貫度、つまり顔全体の編集前一致度 $\bar{\alpha}_b$ を求める。
- (4) 求めた一致度を基に、多次元尺度構成法を用いて散布図を生成する。

実験では対象 A の画像を基準顔画像とした。求めた一致度は表 2 に示す通りである。また、散布図の生成には R** の関数 `cmdscale` を用いた (図 13)。この散布図を見ると、Napoleon, Venus, Hermes には特に高い類似性があることがわかる。対象 A, B は共にこれらのモデルとは散布図中の左上・右下と対照的な関係にあり類似性は低いと言える。また、Girl と Gattamelata も右上・左下と対照的な関係にあることがわかる。

平坦性 一般に、目鼻や頬の凹凸の程度によって平らな顔立ちや彫りの深い顔立ちと言及することがある。本論文では、この顔の凹凸の程度と陰影編集効果について定量的に議論するために、顔表面の概形が 2 次曲面によって表されると仮定し、その曲面上の凹凸の程度を平坦性として扱うこととする。つまり、計測した顔の 3 次元形状に対して 2 次曲面 ($ax^2 + by^2 + cz^2 + dxy + eyz + fzx + gx + hy + iz = 1$) を最小二乗法を用いて当てはめ、当てはめの際の残差の平均と標準偏差の値より平坦性を評価する。表 3 にそれぞれの顔に対する平均と標準偏差の値を示す。これらの値を見ると、Napoleon, Hermes, Gattamelata, Venus, Jehanne Darc の平均値や

** R 言語 (<http://www.r-project.org/>)

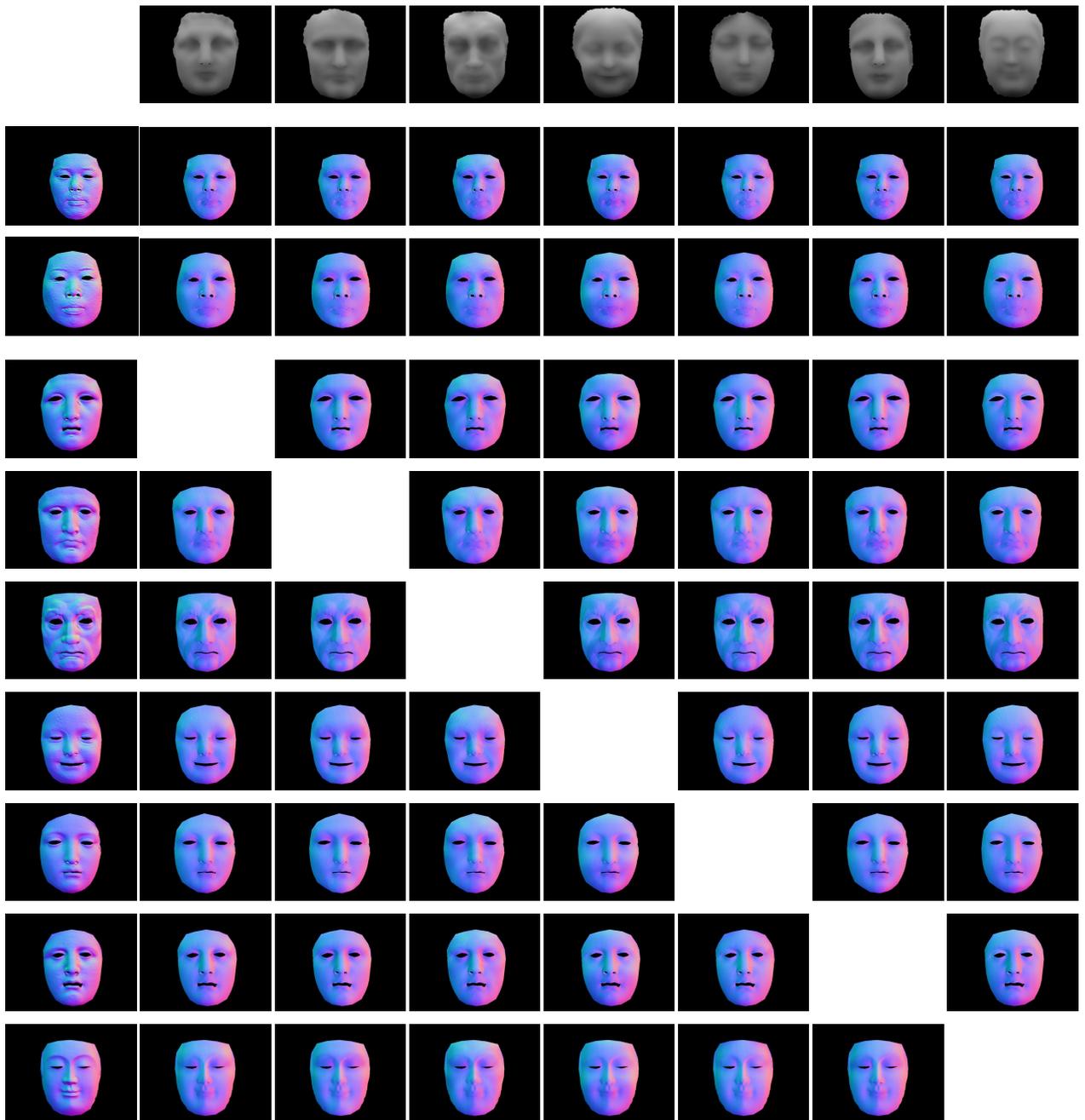


図 12 陰影・法線・知覚法線画像

Images of shading, normal and perceived normal vectors.

最上段は左から Hermes, Napoleon, Gattamelata, Girl, Jehanne Darc, Venus, Miroku の陰影画像である。2 段目以降は、上から順に、対象 A, 対象 B, Hermes, Napoleon, Gattamelata, Girl, Jehanne Darc, Venus, Miroku と並べてあり、それぞれについて、左から順に法線画像、最上段の陰影画像を反映させた知覚法線画像を示している。なお、法線画像の目、鼻孔、一部の口唇部は手作業によって除去してある。

標準偏差は他と比べると大きな値となっていることがわかる。つまり、これらの顔は他の顔よりも顔の凹凸が大きく、平坦な顔ではないと言える。また、Miroku は、平均と標準偏差の値が最も小さくなっていることから、本論文にて用いた顔モデルの中で最も平坦な顔であると言える。

以上の特徴を踏まえて、陰影編集による一致度の変化(表 4)と編集後の一致度(表 5)について、対象 目標モデル間、目標モデル同士間での一致度の変化に注目して議論を行う。

表 3 2 次曲面当てはめ残差の平均と標準偏差 (mm)
Average and standard deviation of residual of quadric surface fitting.

	A	B	H	N	Ga	Gi	J	V	M
average	2.70	2.01	5.79	8.38	5.32	2.78	4.18	4.61	1.88
std dev	16.2	14.0	23.4	27.7	22.4	16.4	20.0	21.0	13.6

最上段に示すアルファベットは、左から対象 A, 対象 B, Hermes, Napoleon, Gattamelata, Girl, Jehanne Darc, Venus, Miroku を示している。

対象と目標モデル間での一致度の変化 今回の実験では、対象 A, B と、目標モデルとは類似性が低く、容貌は大きく異なっている。対象 A, B 両方の変化量(表 4)

はすべて正の値となっており、陰影編集によって知覚形状が目標モデルの形状に近づいていることがわかる。特に、目鼻周辺部には輪郭部に比べて大きな一致度の変化が現れている。また、散布図中において、目標モデルからさらに離れた位置にある対象 B については、対象 A よりも変化量が大きくなっていることがわかる。編集後の一致度（表 5）については、対象 A, B と同様に平坦に近い構造になっている Miroku や Girl については、他の目標モデルと比べると目鼻部についてより高い一致度を示している。また、Jehanne Darc についても比較的高い一致度が示されているが、このモデルの平坦性は他のモデルと比べると対象 A, B に近づいている。

以上より、類似性の低い目標モデルを用いた場合は陰影編集効果がより大きく現れ、また、平坦性の近い目標モデルほど編集後の一致度が高くなることが示されていることがわかる。

目標モデル間での一致度の変化 Miroku や Girl を除く目標モデルは平坦性の低い、つまり凹凸の大きな容貌であるが、その中でも似通った顔である Hermes, Napoleon, Venus の互いの変化量を見ると、その絶対値は小さくなっており、いくつかは負の値となっていることがわかる。つまり、元の顔が似ている場合は陰影編集を施しても大きく変化しないか、場合によっては目標モデルに近づかないことが示されている。一方、散布図上で他のモデルとは離れた位置にある Gattamelata については大きな変化量が示されているが、目鼻部より輪郭部に大きな変化が現れていることが特徴的である。つまり、陰影編集によって目鼻の凹凸だけではなく頬や顎の形状変化も与えられることが示されている。また、他のモデルと比べて平坦な顔である Girl や Miroku については、Girl は輪郭部、Miroku は目鼻部の一致度の変化が他の部位の変化より大きくなっている。つまり、平坦性の程度がそれぞれの顔の部位によって異なっていることが推察できる。

以上より、類似度の高い顔同士では大きな陰影編集効果が現れず、他と異なる特徴を持つ箇所に対して大きな陰影編集効果が現れることが考察できる。

4. む す び

本論文では、顔印象を変化させる要因として顔表面の陰影に着目し、目標とするモデルの 3 次元形状より生成される陰影を用いて顔形状の見えを操作する顔陰影編集システムを提案した。本研究では、形状が既知である目標モデルの持つ陰影を対象顔に与える陰影編集システムを開発し、その定量的な評価尺度として知覚法線ベクトルを導入して、陰影によって知覚される形状変化を定量的に評価した。この結果、陰影編集によって対象顔の知覚形状を目標モデルの形状に近づけることができることを示した。

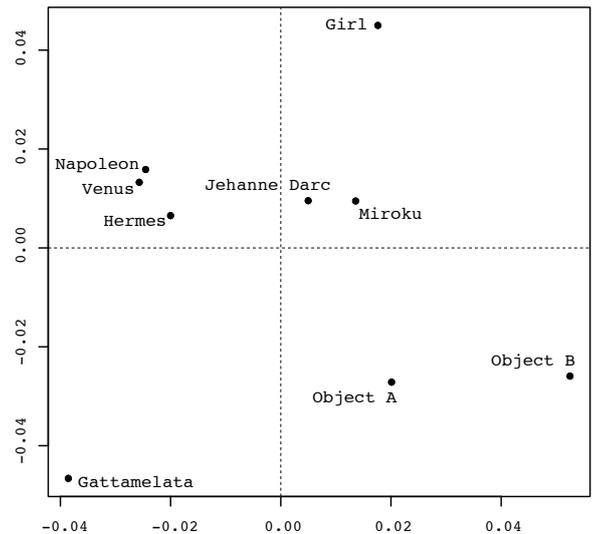


図 13 多次元尺度構成法による顔形状一致度（顔全体の編集前一致度 \hat{a}_b ）の散布図
Plot of initial correspondences between objects and models using MDS.

表 4 陰影編集による一致度の変化 $\Delta\hat{\theta}$ (度)
Differences of correlations after editing (degree).

	H	N	Ga	Gi	J	V	M
Object A	5.42	5.49	4.96	6.02	5.30	4.90	5.59
	3.54	4.16	3.40	4.31	4.99	4.18	4.39
	7.57	6.38	6.89	8.19	6.23	6.90	8.94
Object B	6.01	6.85	5.61	6.53	5.87	5.93	6.09
	2.79	3.35	2.44	3.29	3.94	3.20	3.82
	10.63	10.04	10.18	11.63	9.38	10.33	11.32
Hermes	—	0.19	2.18	2.33	1.53	-0.27	3.21
		1.02	2.35	1.68	1.33	0.55	2.55
		-0.32	1.74	2.03	1.42	-1.69	5.63
Napoleon	1.29	—	2.98	2.85	1.46	0.51	3.64
	1.34		3.42	1.75	0.75	0.48	3.03
	2.23		2.08	2.53	1.66	-0.50	5.64
Gattamelata	2.98	2.85	—	4.76	4.18	2.95	4.06
	3.32	3.79		5.29	4.29	3.60	3.43
	1.94	0.68		3.04	3.56	1.12	5.27
Girl	2.41	1.52	3.93	—	1.29	1.17	3.18
	3.28	2.23	4.96		0.94	1.83	3.21
	-0.30	-1.31	0.97		0.97	-0.42	4.25
Jehanne Darc	0.89	-0.39	2.81	0.91	—	-0.56	1.73
	1.98	-0.07	3.46	0.56		0.33	1.91
	-0.17	-1.54	1.33	0.69		-1.19	3.35
Venus	0.17	-0.42	2.52	1.50	0.48	—	2.64
	1.03	0.23	2.59	1.03	0.04		1.80
	-0.83	-2.24	1.24	1.75	1.21		5.03
Miroku	2.16	1.64	2.41	1.36	0.34	1.06	—
	1.10	0.95	1.59	0.53	0.34	0.92	
	4.79	2.98	3.43	2.33	1.05	2.51	

最上段に示すアルファベットは、左から Hermes, Napoleon, Gattamelata, Girl, Jehanne Darc, Venus, Miroku を示している。また、各セル中の値は、上から、顔全体、輪郭部、目鼻部それぞれに対応している。

本論文では陰影による形状の見えの変化を定量的に評価するため、3次元形状が既知の物体を用いて陰影生成を行ったが、3.2節の評価方法を用いると、顔陰影画像のみであっても容貌に与える影響を評価することが可能である*。例えば、メイクアップアーティストが施す顔陰影によって、顔表面の法線方向がどのように変化するかを評価することができるようになるため、化粧の効果を定量的に扱うことが

*つまり、 I_o^N と \hat{I}_o^N を比較する。

表5 対象顔画像と目標モデル画像の編集後一致度 $\bar{\alpha}_a$
Correspondences between objects and models after editing.

	H	N	Ga	Gi	J	V	M
Object A	0.9489	0.9377	0.9394	0.9412	0.9490	0.9450	0.9486
	0.9698	0.9612	0.9566	0.9567	0.9638	0.9667	0.9694
	0.9010	0.8885	0.9074	0.9218	0.9202	0.9003	0.9139
Object B	0.9430	0.9354	0.9327	0.9339	0.9485	0.9399	0.9484
	0.9695	0.9631	0.9519	0.9451	0.9666	0.9671	0.9716
	0.8746	0.8643	0.8765	0.9134	0.9046	0.8715	0.9130
Hermes	—	0.9481	0.9426	0.9446	0.9591	0.9578	0.9478
		0.9626	0.9572	0.9496	0.9674	0.9736	0.9689
		0.9133	0.9217	0.9375	0.9397	0.9276	0.9075
Napoleon	0.9552	—	0.9406	0.9471	0.9610	0.9555	0.9438
	0.9707		0.9541	0.9558	0.9720	0.9720	0.9665
	0.9329		0.9256	0.9390	0.9412	0.9300	0.9052
Gattamelata	0.9460	0.9369	—	0.9297	0.9430	0.9423	0.9361
	0.9624	0.9532		0.9371	0.9495	0.9564	0.9525
	0.9158	0.9081		0.9229	0.9328	0.9197	0.9084
Girl	0.9473	0.9385	0.9259	—	0.9554	0.9430	0.9535
	0.9602	0.9542	0.9359		0.9626	0.9593	0.9681
	0.9148	0.9031	0.9079		0.9433	0.9062	0.9197
Jehanne Darc	0.9561	0.9494	0.9365	0.9517	—	0.9561	0.9546
	0.9723	0.9671	0.9481	0.9567		0.9718	0.9709
	0.9264	0.9084	0.9154	0.9430		0.9244	0.9246
Venus	0.9608	0.9512	0.9417	0.9416	0.9612	—	0.9496
	0.9772	0.9694	0.9531	0.9504	0.9713		0.9694
	0.9335	0.9174	0.9241	0.9278	0.9406		0.9129
Miroku	0.9424	0.9265	0.9275	0.9424	0.9470	0.9409	—
	0.9638	0.9517	0.9400	0.9542	0.9618	0.9627	
	0.9014	0.8712	0.9056	0.9202	0.9177	0.8982	

各アルファベットおよびデータの並びは表4と同様である。

可能になる。また、本提案手法によって、今までは主に定性的な評価に依存してきた顔陰影と顔印象の関係について定量的な議論が可能となるため、人の知覚についてより深い議論が可能になると期待できる。例えば、より多くの男女の顔を計測し、その陰影データを解析することによる性差を表す陰影に関する研究や、図13のGirlとGattamelataを結ぶ軸が年齢を示していると解釈できるとすると、老け具合を左右する陰影に関して、何らかの定量的な議論が可能となるだろう。

最後に、今後議論すべき課題として以下を挙げる。

光源環境による知覚形状変化について 本論文では、一般的な状況として顔の上方から照射する空間的拡がりのある光源環境を用いたが、我々の日常生活でのすべての環境がこれに当てはまるわけではない。例えば、夜間の室内など意図的に光源環境を変えた空間では異なった陰影が生成され得る。このように場所や状況に合わせた光源環境を用いて目標陰影を生成することによって、これらの環境が引き起こす知覚形状変化に対する議論が可能であると考えられる。

陰影編集システムの簡便化 本研究では、目標モデルとして石膏像を使用し、目標モデルの3次元形状が既知であることを前提としたシステムを用いて陰影編集を行った。しかし身近な目標モデルとして芸能人の顔写真を設定し、その形状から表れる陰影を考慮した化粧の提案システムを実現するためには、画像情報のみから簡単に目標陰影を生成することが求められる。

顔陰影編集による顔印象の変化について 本論文では、目標モデルの生成する陰影を対象顔上に重畳することによって、顔形状の見え、つまり容貌を目標モデルに近づけることができることを示した。次のステップとして、目標モデルの持つ顔印象が、陰影を通して対象顔に与えられるかどうかについて、定性的な評価を踏まえて検討したい。

〔文 献〕

- 1) Stichting Blender Foundation. Blender. <http://www.blender.org/>
- 2) Henrik Wann Jensen and Juan Buhler. A rapid hierarchical rendering technique for translucent materials. *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2002)*, 21, 3, pp. 576–581
- 3) Tom Stafford and Matt Webb. MIND HACKS 実験で知る脳と心のシステム, オーム社
- 4) Ruo Zhang, Ping-Sing Tsai, James Edwin Cryer, and Mubarak Shah, Shape from shading: A survey, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 21, 8, pp. 690–706
- 5) キヤノン株式会社, 撮影テクニック (人物写真), <http://cp.c-ij.com/ja/photoshooting/techniques/portrait/portrait04.html>
- 6) コダック株式会社, 写真撮影のコツ (人物), <http://www.jp.kodak.com/JP/ja/consumer/TakingGreatPictures/TakingPic/people.shtml>
- 7) 美崎栄一郎, 波多順子, 迺島和彦, 上田彩子, 小山高正, “アイメイクが相貌印象に及ぼす影響”, *日本顔学誌*, p. 160
- 8) 岩淵絵里子, 椎尾一郎, “電脳化粧鏡: メイクアップを支援する電子鏡台”, *In The 16th Workshop on Interactive Systems and Software (WISS 2008)*
- 9) 株式会社カネボウ化粧品, きれいになる本, <http://www.kanebo-cosmetics.co.jp/kirei/>
- 10) 株式会社サントネール, phopro, <http://www.phopro.jp/>
- 11) 株式会社セルフフィット, 証明写真のフォトスタジオナビ, <http://photostudio-navi.com/>
- 12) 株式会社リコー, フォトテクニック, <http://www.ricoh.co.jp/dc/photostyle/take/>
- 13) 株式会社資生堂, 美容の情報 (beauty info), <http://www.shiseido.co.jp/beauty/>
- 14) 高木佐恵子, 波川千晶, 古本富士市, “メイクアップ技術上達のためのアドバンスシステム”, *芸術科学会論誌*, 2, 4, pp. 156–164
- 15) 吉川左紀子, 中村真, 益谷真, “顔と心—顔の心理学入門”, サイエンス社
- 16) 上田彩子, 小山高正, 美崎栄一郎, 波多順子, 迺島和彦, “アイメイクが表情印象に及ぼす影響”, *日本顔学誌*, p. 161
- 17) 星野准一, 斉藤啓史, “ビデオ映像とCGの合成によるヴァーチャルファッションの実現 (<特集> コンピュータグラフィックスの新展開)”, *情処学論誌*, 42, 5, pp. 1182–1193
- 18) 鈴木昌夫, “能面の表情認知における陰影の効果”, *早稲田大学人間科学研究*, 8, 1, pp. 61–73
- 19) 湯浅真由美, 中島朗子, “高精度顔特徴点検出に基づくデジタルメイクシステム”, 第10回画像センシングシンポジウム講演論文集, 第C-2巻, pp. 219–224
- 20) 尾田政臣, “カメラと照明の方向が無表情顔の印象に及ぼす影響”, *立命館人間科学研究*, 14, pp. 53–61
- 21) 石垣智子, 高井勇志, 松山隆司, “陰影効果を利用した顔印象の編集”, *電通学技報*, 108, pp. 21–26
- 22) 乾敏郎, “Q&A でわかる脳と視覚 人間からロボットまで”, サイエンス社
- 23) 向田茂, 鈴木絢香, 磯野勝宣, 加藤隆, “化粧による顔の印象の変化について: 合成による刺激統制の試み”, *電通学技報*, HCS, ヒューマンコミュニケーション基礎, 102, 29, pp. 1–6



たかい たけし
高井 勇志 1998年同志社大学工学部電子工学科卒業。2000年奈良先端大学院大学情報科学研究科情報処理学専攻修了。2005年京都大学大学院情報科学研究科知能情報学専攻修了。同大学院情報学研究科特任助教を経て、2009年より英国サリー大学研究員。博士（情報学）。コンピュータビジョンとコンピュータグラフィックスに関する研究に従事。また、3次元ビデオを利用した映像制作に関する研究を行っている。正会員。



いしがき ともこ
石垣 智子 2007年京都大学工学部電気電子工学科卒業。2009年京都大学大学院情報科学研究科知能情報学専攻修了。2009年より新日鉄ソリューションズ株式会社に勤務。コンピュータビジョンに関する研究に従事。正会員。



まつやま たかし
松山 隆司 1976年京都大学大学院修士課程修了。京都大学助手、東北大学助教授、岡山大学教授を経て1995年より京都大学大学院電子通信工学専攻教授。現在同大学院情報科学研究科知能情報学専攻教授。2002年学術情報メディアセンター長、京都大学評議員、2005年情報環境機構長。2008年副理事。工博。画像理解、分散協調視覚、3次元ビデオの研究に従事。最近は「人間と共生する情報システム」、「エネルギーの情報化」の実現に興味を持っている。1980年情報処理学会創立20周年記念論文賞、1990年人工知能学会論文賞、1993年情報処理学会論文賞、1994年電子情報通信学会論文賞、1995年第5回国際コンピュータビジョン会議 Marr Prize、1999年電子情報通信学会論文賞、2000年画像センシングシンポジウム優秀論文賞、2004年、2005年FIT優秀論文賞、2009年ヒューマンインタフェース学会論文賞、文部科学大臣表彰科学技術賞（研究部門）。国際パターン認識連合、情報処理学会、電子情報通信学会フェロー。日本学術会議連携会員。
