

Hollow-face 錯視における 顔テクスチャ・呈示方向・光源位置の効果

吉田 弘 司

(2006年10月5日受理)

The effects of the facial texture, stimulus orientation and light direction on the hollow-face illusion

Hiroshi Yoshida

In the present study, the strength of hollow-face illusion was measured using psychophysical method (computer controlled double-staircase). Stimuli were three-dimensional stereo images of laser scanned female face, rendered varying facial texture (positive, negative or no texture), stimulus orientation (upright or inverted), and light direction (top- or bottom-lit). Three-factorial experimental design investigated how these factors affect the illusion. The results showed the significant main effects of all factors. Hollow-face illusion was stronger for the stimulus with positive texture than with the negative or no texture. Upright face showed stronger illusion than inverted. Light from bottom increased illusion as compared with the light from top. First order interactions showed that the effect of texture was significant only for the upright face, and that the effect of light direction reversed if the stimulus orientation was inverted. In addition, second order interaction showed that the light direction had no effect for inverted negative face. These interaction patterns were complex, but were explained simply in terms of the tendency that the more face like pattern causes the more hollow-face illusion.

Key words: hollow-face illusion, face perception, three-dimensional shape perception

キーワード: hollow-face 錯視, 顔の知覚, 3次元形状の知覚

日常生活において、我々が外界の情報を得るとき、視覚によって媒介される情報はおそらくもっとも重要な手がかりとなる。我々を取り巻く世界は3次元の広がりをもつため、空間内を移動したり、物を手に取ったり、対象の形状を認識したりする際には、3次元空間の構造について正しく知覚することが重要である。人は、一般に、このような3次元空間の知覚を特別に意識的な努力を払うこともなく容易に得ることができる。

我々にとって、外界から視覚情報を取得するための

器官は眼である。人は、外界に存在するさまざまな事物を、眼球の奥に位置する網膜上に投射された2次元の像をもとに認識しなければならない。3次元の世界においては、対象を観察する方向が異なれば、それが同一の対象物であったとしても異なった形状の網膜像を得ることになる。そこで、対象認識においては、種々の手がかりを基に、外界の対象に関する視点に依存しない3次元の表象を再構築することが重要だと考えられてきた (Biederman, 1985, 1987; Marr, 1982)。

網膜上の2次元像に含まれるどのような情報が我々に3次元の情報をもたらすかという、網膜像からの3次元性復元の問題は、古くより心理学の主要な興味のひとつであり、多くの研究が行われてきた。その結果、奥行き知覚においては、両眼の輻輳角や眼球調節な

本論文は、課程博士候補論文を構成する論文の一部として、以下の審査委員により審査を受けた。

審査委員: 利島 保 (主任指導教員), 山崎 晃,

深田博己

どの視運動系の手がかり (oculomotor cues), 重なり合いや大きさの比, 大気効果, 線遠近法の効果などの絵画的手がかり (pictorial cues), 運動視差に代表されるような運動の手がかり (motion cues), および, 両眼が異なった視点をもつことによる両眼網膜非対応の手がかり (binocular disparity cue) などが, 我々の奥行き知覚の成立に影響を及ぼすことが認められている (Goldstein, 1996)。

3次元の対象形状の知覚においても, 奥行き知覚と同様, その形状復元に有効な複数の手がかりの存在が知られている。両眼網膜非対応は, 奥行き知覚の場合と同じく3次元形状の知覚においても重要な決定因となり得るし, 両眼からの情報が得られない単眼視状況においては対象や観察者の運動によって3次元形状が知覚できることも見出されている (Braunstein, 1976; Regan, Frisby, Poggio, Schor, & Tyler, 1990; Ullman, 1979; Wallach & O'Connell, 1953)。また, 網膜像に含まれる静的な手がかりについても, 対象表面の陰影やテクスチャ密度の勾配, 表面輪郭の解釈などが対象形状の知覚の決定に大きく影響することが知られている (たとえば, Horn, 1977; Stevens, 1981)。

これらの手がかりを基に, 外界の3次元性に適応した知覚が成立していると考えられているが, その一方で, 我々がときに, 3次元形状の正しい知覚に失敗する現象もある。たとえば, “hollow-face 錯視” と呼ばれる現象 (Gregory, 1973, 1998) は, 対象の奥行き形状に関する知覚の失敗 (錯覚) を示す代表的な例である。この錯視は, 顔を象ったお面などを裏側から観察すると, その表面は凹状に知覚されるべきであるのに, 我々はむしろ凸状に知覚してしまうという現象である。

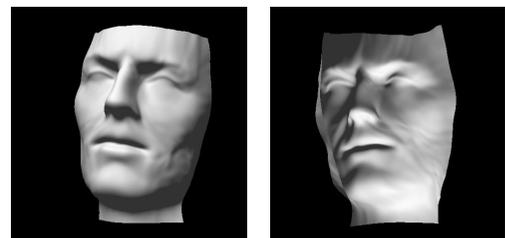
Figure 1は, 人の顔表面の3次元座標データを基にコンピュータグラフィックス (CG) によって作成 (レンダリング) した画像である (光源は手前上方45度に位置している)。左の画像 (Figure 1-A) は顔表面を外側から観察した時の見えを示しているが, この2次元の画像からでも, 我々は, 陰影の手がかりによってその形状を知ることができる。それに対し, 右の画像 (Figure 1-B) は, 顔を裏側から見たときの像である。顔の表面 (たとえば鼻) は向こうを向いているわけであるから, 面の3次元構造は凹状に知覚されるべきであるのに, 我々は, むしろ, 下方から照明された顔が凸状に出張しているかのように見てしまう (Figure 1-Bの画像では, 顔の外側表面は顔の左側に見えるわずかな領域だけである)。

この hollow-face 錯視の生起因のひとつとして, 陰影からの3次元形状の知覚がそもそもあいまいな性質をもつことがあげられる。陰影は, 照明を受けている

領域の明るさの空間的な変化であり, その情報は, 常に光源の位置と観察方向に依存する性質をもつ (Cavanagh & Leclerc, 1989; Horn, 1977)。したがって, 対象の位置とそれに対する観察方向が固定しているならば, 観察される3次元表面の形状は, 光源の位置がどの方向に推定されるかに依存して変化する。

Figure 2は, 陰影からの構造復元問題のあいまい性を示す例である。Figure 2-Aは, 凹凸をもつ表面を, 手前上方45度に光源をおいてレンダリングしたものである。この図で, 中央に位置する円は実際に凸状の形状にデザインされている。また, その左右あるいは上下にある円は凹状の形状としてデザインされている。この図を, 我々はデザイン通りに, 中央の円は凸状に, その左右あるいは上下の円は凹状に知覚する。それに対し, Figure 2-Bは, 光源を手前下方45度に位置させてレンダリングしたものである。この図において, 元となる3次元の形状に関するデータは Figure 2-Aと同じものであるのに, 我々は, 逆に, 中央の円は凹状に, その左右あるいは上下の円は凸状に知覚してしまう。

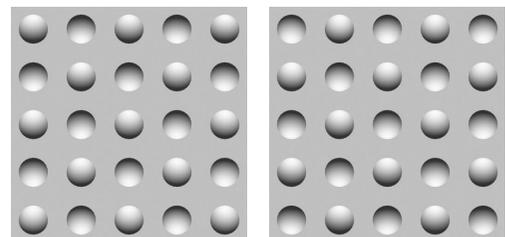
Figure 2のデモンストレーションは, 我々が陰影の情報から3次元構造を復元する際に “上方光源” を仮定していること (“light-from-above assumption”) を示すものである (Horn, 1977; Ramachandran, 1988a, 1988b)。たとえば, この図を回して逆さにすると, 凹凸の見えは逆転する。我々が生活している光環境に



A. Normal Face

B. Hollow-Face

Figure 1. Hollow-face illusion.



A. Top-Lit

B. Bottom-Lit

Figure 2. Shape perception from shading.

おいては、光は上方からやってくるのが一般的である。上方光源の仮定には、我々の視覚システムがこのような光環境への適応の結果として、陰影からの構造復元の作業を行っていることを示している。

さて、hollow-face 錯視の成立にも、上述したような陰影からの3次元形状復元におけるあいまいさの問題が関係していることが推測される。実際、Figure 1-Bを見るとわかるように、我々は、錯視によって凹状の顔表面を凸状に知覚する場合に、光源位置を通常の上方ではなく、下方に推定しているように認められる。

Hollow-face 錯視が、どのような要因によって生起しているかを検討する研究が、Hill & Bruce (1993, 1994)によって行われている。Hill & Bruce (1993)は、hollow-face 錯視において、顔の呈示方向（正立、倒立）、照明方向（上方光源、下方光源）、観察方法（両眼視、単眼視）の要因が、その錯視量の大きさにどのように影響するかを検討した。その結果、hollow-face 錯視は、倒立顔よりも正立顔でより大きく生じること、光源が手前にある場合は下方から照明した方が錯視量が大きいこと、両眼視よりも単眼視状況下で錯視量が大きいことなどが認められた。

また、Hill & Bruce (1994)は、hollow-face 錯視が、一般に我々が3次元表面を凸状に知覚しやすい傾向によるものかどうかを検討するために、顔の仮面とジャガイモ状の表面を象ったマスク（“hollow-potato”；Johnston, Hill, & Carman, 1992）を刺激として錯視強度を調べた。その結果、顔刺激においては正立に呈示した方が、倒立に呈示するよりも大きな錯視量を生じたが、ジャガイモの表面では呈示方向による違いはみられなかった。また、倒立顔の錯視量は、ジャガイモの表面に対する錯視量と同等であった。

これらの結果をもとに、Hillらは、人はあいまいな3次元表面を凸状に知覚する一般的傾向があるが、hollow-face 錯視はそれだけに起因するものではなく、顔パターンに特有な知識が働いていること、および、この顔という対象についての知識が、正立に呈示された顔では働くが、倒立の顔には働かないことなどを示唆している。

人において、倒立呈示された顔刺激に対する情報処理が特殊であるらしいことは、顔が倒立呈示されると再認率が著しく低下することを示したYin (1969)の研究や、写真の顔の目や口を切り取って逆さに貼り付けた刺激に対する感受性が、倒立呈示条件下では著しく低くなるという、いわゆる“サッチャー錯視”（Thompson, 1980）のデモンストレーションでも知られている。

ところで、倒立呈示と同様、人の顔刺激に対する特

徴的な情報処理特性を示す現象として、写真のネガのように、画像の明暗（白黒）が反転した場合も、顔からの人物の同定などが非常に困難になることが知られている（Galper, 1970; Galper & Hochberg, 1971; Phillips, 1972）。画像の明暗反転によって顔認識が大きく阻害される事実は、顔の認識に、エッジに基づく表象（edge-based representation）ではなく、むしろ表面がもつ特性がそのまま反映されているような表象（surface-based representation）が用いられる可能性を示唆するものである（Bruce & Humphreys, 1994）。

明暗が反転した画像においては、顔表面がもつ陰影パターンの極性も反転するだろう。したがって、明暗反転した画像において、顔の認識が困難になるのは、陰影からの表面形状の復元に失敗するからとも考えられる。たとえば、人の顔を下方から照明するとその認識が非常に困難になるのは、顔の陰影情報が我々の顔認識において重要であることを示す事実である（Johnston et al., 1992）。しかし、顔の表面特徴が与える情報には、陰影の情報だけでなく、顔の表面が本来有しているテクスチャの特徴（眉が黒い、唇が赤い、目が茶色であるなど）も含まれていることに注目する必要がある。下方照明の操作は、表面が与える陰影情報の極性を反転させるが、表面テクスチャの情報（テクスチャコントラスト）を反転させることはない。それに対して、画像の明暗反転の操作は、陰影だけでなくテクスチャコントラストも反転させる操作となっている。

最近のCG技術を応用すれば、顔のもつ表面テクスチャと、光源によって与えられる陰影の情報を独立に操作することが可能である。そこで、本研究においては、hollow-face 錯視がどのような要因によって生起しているかという問題について、顔の呈示方向や光源位置だけでなく、顔がもつ表面テクスチャの情報も合わせて操作することによって、その生起メカニズムを明らかにすることを目的とする。仮説としては、まず先行研究と同様、hollow-face 錯視は倒立呈示よりも正立呈示された顔で大きく生じるだろう。また、上方光源よりも下方光源時に、より大きく生じるだろう。さらに、この錯視に顔特有の処理メカニズムが寄与しているのであれば、顔のテクスチャをなくしたり、明暗を反転させた顔では、倒立呈示時と同様、錯視量の減少が見られるのではないかと推測される。

方 法

実験参加者 比治山大学に在籍する学部学生9名と教員1名、計10名が本実験に参加した。なお、視力の低い者はコンタクトレンズを使用した。

実験計画 実験では、両眼視によって立体呈示される顔刺激に対する hollow-face 錯視強度を、以下の3要因の組み合わせで測定した。

第1要因は、テクスチャの有無であり、テクスチャなし、ポジティブテクスチャ（通常の写真をマッピング）、ネガティブテクスチャ（写真のネガをマッピング）の3水準を設けた。第2要因は顔刺激の呈示方向で、正立呈示、倒立呈示の2水準を設けた。また、第3の要因は照明方向で、上方45度、および下方45度からの照明の2水準が設けられた。これら3要因はすべて参加者内要因とし、それぞれの組み合わせ（12条件）について、呈示される顔が凸状に知覚されるか、それとも凹状に知覚されるかという反応の転換点を、二重階段法により測定した。

実験装置 刺激の呈示、および参加者の反応記録のため、パーソナルコンピュータ（EPSON VL-626E）および17インチカラーディスプレイ（飯山電機 MT-8617ES）を使用した。また、両眼立体視を成立させるため、液晶シャッターを組み込んだステレオ画像呈示装置（Stereo Graphics Crystal Eyes PC 2）を使用した。

刺激 まず、20歳代の女性の顔を、非接触型3次元形状入力機（Minolta VIVID-700）を用いて、顔表面の3次元座標値と2次元画像（写真）に分けてコンピュータに取り込んだ（Figure 3）。

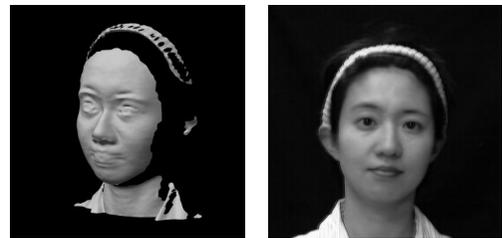
これらのデータをもとに、3次元画像処理ソフトウェア（Newtek LightWave 3D）によってレンダリング処理を行い、実験で使用する立体視のための刺激画像を作成した。まず、レンダリング時に使用するテクスチャとして、2次元の写真画像データをもとに、テクスチャなし条件用には顔の肌の色を平均化したもの、ポジティブテクスチャ条件用にはそのままの写真画像、ネガティブテクスチャ条件用には原画像のRGB強度を反転した画像を、それぞれ作成した。なお、これらの画像はすべてカラー画像を用いた。また、テクスチャなし条件において、両眼立体視時に奥行き情報をもたらす対応点が不足することを避ける目的で、上述したテクスチャ画像と400画素四方の白黒ランダムドットパターンをそれぞれ50%のコントラストで合成した画像を作成し、これを最終的にテクスチャ画像として用いた。

刺激画像のレンダリング時には、テクスチャ画像に含まれる撮影時の光源位置の影響を弱める目的で、レンダリング時の光源とは別に、顔表面にその光源の33%の強度で自己発光属性を与え、同時に同強度の周辺光環境を設定した条件の下でレンダリング画像を作成した。レンダリング時のその他の操作としては、

顔（高さ190 mm）に対しカメラ距離を10 mに設定することで画像に含まれる遠近法による手がかりを排除するようにした。また、影（shadow）のキャスティング計算を行わないよう処理することによって、顔の端や鼻の部分に影ができ、それを手がかりにして、参加者が顔の凹凸を判断することのないよう配慮した。

以上のような手続きで作成した刺激画像の単眼視イメージを、Figure 4に示す。ここに示した顔はすべて凹状の顔（hollow-face）であるが、錯視によって凸状に知覚されるため、光源位置が上方にある場合には下方から、下方にある場合には上方から照明されているように知覚される。また、本研究で述べる光源位置の上下は、外界座標における位置を意味している。したがって、倒立呈示の場合には、Figure 4-Aを逆さに見た画像が下方光源、Figure 4-Bを逆さに見た画像が上方光源の刺激イメージとなる。

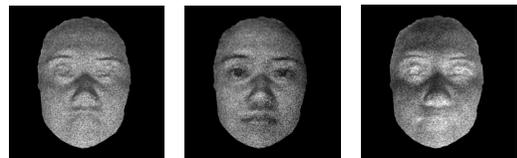
実験に使用する刺激として、上に述べたような設定のもとで、正立状態の凹状の顔に対し正面（0度）から左右2.5度まで、0.1度ごとにカメラを移動させ、51枚の画像をレンダリングして作成した。実験試行では、



A. 3D Face

B. 2D Image

Figure 3. Three- and two-dimensional data used to create the stimulus images.



A. Top-Lit Hollow-Face Images



B. Bottom-Lit Hollow-Face Images

Figure 4. Monocular images of stimuli used in the experiment.

これらの画像をステレオグラム（両眼視刺激）として呈示した。両眼視差は最大5度で、正值の視差のある状態では凹んだ顔（hollow-face）が知覚されるものであった。また、刺激の両眼視差は、0.2度おきに変化させることができ、これによって、錯視強度の測定が可能となるようにした。さらに、左右眼の刺激を入れ換えて呈示することによって、凸状に見えるように負の視差を与えることもできるようにした。

なお、以上のような手続きで刺激を作成したことから、本研究で用いる“両眼視差”という用語は、文字通り“binocular parallax”の意である。したがって、本研究における両眼視差という用語は、しばしば意識的に用いられる“binocular disparity”の訳語ではなく、“disparity”については“網膜非対応”という訳語を用いて区別した。

手続き 実験は暗室内において行い、観察距離は50 cmとした。なお、刺激の大きさ（顔の高さ）はディスプレイ表面上で100 mmであったので、刺激は、視角にして11.4度の大きさで呈示されたことになる。

まず、ステレオ画像呈示装置の調整を行った後、練習試行を50試行以上行い、その後、本試行に移った。練習試行では、どの条件の刺激が呈示されているかの符号情報が画面上に表示され、実験者は、参加者の反応が正しく行われているかをモニターした。本実験で用いた階段法の設定（後述）により、初期の試行では、両眼立体視によって判断が可能な大きな視差をもった刺激が呈示されたが、このときに明らかに誤反応の多い参加者は、分析の対象から除外した。なお、除外した参加者は3名であり、前述した実験参加者は、これらを除外した後の参加者数である。

各試行においては、ディスプレイ上に顔刺激が呈示され、参加者には、立体視ゴーグルを通してそれを観察し、凸状に見えるならばマウスの左ボタンを、凹状に見えるならばマウスの右ボタンを押して回答するように教示した。また、反応時間等は計測しないため、よく観察し、間違いのないよう判定を行うよう強調した。

顔刺激が凸に知覚されるか、凹に知覚されるかの閾値は、二重階段法により測定した。テクスチャ（3水準）、顔の呈示方向（2水準）、照明方向（2水準）のそれぞれの組み合わせにおいて、まず、2つの刺激呈示系列が用意され、一方は明らかに凹状に知覚される点（両眼視差＝＋5度）から、もう一方は明らかに凸状に知覚される点（両眼視差＝－5度）から開始された。この刺激系列は、階段状に繰り返し両眼視差を変化させ、6個の反応転換点（上昇系列であれば凹状知覚が得られた点、下降系列であれば凸状知覚が得られた点が転換点となった）が得られるまで実施された。

なお、試行数を減少させる目的で、最初の2個の転換点までは1度おきに両眼視差を変化させ、その後、0.2度おきに変化するよう設定した。

本実験で用いる実験要因の組み合わせは全12条件であったが、階段法は極限法（極小変化法）の変形法であり、閾値を求める規定の数の転換点が得られるまで、同一条件の刺激を用いて、上昇系列と下降系列を繰り返すのが一般的である。しかし、そのために被験者の予測が測定値に影響することがある。本実験では、12条件において、それぞれ2つの刺激呈示系列が用いられたが、被験者の予測の影響を避けるため、すべての呈示系列はコンピュータプログラムによって並列的に制御された。そのため、第1試行から第24試行までは、各条件における第1試行の刺激が無作為順に呈示され、25試行から48試行は各条件内の第2試行の刺激が無作為順に呈示されるというように、試行ごとに異なる条件の刺激を呈示することで、恒常法と同様、被験者の予測が入り込まないようにした。

実験終了後、各条件の組み合わせのそれぞれの階段系列において、最初の2個の転換点を除く4個の反応転換点を求め、2つの階段系列で合計8個の転換点の平均値を算出し、それを、呈示された顔刺激が凸状－凹状に知覚される閾値の代表値とした。なお、最初の2個の転換点を代表値に含めなかったのは、試行数減少のために行った1度おきの刺激変化が、極限法における極小変化量を大きく超えるため、それを代表値算出に用いることが有効とは考えられなかったためである。

結 果

本実験の結果として得られた閾値データに対し、顔テクスチャ要因（3水準：テクスチャなし、ポジティブテクスチャ、ネガティブテクスチャ）×顔刺激の呈示方向（2水準：正立、倒立）×光源位置（2水準：上方、下方）の3要因分散分析を行った。分散分析の結果は、有意性を示した項目が多岐にわたるので、有意性が確認された項目についておのおのFigureを示して説明を補うことにする。なお、得られた閾値の平均はすべて正の値となったが、これは、凹状に見えるようにある程度の（正值の）両眼視差を与えなければ、凹状の顔表面が正しく凹状に知覚されなかったことを示す。したがって、高い閾値を示した条件であるほど、hollow-face 錯視の錯視強度が大きかったことを表している。

まず、顔テクスチャの主効果が有意であった（ $F(2,18) = 13.96, p < .0005$ ）。そこで、Ryan法による多重比較（有意水準は5%水準）を行ったところ、Figure 5

に示すように、ポジティブのテクスチャをマッピングした条件では、他の条件に比べ、大きな錯視強度を示すことが認められた。それに対し、テクスチャなし条件とネガティブテクスチャ条件間には有意な錯視強度の差が認められなかった。

また、顔の呈示方向の主効果も有意で ($F(1,9) = 7.33, p < .05$)、Figure 6にみられるように、錯視は正立の顔に対して、倒立の顔よりも強く現われていた。

第3の要因の光源位置の主効果も有意で ($F(1,9) = 6.42, p < .05$)、hollow-face 錯視は、上方光源よりも下方

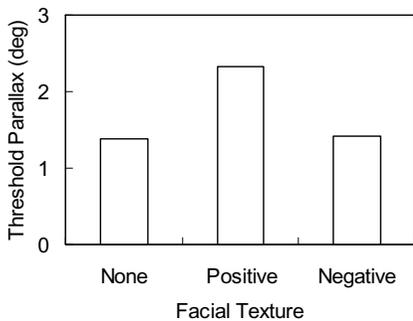


Figure 5. The effect of facial texture.

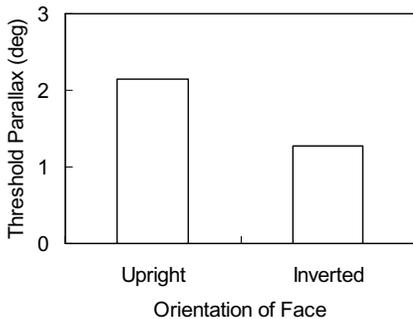


Figure 6. The effect of stimulus orientation.

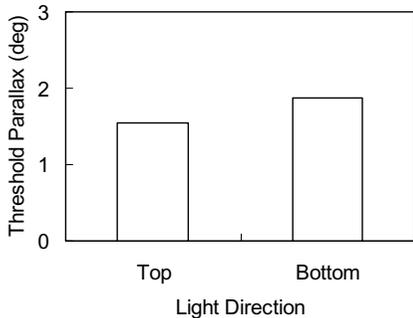


Figure 7. The effect of light direction.

光源でその強度が大きいことが示された (Figure 7)。

次に、一次の交互作用についてみると、まず、顔テクスチャ×顔呈示方向の有意な交互作用が認められた ($F(2,18) = 18.62, p < .0001$)。これについて、単純主効果の下位検定を行ったところ、Figure 8に示すように、倒立顔で錯視量が減少するという顔呈示方向の効果 (Figure 6) が、テクスチャなし条件や、ポジティブテクスチャ条件では有意差があるのに対し、ネガティブテクスチャ条件では差が認められなかった。また、顔テクスチャの単純主効果をみると、正立呈示時にはテクスチャの効果がみられたが、倒立呈示時にはテクスチャ条件による錯視量には違いが認められなかった。

顔呈示方向×光源位置の交互作用も有意で ($F(1,9) = 12.83, p < .01$)、正立に呈示された顔では、光源位置が下方にある方が錯視量は大きかった。逆に、倒立呈示された顔では、光源位置が上方にある場合に錯視量が大きくなった (Figure 9)。

なお、テクスチャ要因と光源位置の間には有意な一次の交互作用は認められなかった ($F(2,18) = 0.37, ns$)。

交互作用については、顔テクスチャ×顔呈示方向×

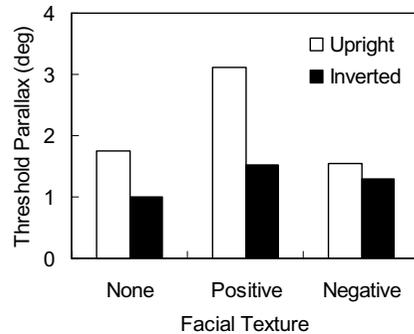


Figure 8. The interaction between facial texture and stimulus orientation.

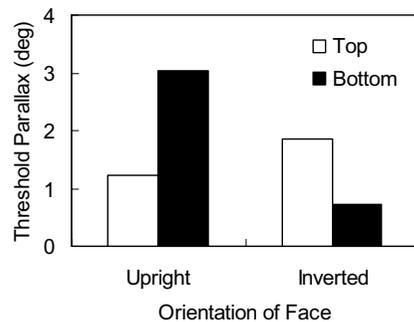


Figure 9. The interaction between stimulus orientation and light direction.

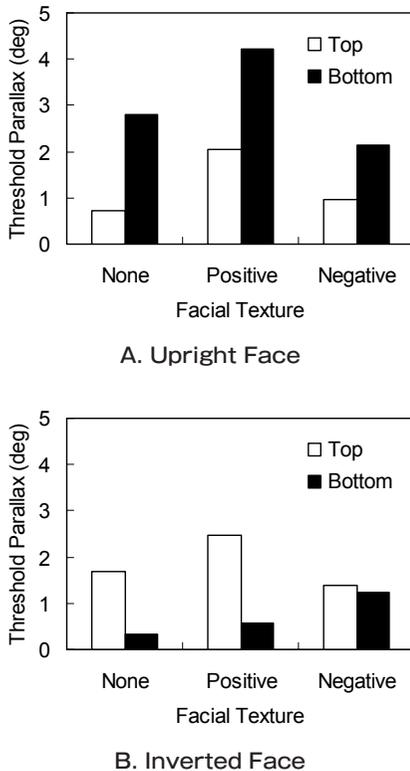


Figure 10. The interaction between facial texture, stimulus orientation and light direction.

光源位置という2次の交互作用についても有意性が認められた ($F(2,18) = 7.04, p < .01$)。Figure 10に、この3要因の組み合わせごとの錯視量を示す。先に、正立に呈示された顔では下方光源において、倒立呈示された顔では上方光源において、それぞれ錯視量が大きくなるという一次の交互作用パターン (Figure 9) が認められたが、この2次の交互作用について照明条件の単純単純主効果の下位検定を行ったところ、ネガティブテクスチャ条件の顔が倒立呈示されたときのみ、照明条件の効果がなかったことが確認された。

考 察

本研究の目的は、hollow-face 錯視の錯視強度に及ぼす顔の表面テクスチャ、顔の呈示方向、光源位置の効果を調べ、hollow-face 錯視がどのような要因によって成立しているかを検討することであった。

実験の結果は、まず、顔の表面テクスチャによって、錯視量が大きく変わることを示していた。Figure 5に

示したように、ポジティブテクスチャを貼った顔において、錯視量は特に大きくなった。それに対し、写真のネガであるネガティブテクスチャを貼った条件では、テクスチャのない条件と同等の錯視量しか得られなかった。

顔の呈示方向も錯視量に影響し、顔が正立に呈示された場合に錯視量は大きく、倒立に呈示された場合は小さくなることがわかった (Figure 6)。

顔写真が逆さに呈示されたり、顔写真の明暗が反転したネガフィルム上では、顔を識別することが極めて困難になることは古くから知られている (Galper, 1970; Galper & Hochberg, 1971; Phillips, 1972; Thompson, 1980; Yin, 1969)。これは、我々の顔認識のメカニズムが顔の情報を処理する際に、部分的特徴よりも全体的な配置の情報を、また、エッジ特徴よりも表面特徴を重視して用いていることを示唆している。言い換えれば、倒立の顔やネガの顔画像に対しては、顔認識メカニズムは十分に機能しないと考えられる。本研究においては、顔が倒立呈示されたり、ネガのテクスチャが貼られた顔で、hollow-face 錯視の錯視強度が減少した。これらの結果は、hollow-face 錯視の成立に、前述したような特性をもつ顔の情報処理メカニズムが関与している可能性を示唆している。

実験結果からは、顔テクスチャと顔呈示方向の交互作用も示された。Figure 8をみると、hollow-face 錯視の強さは、ポジティブのテクスチャが貼られた顔が正立に呈示されたときに、特に大きくなるようである。倒立呈示と明暗反転は、両者とも顔認識パフォーマンスを阻害するが、それらは独立した効果を持ち、顔の情報処理の異なる側面に影響するといわれている (Bruce & Langton, 1994)。また、吉田 (2003) は、この2つの操作が、単に顔を検出するというより原始的な反応においても同様な性質をもつことを明らかにし、刺激が顔かどうかを分類する初期の知覚過程に影響すると論じている。これらのことから、本研究の結果は、より顔らしく見える正立-ポジティブの画像において、呈示された刺激がより“顔として”処理されたことに起因すると考えられる。つまり、hollow-face 錯視は、呈示された陰影パターンが顔として処理される程度が大きければ、その錯視強度も大きくなる傾向にあると推測される。

光源位置の効果については、全体として、下方光源において上方光源よりも錯視量が大きくなるという傾向を示していた (Figure 7)。この結果は、Hill & Bruce (1993) が認めたものと全体的な傾向としては一致する。しかしながら、彼らの研究とは異なり、本研究の結果は、光源位置の効果が、顔の呈示方向に依存して

影響の向きを変えるというものであった (Figure 9)。正立呈示された顔では、光源が下方にある方が錯視量が大きかったが、倒立呈示された顔では、光源が上方にある方が錯視量が大きくなった。

我々は陰影からの構造復元のあいまいさを解決するために、一般に光源位置を上方に仮定する傾向がある。この仮定の下では、hollow-face のような凹状の表面を下方から照明すると、凸状の表面を上方から照明したときの見えたと等しくなり、凸状に知覚されやすくなる (Figure 2)。したがって、下方光源において hollow-face 錯視強度が増大する傾向は、顔パターンに限らず、あいまいな陰影パターンから3次元構造を復元する際には一般的にみられる傾向であると思われる。それに対して、本研究において、光源位置の効果が顔の向きに依存して変化したことは、我々が、顔パターンに対して、必ずしも上方光源の仮定を用いていないことを示唆するものであった。得られた結果から、我々が外界座標ではなく、顔中心の座標系の上で、光源位置の推定を行っているとは推測される。実際、本研究の結果は、我々が、顔パターンに対して「顔座標における上方」に光源位置を推定していると仮定すると説明がつく。また、光源位置の効果は、テクスチャなし条件やポジティブテクスチャ条件の顔に対しては、顔方向依存の特性を示したのに対し、顔として処理されにくいネガティブテクスチャ条件の顔では、その傾向は明らかでなかった (Figure 10)。このことも、光源位置の推定が、顔パターンに特有な処理特性と関連したものであることを示唆している。

Ramachandran ら (Kleffner & Ramachandran, 1992; Ramachandran, 1988a, 1988b) は、立体形状として知覚される陰影パターンが、潜時は遅いが知覚的群化や分凝、あるいは前注意的なポップアウトの知覚の手がかりとして機能すること、およびその上方光源の仮定が網膜座標に依存して決定される事実から、陰影から構造を復元する処理は、視覚情報処理の初期の過程にあると示唆している。たとえば、Figure 2に示したパターンにおいて、我々は、凸と凹のパターンをそれぞれひとつのまとまりとして知覚することができる。また、図を回転させて逆さにすると奥行きが反転するだけでなく、図を立てたまま、観察者が頭を傾けて逆さに見ることによっても奥行きが反転を観察することができる。

本研究では、顔パターンに対する光源位置の推定が、顔の向きに依存して決定されるという結果を得たが、このことは、顔の情報処理が、陰影パターンによる3次元形状の知覚という、視覚過程の初期段階の処理にも影響し得ることを示唆している。

最後に、本研究の結果は、光源位置の効果が顔の呈示方向とは独立に働くという Hill & Bruce (1993) の研究結果とは異なっていた。彼らは、半透明のプラスチックで作られた hollow-face を用いて、参加者が遠方より刺激に接近していき、どの段階で凹状に見え始めるかという実験を通して錯視強度を測定した。このような測定方法をとったため、参加者にとっては、顔が向こう側を向いていることは既知であったと考えられる。また、彼らの実験では単眼視においても閾値測定が可能であったことから、参加者は、両眼網膜非対応の手がかりだけでなく、頭を動かすことによる運動視差の手がかりや、刺激対象表面 (あるいはその周囲) のさまざまな手がかりも利用可能であったと考えられる。それに対して、本研究では、二重階段法を用い、試行ごとに異なった条件を呈示することにより系列効果を排除すると同時に、凹に見えるか凸に見えるかという2件法での閾値測定を行うことで、刺激の立体形状に対する参加者の知識や予測が働かない状況下での錯視強度を測定した。さらに、バーチャルリアリティ技術を応用することにより、参加者に与えられる奥行き手がかりのうち、両眼視差のみを単独に操作することができた。

これらの違いから、Hill らの実験では、参加者に認知された実験室内の空間情報が光源位置の推定等に影響したと考えられる。それに対し、本研究は、周辺環境についての情報をより統制した手法で錯視量の測定を行ったため、結果上での違いがあったと考えられる。

引用文献

- Biederman, I. (1985). Human image understanding: Recent research and theory. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, **32**, 29-73.
- Biederman, I. (1987). Recognition-by-components: A theory of human image understanding. *Psychological Review*, **94**, 115-147.
- Braunstein, M. L. (1976). *Depth perception through motion*. New York: Academic Press.
- Bruce, V., & Humphreys, G. W. (1994). Recognizing objects and faces. In V. Bruce & G. W. Humphreys (Eds.), *Object and face recognition*. Hove: Lawrence Erlbaum. pp. 141-180.
- Bruce, V., & Langton, S. (1994). The use of pigmentation and shading information in recognising the sex and identities of faces. *Perception*, **23**, 803-822.
- Cavanagh, P., & Leclerc, Y. G. (1989). Shape from shadows. *Journal of Experimental Psychology*:

- Human Perception and Performance*, **15**, 3-27.
- Galper, R. E. (1970). Recognition of faces in photographic negative. *Psychonomic Science*, **19**, 207-208.
- Galper, R. E., & Hochberg, J. (1971). Recognition memory for photographs of faces. *American Journal of Psychology*, **84**, 351-354.
- Goldstein, E. B. (1996). *Sensation and perception*. 4th ed. Pacific Grove: Brooks/Cole.
- Gregory, R. L. (1973). The confounded eye. In R. L. Gregory & E. H. Gombrich (Eds.), *Illusion in nature and art*. London: Duckworth. pp. 49-96.
- Gregory, R. L. (1998). *Eye and brain: The psychology of seeing*. Oxford: Oxford University Press.
- Hill, H., & Bruce, V. (1993). Independent effects of lighting, orientation, and stereopsis on the hollow-face illusion. *Perception*, **22**, 887-897.
- Hill, H., & Bruce, V. (1994). A comparison between the hollow-face and 'hollow-potato' illusions. *Perception*, **23**, 1335-1337.
- Horn, B. K. P. (1977). Understanding image intensities. *Artificial Intelligence*, **8**, 201-231.
- Johnston, A., Hill, H., & Carman, N. (1992). Recognising faces: Effects of lighting direction, inversion, and brightness reversal. *Perception*, **21**, 365-375.
- Kleffner, D. A., & Ramachandran, V. S. (1992). On the perception of shape from shading. *Perception & Psychophysics*, **52**, 18-36.
- Marr, D. (1982). *Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. New York: Freeman.
- Phillips, R. J. (1972). Why are faces hard to recognize in photographic negative? *Perception & Psychophysics*, **12**, 425-426.
- Ramachandran, V. S. (1988a). Perceiving shape from shading. *Scientific American*, **256** (6), 76-83.
- Ramachandran, V. S. (1988b). Perception of shape from shading. *Nature*, **331**, 163-166.
- Regan, D., Frisby, J. P., Poggio, G. F., Schor, C. M., & Tyler, C. W. (1990). The perception of stereodepth and stereomotion. In L. Spillman & J. S. Werner (Eds.), *Visual perception: The neurophysiological foundations*. San Diego: Academic Press. pp. 317-347.
- Stevens, K. A. (1981). The visual interpretation of surface contours. *Artificial Intelligence*, **17**, 47-74.
- Thompson, P. (1980). Margaret Thatcher--A new illusion. *Perception*, **9**, 483-484.
- Ullman, S. (1979). The interpretation of structure from motion. *Proceedings of the Royal Society of London*, **B**, **203**, 405-426.
- Wallach, H., & O'Connell, D. N. (1953). The kinetic depth effect. *Journal of Experimental Psychology*, **45**, 205-217.
- Yin, R. K. (1969). Looking at upside-down faces. *Journal of Experimental Psychology*, **81**, 141-145.
- 吉田弘司 (2003). 顔検出課題における明暗および上下反転の効果 比治山大学現代文化学部紀要, **10**, 175-185.