■解説（VISION Vol. 22, No. 1, 21–31, 2010）

視覚の性質を利用するコンピュータグラフィクス

山口 泰

東京大学 大学院総合文化研究科・情報学環
〒153–8902 東京都目黒区駒場 3–8–1

1. はじめに

コンピュータグラフィクス (CG) は目覚ましい発展を続け，日常生活の様々な側面で利用されるようになってきた．特に，近年では Graphics Processing Unit (GPU) という描画専用の LSI の利用が進み，一般の PC や家庭用ゲーム機などでも，3 次元 CG が日常的に用いられるようになってきている．これまでの 3 次元 CG では仮想的な 3 次元シーンを写実的に表現することに重点が置かれてきた．すなわち，光学を始めとする物理現象をできるだけ忠実にシミュレートすることによって，写実性の高い画像を追求してきた．映画やコマーシャルフィルムなどでは，写実性が非常に高くなった結果，現実の実写映像なのか CG による合成映像なのかを区別することが困難なほどである．

一方，光学シミュレーションがそのまま利用できない対象もある．たとえば，医療用の CT や MRI などによって取得される人体のボリュームデータが挙げられる．**図 1** は足のボリュームデータを半透明表示したものである．しかし，元来，人間の体内を透かして見ることはできないはずで，実際の光学現象とは異なる計算を用いて，体内を視覚化していることになる．ここで重要な点は，実際には不透明な材質であるにも関わらず，対象や注目点に応じて透明度（伝達関数）を適切に設定することである．この透明度の設定は，ボリュームデータ，すなわち対象の性質として，注目したい箇所を明示することに目的がある．つまり，対象に関する知識や興味に応じて，描画手法が制御されている．

一方，形や光とは結びつかない抽象的な情報を提示するための情報視覚化の研究も盛んに行われている．たとえば，近年の Windows でエアロと呼ばれる機能は，ウィンドウを 3 次元風に表示することで，複数ウィンドウ切り替えを容易にしている．また計算機ネットワークや大規模システムの監視などにおいて，3 次元 CG を用いた異常情報の表示が利用されることがある．特に，位置ないし位相的な関係が重要とされる場合に 3 次元 CG が利用される傾向にある．つまり，この場合にも，人間が重要と考えている場所や構造を明確化するために，対象の理解や知識に基づいて描画手法を制御している．

このような流れの中で，観察する側の人間の特性，すなわち人間の視覚の性質を考慮した

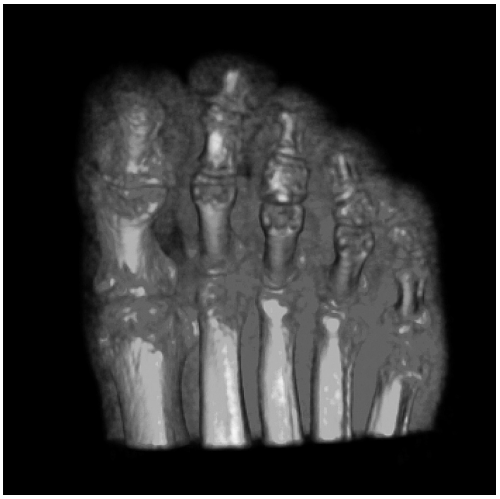


図 1 ボリュームレンダリングの例．

2010 年冬季大会特別講演．

CG の在り方も問われるようになってきている．もちろん，これまでも視覚の性質を利用していることは間違いない．たとえば，色彩の測定や再現は，人間の視覚システムの性質を利用している．最近では，視覚システムの性質を利用して，様々な効果を実現する試みがなされている．本稿では，筆者の研究室で行われている研究を中心に，CG における視覚の性質の利用について紹介していきたい．

第 2 章では低次な視覚の性質を利用する例として，だまし絵の一種である二重画像について説明する．続いて第 3 章では，画像情報を抽象化／簡略化することによって，対象を理解しやすく表現する試みとして，3 次元形状の線画表現に関して述べる．第 4 章では，人間が画像から受ける印象を機械学習によって統計処理し，画像生成に利用する例として，顔画像の魅力操作に関する研究を紹介する．画像編集や描画，形状評価などの技術は，厳密に議論するためには数式を用いて説明することが望ましいが，ここでは直感的な理解を優先して，数式等を用いずに説明することを試みる．詳細について興味のある方は，引用文献を当たっていただきたい．また，本稿では印刷の関係でモノクロ画像を用いている．カラー画像については，http://www.graco.c.u-tokyo.ac.jp/yama-lab/を参照して欲しい．

2. 二重画像

二重画像 (Hybrid Image) とは，観察距離や画像の拡大縮小に応じて，人間が認識する画像が異なって見える画像であり，Oliva ら [1] によって作成法が示された．視覚心理学や認知科学の研究者にとっては，英語の Hybrid Image という用語の方が馴染み深いかもしれないが，ここでは日本語で二重画像と呼ぶことにする．

二重画像は空間周波数に関する視覚感度の変化を利用したもので，**図 2** のように 2 枚の画像

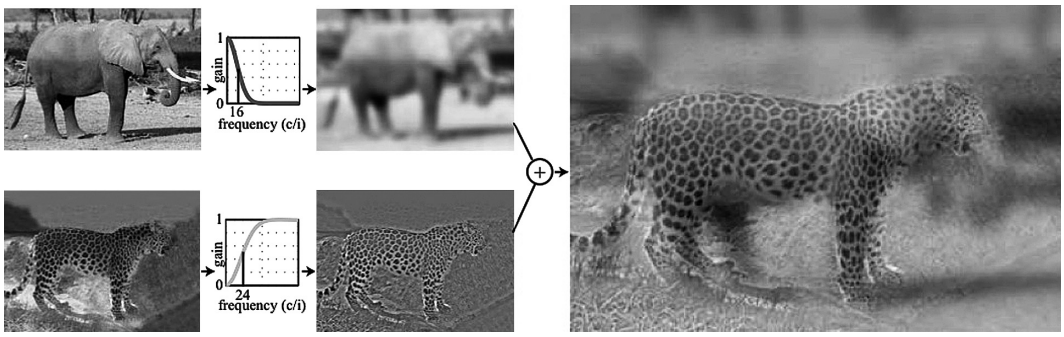


図 2　二重画像の作成法 [1].

図 3　モナリザの微笑と空間周波数成分 [3].

から，バンドパスフィルタを用いてそれぞれ異なる空間周波数成分を抽出したうえで，これらを合成することで生成される．図２の例で言えば，上段の象の画像からはローパスフィルタによって低周波数（粗い）成分を抽出し，下段のヒョウの画像からハイパスフィルタによって高周波数（細かな）成分を抽出する．これらを合成することで，近づいて観察すると細かな高周波数成分が優先されてヒョウが，遠くから観察すると粗い低周波数成分が優勢となって象が知覚される．人間の視覚系において空間解像度の変化は，画像までの距離や拡大縮小だけでなく中心視と周辺視の違いによっても生じる．モナリザが不思議な微笑を称えているのは，**図３**のように二重画像と同様の効果であるとの指摘もある[2)]．

これまでの二重画像では，与えられる２枚の画像の基本的な構成が類似したものでないと合成が困難であった．たとえば，同じ姿勢の動物同士とか，正面からの顔画像同士とかの組合せである．これに対して構成の異なる画像同士の合成は，非常に困難である．たとえば，**図４**は猫の画像と鯉の画像とを合成したものであるが，低周波数成分を抽出した猫の画像が強調されてしまい，鯉の画像は影のように見えるだけである．図４の失敗例から見てとれる問題点は，大きく３つ挙げられる．

a) ローパスフィルタを通した画像は色が残るのに対して，ハイパスフィルタを通した画像は色が失われてしまい，合成画像では低周波数成分抽出画像の色が強く感じられてしまう．

b) 一般にハイパスフィルタを通した画像はコントラストが落ちるため，やはり相対的に低周波数成分抽出画像が強調されてしまう．

c) 近寄った際に高周波数成分抽出画像だけを見えるようにするには，低周波数成分抽出画像の特徴を隠すように，画像の全域に渡って十分な高周波数成分が必要となるが，必ず原画像がそのような条件を満たすとは限らない．

図５は我々の改良手法を示したものである．まず，a) の色については低周波数成分抽出画像の色度は除去し，高周波数成分抽出画像の色を利用している．後の議論でも言及するが，淡い色を付けることで，近寄った際に物体の領域を意識させる効果があると考えている．b) のコントラストの問題については，高周波数成分抽出画像のコントラストと，低周波数成分抽出画像のコントラストとを合わせることで解決する．この際，低周波数成分抽出画像における特に暗い領域や明るい領域が目立たなくなるようするためには，Itti らによって提案された顕著性マップ[5,6)]や，Fattal らならびに Durand らによって提案された高ダイナミックレンジ (High Dynamic Range) 圧縮の手法[7,8)]が有効である．c)

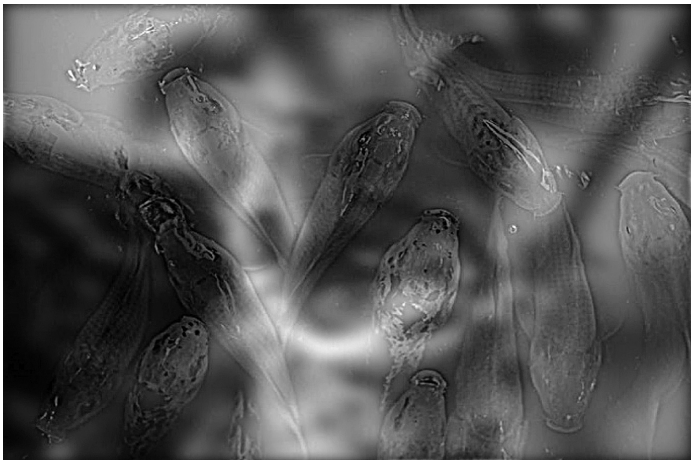


図４　二重画像の失敗例.

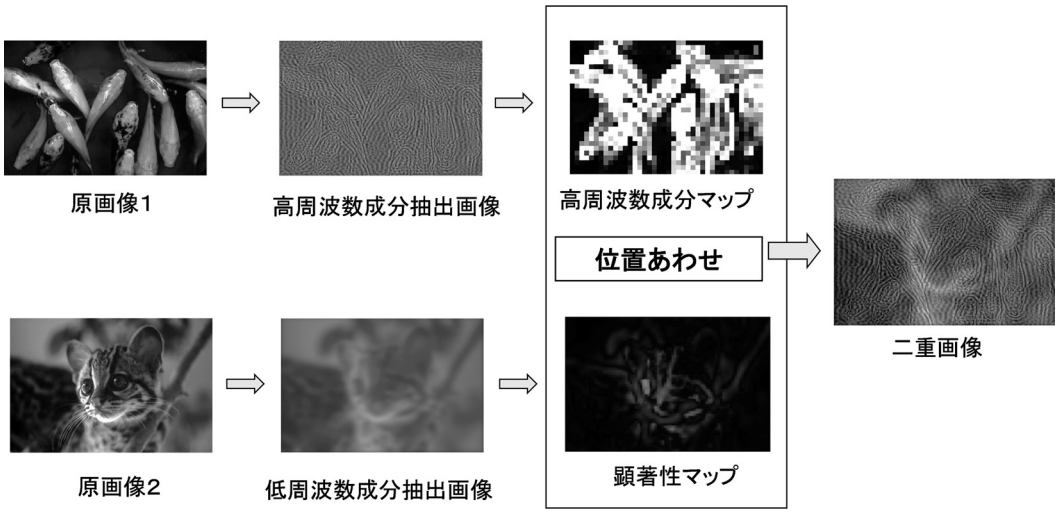


図５　二重画像作成の改良手法[4].

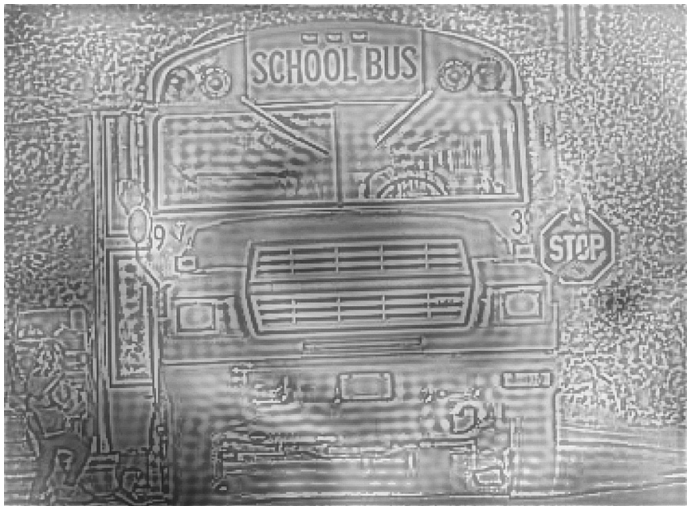


図６　改良手法による二重画像の例.

の高周波数成分を増加する手法として，Tomasi らによって提案された Bilateral フィルタによる微小な濃淡変化の強調法[9,10] や，２値ハイパスフィルタ (ideal high-pass filter) によって発生する波状の模様であるリンギングなどを利用している．図６は結果画像の例であるが，近寄って見るとスクールバス，遠ざかって見るとバラの花が見えるように作った画像である．このようにまったく異なる画像であって，二重化することができるために，ビデオ映像であっても二重化することが可能となってきている．

二重画像に関する今後の課題としては，大きく２点が挙げられるだろう．１点目は高周波数成分抽出画像に対する効果である．紹介した改良手法では，画像全域を高周波数成分で覆うために，高周波数成分を強調したりリンギングを発生させたりしている．この結果，原画像にはない高周波数成分が得られているものの，物体が判別しにくくなっている．我々は淡い色によって領域を意識させるようにしてみたが，より良い高周波数成分の増加法や領域の強調手法が望まれる．２点目は，二重画像の中に観察者

は何を見ている／意識しているのか，それを如何に観測するのかという点である．人間が知覚しているものを数量的に測定できれば，手法の検証や改善も容易になるであろう．

3．3次元形状の線画表示

二重画像の生成法でも指摘したように，画像のコントラストや色調が変化するだけでなく，高周波数成分のみを取り出したエッジ画像や，さらにはリンギングなどが含まれている画像であっても，人間は画像に含まれるシーンを理解できる．言い換えると現実に観察される陰影画像でなくとも人間は形を理解できる．さらに言えば，状況や目的によっては，ありのまま画像ではなく，特徴を記述した画像を利用することがある．その典型例が3次元形状の線画表示である．

線画は建築や機械の図面やイラストレーションに利用されている．これは対象形状の特徴をよく表すものとして利用されている．**図7**は同じ幾何形状の組合せを異なる手法で描いたものである．左は単なる陰影のみを描いているが，中央と右は現実には観察されない稜線や輪郭線も描いている．この例のように，稜線や輪郭線を描き加えることで，形状の理解が容易になる場合がある．線画は，実在する形状，特に曲面を含んだ形状の理解を促進する可能性を持っている．たとえば，遺跡や彫刻などの文化財の修復などにおいては，修復の前提や記録として図面は欠かせない存在であり，適切な線画生成法が期待されている．

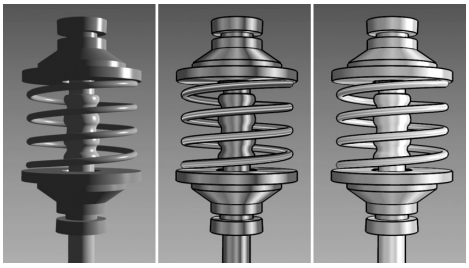


図7　線画の効果[11]．

立体形状を線画として描く際に欠かせないのは輪郭線 (Contours) で，これは必ず描かれる線と言って良い．輪郭線は視点によって変化する線であるが，3次元形状表面において視線と法線とが直交する点の集合であり，比較的容易に求められる．問題とされるのは，輪郭線以外の形状特徴を表す線であり，これまでに**図8**のように様々な線（左から陰影画，Contours，Ridges & Valleys，Suggestive Contours，Apparent Ridges）が提案されている．

Ridges & Valleys[12] は，Ohtake らによって提案された特徴線で文字通り稜線と谷線に対応し，最大／最小主曲率が極大／極小になる点の集合である．なお，最大／最小主曲率とは，曲面に接する2次曲面の法曲率（法線を含む平面との交線の曲率）が最大／最小となるものである．DeCarlo らによって提案された Suggestive Contours[13] は，視点が移動した際に輪郭線となりうる線であり，視線方向の法曲率の変曲点の集合となっている．Apparent Ridges[14] は，投影

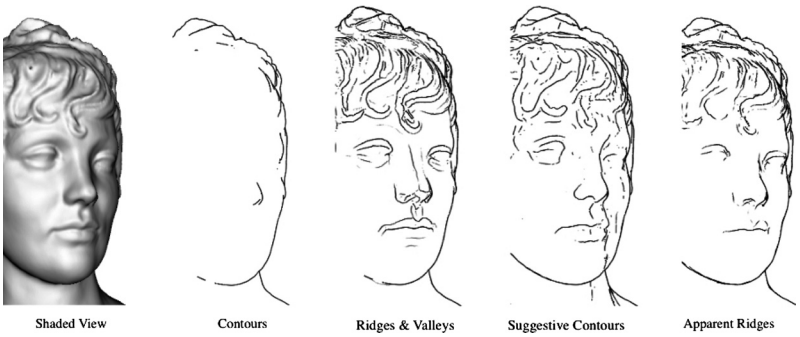


図8　3次元形状の特徴を反映する線の例[14]．

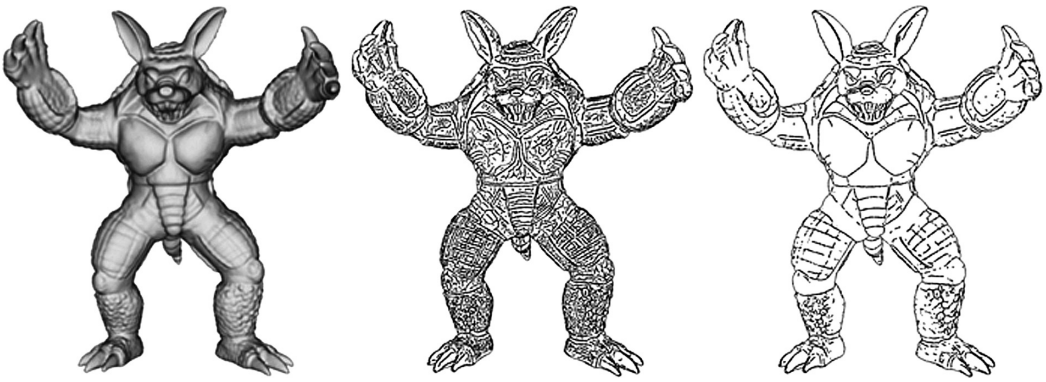
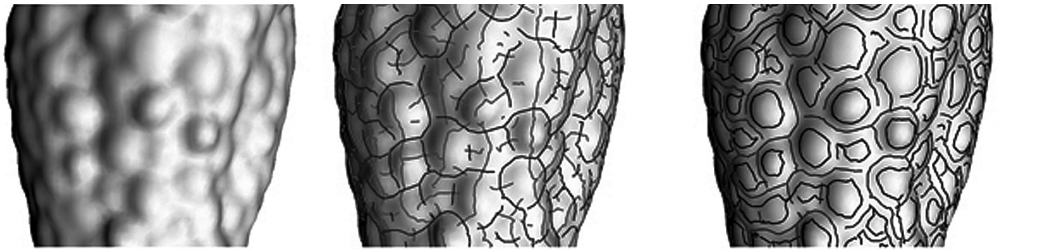


図 9　閾値による曲線の制御.



(a) Zoom in of Armadillo's leg　(b) Valleys (blue) and ridges (red)　(c) Valleys (blue) and demarcating curves (black)

図 10　曲面の 2 次近似に伴う問題と Demarcating Curves[17].

面上での法線変化（視点を考慮した最大主曲率）が極大となる点の集合で，Judd らによって提案された.

このように多くの曲線は，曲率，すなわち曲面の 2 階微分特徴量を利用している．しかし，一般に微分量は細かな変動の影響を受け易い．**図 9** は Ridges & Valleys の例であるが，極値をとる点をすべて描いてしまうと中央のように細かな凹凸部分まで稜線ないし谷線として表示されてしまう．そこで，稜線／谷線らしさとして曲率の絶対値の大きさを閾値として，描画線を制限する手法が採られる．しかし，単純に閾値を上げると必要な線まで消えてしまい，描画線が細かく破断される．このような線の破断を解決する方法の 1 つが，Canny のエッジ検出法 [15] でも利用される Hysteresis Thresholding である．この手法は高低 2 つの閾値を利用し，高い閾値を上回れば必ず描画線と判定する．低い閾値を上回る場合には既に描画線と確定した箇所に隣接している場合に限り描画線と判定する．これによって，細かな凹凸に伴う短い線は排除しつつ，線の破断を防ぐことが可能となる．図 9 右は Hysteresis Thresholding を用いて描いた結果である.

この Hysteresis Thresholding によってすべての問題が解決するわけではない．まず，ノイズの影響を完全に排除することは難しい．特に微分量はノイズの影響を受け易く，2 階微分量の曲率はノイズの影響が無視できない．このようなノイズの影響を回避するために平滑化によってノイズを取り除く方法 [16] なども提案されている．また 2 階微分特徴量で曲面を 2 次近似することにも限界がある．2 次曲面上の点は楕円的点，放物的点，双曲的点に分類され，いずれも局所的には稜線や谷線が 1 本だけしか現れない．したがって，稜線や谷線が 3 本以上集まる頂上部や窪みの底を表現することはできない．**図 10** は図 9 のモデルの脚を拡大したものであるが，小さなコブ状の突起が散在している．このような形状の場合，谷線はネットワーク状に

広がる．しかし，先に述べた理由から2階微分量だけでは，谷線の分岐を追跡することは難しく，図10中央のように多くの場所が切れてしまっている．そこで谷線（谷底）の判定を諦めて，谷の縁を描くのがDemarcating Curves[17]である（図10右）．この方法では突起をうまく表現できているが，まだノイズの影響を排除しきれずに破断が起きている．

我々は2階微分量を計算する代わりに，局所的な遮蔽関係を検出して，その遮蔽関係の分類から谷部を判定する方法を試みている．簡単化すれば，接平面方向に四方を見渡したときに，2つ以上の壁があれば谷の内部という判定を下す方法である．この方法は計測データを直接利用しており，2階微分量を利用しないことから，計測データのノイズにも強く，2次近似に伴う制約からも解放される．**図11**は谷部と判断される箇所の色を濃くして描画したものである．通常の陰影画ではとらえにくい溝が表示されており，曲率をもとに計算した谷線のような破断が起きていないことも確認できる．

このように立体を線画で描く際には，どこに線を描くべきかが大きな問題となる．そもそも，現実に3次元形状を観察する際には，対象が線の集合として目に映ることなく，形状またはその映像の抽象化によって線画が得られると考えられる．また逆に，与えられた線画から3次元形状を実際に認識できるのか，どの程度正確に再構成できるのかなどが問題となる．これらについては，最近，Coleらの研究[18,19]が注目されている．

4. 顔形状の印象

視覚から得られるより高次な情報として，様々な印象が挙げられる．特に，人間にとって顔は非常に特殊な対象であり，顔の画像から性別や年齢，さらには感情などを推定することもできる．最近，顔画像処理に関する研究や開発は急速に進展しており，顔検出や顔認証，笑顔判定なども小型のデジタルカメラに搭載されるようになってきている．顔から受けるより複雑な印象の解析についても，近年，様々な研究が行われている．

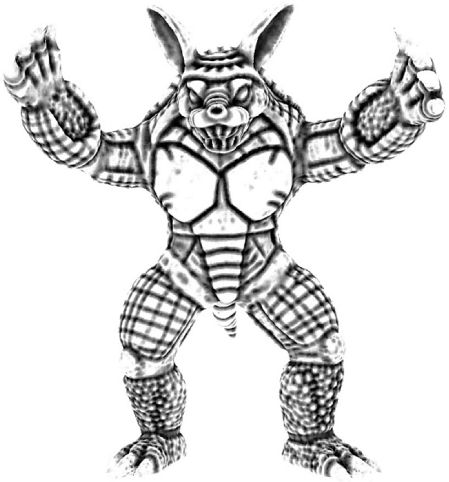


図11　遮蔽判定による谷部の検出結果．

顔印象と言った場合，古くより人類が強く興味を惹かれてきたのは顔の魅力である．多くの研究者は美の要素として若さを挙げている[20]．そのため「美しさ＝若さ」という傾向の研究が多くなっている．たとえば，顔の魅力を機械学習によって判定し，顔の魅力操作に利用しようという研究がある．Eisenthalら[21]は，人の顔形状を特徴点のベクトルとして表現し，魅力的とされる顔特徴ベクトルをサポートベクターマシン (SVM) に機械学習させ，魅力的な顔と非魅力的な顔を分離した．この考えをもとに，Leyvandら[22]は，入力された顔画像の魅力を上げるように顔を変形操作する手法を提案している．しかし，このSVMによる学習法は顔の魅力を1つの軸に沿って分離するために，重要な情報を逃している可能性も否定できない．多くの顔を平均化すると美しい顔になるという平均顔の観点から考えると，魅力的な顔は顔空間の中の平均付近に分布していることになるので，魅力の尺度を一つの軸上に投影することは無理があるように感じられる．実際に，この手法を追試してみると，顔の魅力と見た目の若さとの相関が強く見られる．すなわち，顔の魅力を高める操作は顔を若返らせ，特に老年の顔画像の魅

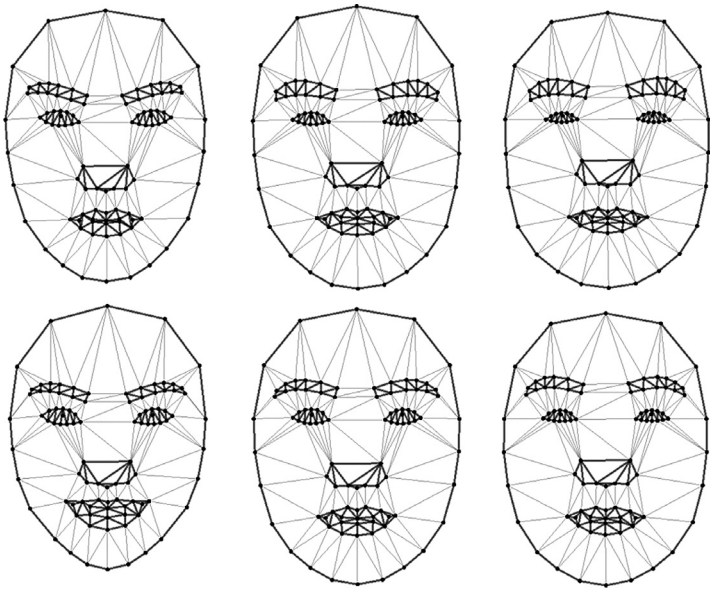


図 12　各年代の平均顔の形状．上段は男性，下段は女性．左から若年，中年，老年．

力を向上させようとすると，不自然に若返ったり，場合によっては魅力が減じてしまったりすることもある．

年齢に応じた美しさや魅力を考えようとすると，与えられた顔画像から見た目の年齢を判別し，その年齢に応じて魅力を上げることが必要となる．顔画像から年齢を推定する具体的な研究としては，たとえば，安本ら[23]が提案した平均顔を用いる手法がある．平均顔には，その集合を代表する特徴が現れることを利用し，性別・年齢別の平均顔を求め，入力顔と平均顔との差から性別と年齢を推定している．また，向田ら[24]は属性値を付加した主成分分析 (PCA) による手法を提案した．Hubball ら[25]は，やはり PCA を用いることによって，顔画像の見かけ年齢を推定するとともに，その見かけの年齢を操作する手法を提案している．どちらも若年から中年層を対象としているが，対象年齢を老年層まで拡張した場合，同様の手法で 20 代から 70 代までの幅広い年齢特徴の変化を表現することは困難のように感じられる．それは，各年代や年代間での年齢特徴の変化が異なると考えられるからである．

我々は見た目の年齢，つまり若年（20～35 歳），中年（35～50 歳），老年（50 歳～）の判別のために，SVM を利用する手法を考えた[26]．まず，顔画像を被験者に判定してもらい，典型的な若年の顔形状 20 個と中年の顔形状 20 個の組，中年顔形状 20 個と老年顔形状 20 個の組を，それぞれ学習データとして SVM に与えることで，若年と中年，中年と老年との判別器を作成した．この 2 つの判別器の結果を総合することで年齢判別を行ったところ，男女とも平均して 80% 以上の適合率と再現率を実現できた．ちなみに，**図 12** に男女の各年代の平均的な顔形状を示す．これを見て分かることは，若年顔は顎が小さく額が大きい卵形の輪郭になっており，顔に比べて目が大きい．中年顔は若年顔に比べて顔の輪郭が細長い楕円形状になっており，目も小さくなっている．老年顔は中年顔に比べて顔の下半分が垂れており，目はさらに小さくかつ目尻が下がっていることがわかる．また顔形状を変形して，SVM の年齢判定に大きく影響を与える部分を調べてみると，目と輪郭の比重が高いことも確認できた．

さらに顔の魅力に関して解析してみた．まず，年代毎に魅力的な顔画像の平均をとり，これを各年代の中心魅力顔と名付ける．**図 13** は男女，

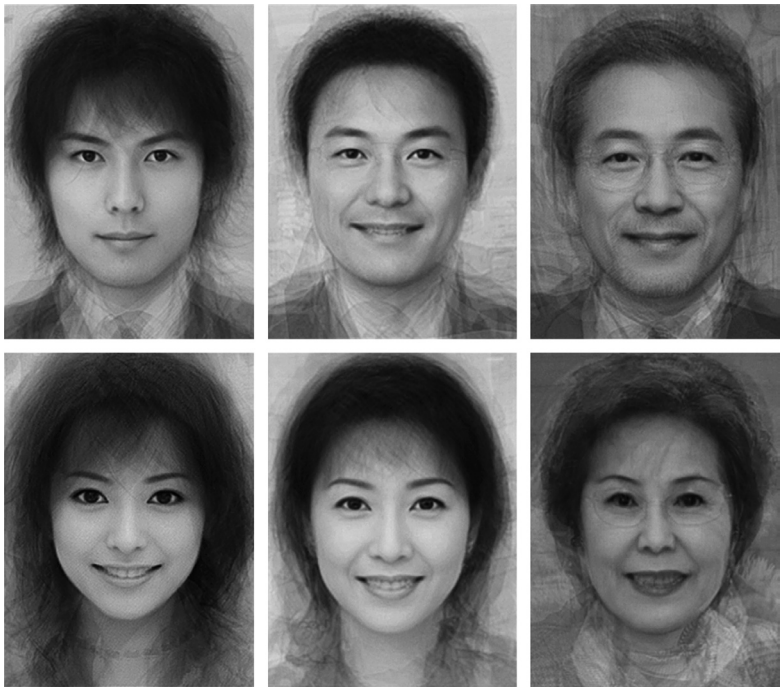


図 13　各年代の中心魅力顔．上段は男性，下段は女性．左から若年，中年，老年．

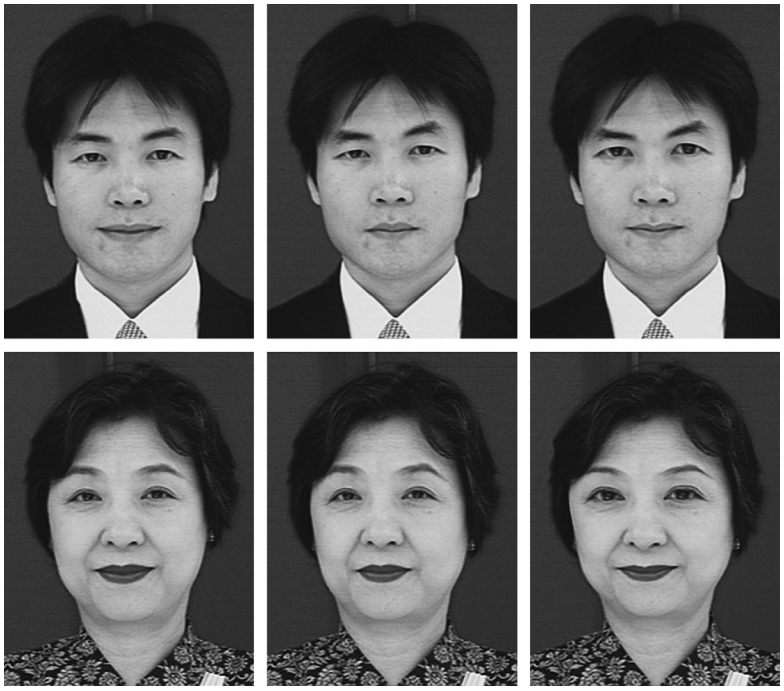


図 14　魅力操作を適用した結果．左から我々の手法，原画像，従来手法．

各世代の中心魅力顔である．この中心魅力顔を基準として，魅力的な顔と非魅力的な顔の分布を調べてみたところ，次のようなことがわかった．魅力的な顔は，中心魅力顔を中心として各軸の両側に比較的均等に分布している．またその分布の範囲は比較的狭い．これに対して，非魅力的とされる顔は，不均等に分布しており，その分布範囲は広くなっている．また，若年の顔は分布が狭いのに対して，年齢を経るほど分布範囲が広くなるとともに，顔の左右のバランスが崩れる傾向が見られた．また，やはり若い顔ほど魅力が高いと判断される傾向にあることもわかった．年齢推定と魅力に関する解析結果を利用することで，年齢を保存した魅力向上操作を実現することができた．**図 14** は，中年男性と老年女性に対して，魅力操作を加えたものである．中央が原画像，左が我々の手法による魅力向上結果，右が従来の手法による魅力向上結果である．右が不自然に若返っているのに対して，左は元の年齢を維持しつつ魅力の向上に成功している．

上で述べた処理は，顔の形状情報のみに特化した処理であり，顔のテクスチャも重要な情報となっている．テクスチャ情報と見た目年齢との関連については南ら[27]の研究などがあり，テクスチャ情報と見た目の魅力との関連については Fink ら[28]が議論している．今後は，形状とテクスチャとの相互作用を考慮した見た目年齢の推定法や魅力操作法などについても検討の必要があるだろう．また，画像の観察者と印象の関係についても解析を進めたい．同年代と異年代では見た目年齢の判定に差が見られるのか，同性と異性とでは魅力に対する感じ方が異なるのかなど興味を持つ人も多いであろう．

5. おわりに

CG は最終的に人間が観察するための画像や映像を合成・編集する技術である．当然のことながら，生成される画像や映像は，人間の視覚系に配慮したものでなくてはならないし，視覚の性質を適切に利用することが望まれる．視覚系の低次な機能については，原理的な解明も進んできており，比較的手がかりが多いように感じる．一方で，より高次の認知機能である物体領域の判定や 3 次元形状の把握などは，手探りで進められているのが現状であろう．印象評価などについても，線形に分離する問題は機械学習によって扱うことが容易になってきたように感じられる．しかし，私のような情報科学を背景とする CG 技術研究者にとっては，視覚に関する新しく知見を適切に取捨選択することが重要かつ困難なポイントとなっている．視覚研究の方々との交流によって，新たな CG 技術の展開が期待できると考えている．また，その成果が視覚研究に何らかのフィードバックを与えることができるとすれば望外の光栄である．

謝辞　本研究の一部は，日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (B) 19300023 の補助を受けたものである．なお，本稿で用いた顔画像は，財団法人ソフトピアジャパンから使用承諾を受けたものであり，権利者に無断で複写，利用，配布等を行うことは禁じられている．

文　献

1) A. Oliva, A. Torralba and P. G. Schyns: Hybrid images. *ACM Trans. on Graphics*, **25**(3), 527–530, 2006. http://cvcl.mit.edu/hybridimage.htm
2) M. Livingstone: Is it warm? Is it real? Or just low spatial frequency? *Science*, **290**(5495), 1229, 2000.
3) M. Livingstone: *Vision and art: the biology of seeing*. Abrams Press, 2002.
4) 小西真裕美，山口　泰：局所的空間周波数解析を利用した二重画像作成法．Visual Computing／グラフィクスと CAD シンポジウム論文集 (DVD-ROM)，36: 1–36:6．画像電子学会―情報処理学会，2008.
5) L. Itti, C. Koch and E. Niebur: A model of saliency based visual attention for rapid scene analysis. *IEEE Trans. on Pattern Analysis And Machine Intelligence*, **20**(11), 1254–1259, 1998.

6) R. Achanta, S. Hemami, F. Estrada and S. Susstrunk: Frequency-tuned salient region detection. *IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2009.

7) R. Fattal, D. Lischinski and M. Werman: Gradient domain high dynamic range compression. *ACM Trans. on Graphics*, **21**(3), 249–256, 2002.

8) F. Durand and J. Dorsey: Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images. *ACM Trans. on Graphics*, **21**(3), 257–266, 2002.

9) C. Tomasi and R. Manduchi: Bilateral filtering for gray and color images. *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 836–846, 1998.

10) S. Bae, S. Paris and F. Durand: Two-scale tone management for photographic look. *ACM Trans. on Graphics*, **25**(3), 637–645, 2006.

11) A. Gooch, B. Gooch, P. Shirley and E. Cohen: A non-photorealistic lighting model for automatic technical illustration. *ACM SIGGRAPH 98 Conference*, 447–452, 1998.

12) Y. Ohtake, A. Belyaev and H.-P. Seidel: Ridge-valley lines on meshes via implicit surface fitting. *ACM Trans. on Graphics*, **23**(3), 609–612, 2004.

13) D. DeCarlo, A. Finkelstein, S. Rusinkiewicz and A. Santella: Suggestive contours for conveying shape. *ACM Trans. on Graphics*, **22**(3), 848–855, 2003.

14) T. Judd, F. Durand and E. Adelson: Apparent ridges for line drawing. *ACM Trans. on Graphics*, **26**(3), 19:1–19:7, 2007.

15) J. Canny: A computational approach to edge detection. *IEEE Trans. on Pattern Analysis And Machine Intelligence*, **8**(6), 679–714, 1986.

16) E. Kalogerakis, D. Nowrouzezahrai, P. Simari, J. McCrae, A. Hertzmann and K. Singh: Data-driven curvature for real-time line drawing of dynamic scenes. *ACM Trans. on Graphics*, **28**(1), 11:1–11:13, 2009.

17) M. Kolomenkin, I. Shimshoni and A. Tal: Demarcating curves for shape illustration. *ACM Trans. on Graphics*, **27**(5), 157:1–157:9, 2008.

18) F. Cole, A. Golovinskiy, A. Limpaecher, H. S. Barros, A. Finkelstein, T. Funkhouser and S. Rusinkiewicz: Where do people draw lines? *ACM Trans. on Graphics*, **27**(3), 88:1–88:11, 2008.

19) F. Cole, K. Sanik, D. DeCarlo, A. Finkelstein, T. Funkhouser, S. Rusinkiewicz and M. Singh: How well do line drawings depict shape? *ACM Trans. on Graphics*, **28**(3), 28:1–28:9, 2009.

20) N. Etcoff: *Survival of the Prettiest: the Science of Beauty*. Randomhouse Inc., 2000.

21) Y. Eisenthal, G. Dror and E. Ruppin: Facial attractiveness: beauty and the machine. *Neural Computation*, **18**(1), 119–142, 2006.

22) T. Leyvand, D. Cohen-Or, G. Dror and D. Lischinski: Data-driven enhancement of facial attractiveness. *ACM Trans. on Graphics*, **27**(3), 38:1–38:9, 2008.

23) 安本　護，林純一郎，輿水大和，丹羽義典，山本和彦：平均顔との差に基づく性別・年令推定手法．日本顔学会誌，**2**(1), 3–13, 2002.

24) 向田　茂，蒲池みゆき，木下敬介，千原國宏：PCA を用いた年齢知覚に関与する顔形状特徴の抽出―みかけの年齢情報の利用―．信学技報，**HIP2001**(99), 17–24, 2002.

25) D. Hubball, M. Chen and P. W. Grant: Image-based aging using evolutionary computing. *Computer Graphics Forum*, **27**(2), 607–616, 2008.

26) 深田陽子，山口　泰：年齢相応な顔の魅力操作法．電子情報通信学会論文誌 D，**J92-D**(8), 1166–1175, 2009.

27) 南浩治，岩本　啓，長田みゆき，樫本明生，福田啓一：顔テクスチャ情報を用いた若顔印象の解析．第 62 回 SCCJ 研究討論会講演要旨集，33–36, 2008.

28) B. Fink and M. Neave: The biology of facial beauty. *International Journal of Cosmetic Science*, **27**, 317–325, 2005.