

絵画の陰影特徴解析に基づく仮想物体の絵画への重ね込み

佐藤 いまり[†] 佐藤 洋一^{††} 池内 克史[†]

本報告では、与えられた絵画から画家による陰影付けのメカニズムを学習し、絵画に新たな仮想物体を導入する際に違和感ない陰影で重ね込む手法を提案する。絵画においては、光源からの影響を受けて物体表面で反射した明るさは画家の視点を通し画家の主観的な色合いに変換されキャンパス上に表現される。この画家による色合いの変換の工程は、絵画におけるダイナミックレンジを広げる目的および絵画の表現性を高める目的で施されるといわれている。この色変換の工程に対し、これまでの絵画解析の研究はそれぞれの画家の絵画がどのような色分布を持っているかなど、絵画全体に対する解析を行ったものがほとんどであり、どのような明るさに対してどのような色を用いるかといった具体的な陰影付けのメカニズムそのものを解析することを目的とした手法は提案されていない。本研究では、単画像からの光源分布推定手法を用いて絵画が描かれた際の物体の見えを再現し、画家による色変換のメカニズムを絵画内に観察される陰影から推定する。そして、推定された陰影付けのメカニズムを利用することにより、仮想物体を絵画に違和感のない陰影で重ね込む手法を提案する。

Superimposing Synthetic Objects into Oil Paintings with Artistic Shadings

IMARI SATO,[†] YOICHI SATO^{††} and KATSUSHI IKEUCHI[†]

We present a new technique for superimposing synthetic objects onto oil paintings with artistic shadings that are consistent with those originally painted by the artists in this paper. In a colored medium such as oil painting, artists often use color shift techniques for adding some artistic tones to their paintings as well as for enlarging their dynamic ranges. For instance, in the painting by Vincent van Gogh shown in Fig. 1, non-photorealistic blue to white color transition is observed inside shadows cast by the book placed on the wooden table. In this study, we determine color transitions performed by artists from given paintings and automate their processes so that synthetic objects with shadings consistent with those originally painted by the artists can be superimposed onto paintings.

1. ま え が き

絵画の世界では、光源からの影響を受けて物体表面で反射した明るさは、画家の視点を通して独特の色合いをもってキャンパス上に表現される。この画家による色変換の工程は、絵画におけるダイナミックレンジを広げる目的および画家の表現性を高める目的により施されるといわれている。

たとえば、図 1 に示すゴッホの絵画では、物体が机の上に落とす影が青色から白色に変化しているが、この絵画がこれらの影を生成するようなカラー光源下で描かれたとは考えられず、観察される陰影から非現実的

な絵画的陰影へ変換され描かれたと考えるのが自然である。そのため、画家の陰影付けのメカニズムが分からない限り、同じような陰影で新たな仮想物体を絵画に重ね込むことは難しい。

このような絵画独特の色彩については、絵画分類の研究分野においても様々な成果があげられている¹⁾。しかしながら、その多くはある絵画がどのような色分布を持っているかなど絵画全体に対して解析したものであり、観察される明るさに対してどのような色をその画家が用いたのかといった陰影付けのメカニズムそのものを解析するものではない。

また、コンピュータグラフィックス (CG) のノンフォトリアリスティックレンダリングと呼ばれる研究分野においても絵画風の CG 画像を生成するための技術が開発されている^{4),6)~9)}。しかしながら、これらの技術の多くは水彩画風あるいは油絵風といった筆使いを CG 画像上で実現する目的のために開発されたも

[†] 東京大学大学院学際情報学府
Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, The University of Tokyo

^{††} 東京大学生産技術研究所
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

のであり、画家の陰影付けのメカニズムを直接的に絵画から抽出するという試みはなされていない。そのため、モネ風、ゴッホ風といった既存の絵画風画像への変換フィルタを利用しても、ツール作成者の主観に基づく色変換が行われることがほとんどであり、その結果、指定した画風であるという根拠の薄い画像が生成されることが多い。

絵画的なCG画像を生成するためには、画像中に絵画的な筆使いを加えることのみならず、個々の画家の色使いを考慮した絵画的な陰影付けを画像に施すことが重要である。本研究ではこれらの要素のうち、絵画的な陰影付けに注目し、画家特有の色使いのメカニズムを絵画から直接的に推定し、仮想物体を絵画に違和感のない陰影で重ね込む手法を提案する。

画家による陰影付け方法の解析が難しい要因として、絵画が描かれた際のシーンの情報が残されておらず、画家がどのような明るさを観察して、どのような色をキャンバス上にのせたのかといった因果関係がつかめないことがあげられる。

本研究では、単画像からの光源分布推定手法を応用することにより絵画が描かれた際の物体の見えを再現し、画家による色変換のメカニズムを絵画内に観察される陰影から推定する。そして、推定された陰影付けのメカニズムを用いることにより、仮想物体を絵画に違和感のない陰影で重ね込む手法を提案する。

2. 入力絵画の前提条件

本研究で用いる単画像からの光源分布推定手法はシーンの光源環境とその光源環境下で観察される物体表面の反射とのメカニズムに基づくものである。絵画の中には記録された明るさが物理モデルに従っているとはいえないものも数多く存在するため、提案手法が適用できる絵画も限定される。

そこで、以下に説明する手法の仮定が成り立つと考えられる絵画から画家特有の陰影付けのメカニズムを抽出し、同じような色合いで仮想物体を絵画に重ね込むことを本研究の目指すところとする。

- (1) 入力絵画内に物体により落とされる影が観察され、影を落とす物体(以下、遮蔽物体)と影が落とされる面(以下、シャドウ面)の3次元幾何形状はあらかじめ得られるものとする。図1では、机上の本が遮蔽物体に机の天板がシャドウ面に対応し、これらの形状は1枚の写真からシーンの幾何モデルを推定するモデリングソフト¹³⁾を利用することにより得ている。
- (2) 入力絵画内に観察される明度は、物理的に正し

い輝度変化をある程度含むものとする。

- (3) シャドウ面の反射特性は既知とする。シャドウ面を均一な Lambertian 面と仮定し、シャドウ面の最も明るい画素の値を拡散反射パラメータとして得ている。
- (4) シャドウ面と遮蔽物体との間の反射の影響は少ないものとする。提案手法では物体間の反射をモデル化していないため、たとえば図2に示す絵画のように物体相互の反射の影響が強く描かれた絵画に本手法を適用することはできない。
- (5) 光源は白色と仮定する。絵画内に観察されるシャドウ面の色は、光源色、反射特性、画家による色変換に依存するため、画家によりどのような色変換が行われるかについての知識がまったくない状態では、色変換による影響と光源色による影響とを分けることはきわめて難しい。そこで、提案手法では光源色は白色と仮定して、絵画内で観察される明るさより画家による色変換を求めていくアプローチをとる。

(1)~(5)の仮定に基づき、これらの仮定が成り立たないと考えられる絵画(近代画などの、抽象度が高く光学的に正しい情報をほとんど含まないものや、相互反射の影響が強く描かれている絵画など)は入力の対象とならないものとする。

入力絵画が提案手法の前提条件を満たしているかどうか判断については、入力絵画から推定された光源環境の分布を確認することにより行うこともできる。たとえば、入力絵画が上記の仮定を満たさない場合には、その絵画より推定されたシーンの光源環境にも大きく影響が表れ、このような場合、光源が点在する雑多な光源分布を得てしまうことが多い。一般的な日常のシーンではそのような雑多な光源分布はあまり考えられないため、そのような場合は入力絵画が上記の前提条件を満たしていないと考えることができる。

本報告の構成は以下のとおりである。まず、3章で絵画からのシーン幾何形状の取得方法について説明する。次に4章と5章でシーンで観察された物体表面の明るさと絵画上で表現された明るさの関係について考える。次に、6章で単画像からの光源分布推定に基づいた絵画の陰影付け手法の解析方法を説明し、7章で推定された陰影付けメカニズムをもとにした合成画像の生成方法について述べ、8章で実験結果を示す。最後に9章で結ぶ。

3. 画像からの幾何形状の取得

1枚あるいは少数枚の画像から物体やシーンの3次



図 1 “Still Life: Drawing Board, Pipe, Onions and Sealing-Wax”. フィンセント・ファン・ゴッホ作
Fig. 1 “Still Life: Drawing Board, Pipe, Onions and Sealing-Wax” by Vincent van Gogh.



図 2 “Tureen and Apple”. ベルト・モリソ作
Fig. 2 “Tureen and Apple” by Berthe Morisot.

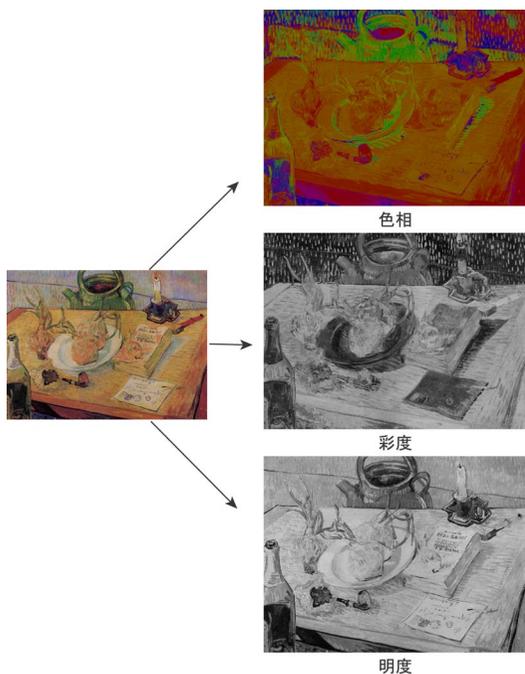
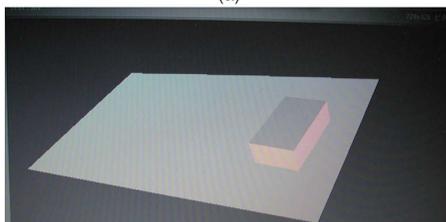


図 6 色相，彩度，明度への変換

Fig. 6 Color conversion from RGB (red, green, blue) to HSV (hue, saturation, value).



(a)



(b)



(c)

図 3 Canoma により得られた幾何形状：(a) プリミティブを利用した幾何形状特徴の入力，(b) 得られた遮蔽物体およびシャドウ面の 3 次元形状，(c) テクスチャが付加された 3 次元形状
Fig. 3 Reconstruction of the scene: (a) Original photograph with marked edges indicated, (b) Recovered model, (c) Texture-mapped view from a different viewing position.

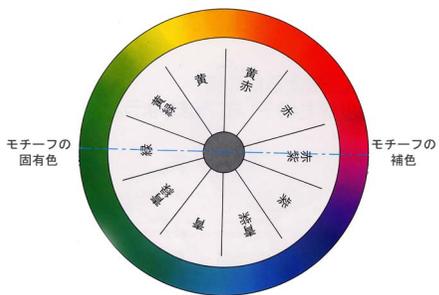


図 7 色相環

Fig. 7 Hue diagram.

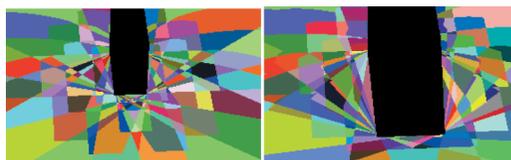


図 8 遮蔽係数による画素の分類
Fig. 8 Clustering results.

元形状をインタラクティブに復元する技術はフォトモデリングと呼ばれ、コンピュータグラフィクスおよびコンピュータビジョンの分野で広く開発が進められている。また、これまで提案されてきた手法の中には実用化されているものも多く、本研究で用いた幾何形状のモデリングソフト「Canoma」¹³⁾も、そのフォトモデリング手法の1つとして広く注目を集めた Debevecらの「FAÇADE」と呼ばれるモデリングシステムのアルゴリズム³⁾に基づき商用に開発されたソフトである。

フォトモデリングでは、ユーザが写真中の対象物の幾何特徴(線や点など)の位置を手作業で入力することで、写真測量の原理に基づき対象物体の3次元形状を得る。しかしながら、幾何形状特徴の位置の指定など手作業とする部分が非常に多いこと、ユーザにより指定される幾何形状特徴の位置の精度がそのまま三次元形状の復元の精度に影響してしまうことがその問題点としてあげられてきた。

そのような問題点を解決するために開発されたのが「FAÇADE」である。「FAÇADE」では、一般的にほとんどの人工物は対象的な形状を持っているという前知識を利用することによりユーザによる幾何形状特徴の入力を軽減し、また、コンピュータビジョンにおけるカメラキャリブレーション手法における最適化手法などを応用することにより、ユーザにより指定された幾何形状特徴の位置に多少の誤差が含まれている場合でも、3次元形状を正確に求めることを実現している。

「FAÇADE」における改良に加え、本研究で用いた「Canoma」では人工物に特有な情報を最大限活用するため、三角錐、箱などの人工物のプリミティブをあらかじめ準備している。ユーザがこれらのプリミティブを画像の幾何特徴にあてはめながら作業を進め、ユーザにより入力された位置情報とプリミティブを構成する要素(面と面との垂直の情報など)の双方を利用して物体形状を解くことにより、手作業による幾何特徴入力の誤差の影響を受けにくい形でモデル形状を得ることを可能としている。

そのため、フォトモデリング手法を絵画に適用する際に問題となる画家により描かれた幾何形状自体の誤差に関しても、あらかじめ箱型、三角錐といった人工物のプリミティブを利用して絵画中の幾何形状特徴を指定することにより、幾何特徴の誤差の影響を軽減し、対象物体に近い形状を得ることができると考える。また、得られた幾何形状を利用して行われる光源推定手法の方にも与えられた幾何形状の多少の不正確さを吸収するような安定化の工夫が施されている。

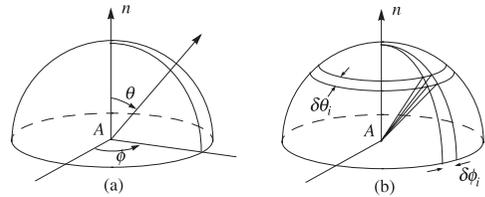


図4 光源環境の近似

Fig. 4 Approximation of illumination distribution.

「Canoma」により得られた遮蔽物体とシャドウ面の幾何形状を図3に示す。

4. シーンにおいて観察される物体表面の明るさ

本章と次章では、シーンで観察された物体表面の明るさと絵画上で表現された明るさとの関係について考えていく。

提案手法では、全方向からの光源の寄与分を考慮に入れ、図4(a)に示すように面光源を立体角を持つ光源の集まりとして近似し、光源環境のモデルとして利用する。本章では、このようにモデル化された光源環境から物体表面への照度とその照度を受けたときに観察される物体表面の明るさの関係について考える。

図4において、中心点Aから、 (θ_i, ϕ_i) の方向に存在し、微小角度 $\delta\theta$ と $\delta\phi$ に対応する微小領域を考えると、面光源全体からの点Aへの照度Eは、以下のような2重積分により求めることができる⁵⁾。

$$E = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_0(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i \quad (1)$$

ここで、 $L_0(\theta_i, \phi_i)$ は (θ_i, ϕ_i) の方向からの単位立体角あたりの輝度、 $\cos \theta_i$ は照射角度による光源輝度の減衰を示すパラメータを表している。

次に式(1)で与えられる2重積分の項を半球上で等密度で分布する等立体角($\delta\omega = \frac{2\pi}{n}$)での均等なサンプリングによる離散的な積分として近似する。等立体角 $\delta\omega = \frac{2\pi}{n}$ あたりの光源輝度を $L(\theta_i, \phi_i)$ とすると、面光源全体からの点Aへの照度Eを与える式を以下のように得る。

$$E = \sum_{i=1}^n L(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \quad (2)$$

さらに、シーンに存在する物体の遮蔽により光源環境からの寄与分が減った場合(図5(b)), 物体表面の明るさは、遮蔽されない光源からのエネルギーの総和として以下のように求まる。

$$E' = \sum_{i=1}^n L(\theta_i, \phi_i) S(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \quad (3)$$

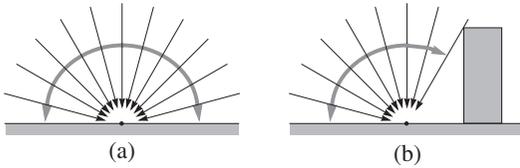


図5 物体表面の照度：(a) 遮蔽なし，(b) 遮蔽あり

Fig. 5 Total irradiance: (a) without occlusion of light, (b) with occlusion of light.

$S(\theta_i, \phi_i)$ は物体による遮蔽状況を表す係数を表し， $L(\theta_i, \phi_i)$ が物体により遮蔽される場合は， $S(\theta_i, \phi_i) = 0$ ，そうでない場合は $S(\theta_i, \phi_i) = 1$ とする．

ここで，物体による遮蔽が生じない場合（図5(a)）に観察される物体表面の明るさを I ，物体による遮蔽が生じる場合（図5(b)）に観察される明るさを I' とすると，物体表面が Lambertian 面の場合， I と I' は以下のような関係を持つ．

$$I' = I \frac{E'}{E} \quad (4)$$

5. 絵画における物体表面の明るさ

物体表面の明るさ I' を観察した画家は，観察された明るさをそのまま記録するのではなく，観察された色を画家特有の色彩に変換しキャンパス上にのせていく．しかしながら，画家により描かれる世界はシーン見えをまったく無視したものではなく，距離をおいて絵画を鑑賞することで各色が視覚混合され，そのことにより表現される豊かな色合いの実現を目指した結果であるといわれている²⁾．

また，絵画の技法として，物体の明部には物体の固有の色（固有色）に近い色を用いられ，陰影部分には固有色から離れた色を利用されることが多いことが知られている²⁾．たとえば，ゴッホの絵画を色相，彩度，明度に変換した図6を見てみると，机の明部には物体の固有色が用いられ，机上の物体により落とされる影では影内の明るさの変化に応じて，固有色の黄色から補色である青色に変化している様子がよく分かる．図7に色相環を示す．

さらに，彩度においても明部から陰影部へと大きな変化を示しており，色相，彩度といった絵画の色彩を決定する要素に画家の特徴が強く表れている様子がよく分かる．さらに，陰影部分においては，色相，彩度ともに類似したパターンが観察され，そこにはある一定の陰影付けのルールのようなものがあることが考察される．一方，物体表面の明るさを示す明度に関しては机上の物体周辺から机上の明部にむかって明るくなるような変化を示しており，色相や彩度よりも画家が

観察したと思われる実際のシーンの明度に近いものとなっていることが考察される．

本研究では，このように，光源の遮蔽により光源から寄与分が変化し，それにともない物体表面の明るさが変化している箇所において絵画の色彩も大きく変化している点に注目し，物体上にあらたに物体が重ね込まれた際に画家により施されると考えられる色合いの変化を以下のとおり考える．

まず，絵画中に観察される物体表面の明部の照度を E ，陰影部の照度を E' として，物体表面の照度を 0 から 1 の照度比 ($\frac{E'}{E}$) に正規化し，各照度比に対し画家により描かれる色はどのように変化するのか，照度比と色変換の関係を求めていく．

(1) 照度変化と色相変化の関係

与えられた絵画から，照度比の変化にともない色相がどのように物体の固有色から変化するかを求める．絵画の技法として物体の明部には物体の固有色を用いることが知られているため，固有色の色相 h を物体の明部から求め，それに対して照度の変化にともない陰影部の色相が固有色からどのように変化しているかを求めていく．

ここでは，異なる固有色を持つ物体にも適応できるように，色相の変化を差分としてモデル化し，照度比 $\frac{E'}{E}$ のときの色相の変化分 $H(\frac{E'}{E})$ を明部の色相 h とこの照度比のときに観察される色相 h' を用いて以下のとおり求める．

$$H\left(\frac{E'}{E}\right) = h' - h \quad (5)$$

(2) 照度変化と彩度変化の関係

物体の彩度に関しても，物体表面の明部では一定で陰影部では明部より小さな値に変化していることに注目し，物体の明部の彩度 s として，照度の変化による陰影部の彩度 s' の変化 $S(\frac{E'}{E})$ を以下のように求める．

$$S\left(\frac{E'}{E}\right) = s'/s \quad (6)$$

(3) 照度変化と明度変化の関係

同様に照度比の変化にともない物体表面の明度の变化を求める．物体の明部の明度を v として，それに対して照度の変化により陰影部の明度が v' がどの程度変化しているかを示す $V(\frac{E'}{E})$ を以下のように求める．

$$V\left(\frac{E'}{E}\right) = v'/v \quad (7)$$

(4) 色相変化，彩度変化，明度変化に基づく色合いの決定

あらたな物体をシーン配置することにより、物体表面上の点の照度が E から E' に変化した場合、画家が用いると考えられる色合いを求める。照度変化が生じる前の物体表面の色相を h 、彩度を s 、明度を v とすると、照度比が $\frac{E'}{E}$ に変化した場合に画家により描かれると考えられる物体表面の色相 h' 、彩度 s' 、明度 v' は、式 (5)~(7) で求めた $H(\frac{E'}{E})$ 、 $S(\frac{E'}{E})$ 、 $V(\frac{E'}{E})$ を用いて、

$$h' = h + H\left(\frac{E'}{E}\right) \quad (8)$$

$$s' = s * S\left(\frac{E'}{E}\right) \quad (9)$$

$$v' = v * V\left(\frac{E'}{E}\right) \quad (10)$$

のように求めることができる。求めた h' 、 s' 、 v' を RGB 値に変換することにより、照度比が $\frac{E'}{E}$ に際に画家が描くと考えられる色合いが求まる。

6. 色相変化・彩度変化・明度変化の解析

本章では、単画像からの光源分布推定手法を絵画に適用して絵画が描かれた際のシーンの見えを推定し、そのシーンにおいて観察されるべき物体の見えを考慮することにより、画家により施される色変換のメカニズムを求めていく。具体的には、絵画内において陰影付けの傾向を顕著に観察することができる物体の影を利用することにより以下の手順でそのメカニズムを求めていく。

- (1) 絵画の中に描かれた物体の中から解析に利用する遮蔽物体とシャドウ面を選定し、この遮蔽物体によりシャドウ面に落とされた影を利用することにより、絵画が描かれた際の光源分布を推定する。絵画中に描かれる陰影では、色相、彩度に比べて明度に関しては画家が観察したと思われる実際のシーンの明度に近いものとなっていると考えられる点に注目し、明度画像から物理的に存在可能な光源分布を推定する。
- (2) 推定された光源方向に白色の光源を配置し、絵画が描かれた際の物体表面の照度比を計算する。
- (3) 影内の各画素において、求められた照度比と画素の色相、彩度、明度を比較することにより、個々の照度比に対しどのような色変換が行われるのかを求める。

以下、これらの手順について具体的な処理を説明する。

6.1 光源環境の推定

提案手法では絵画が描かれたシーンでは白色光源の

みが存在すると仮定するため、本章では白色光源の輝度分布を絵画の明度画像より推定する。具体的には、実世界の光源分布を近似する式 (3) の光源輝度 $L(\theta_i, \phi_i)$ を著者らにより提案された物体の陰影に基づく光源分布推定手法^{(11),(12)} を用いて推定する。以下、推定手法について簡単に説明する。

式 (3) により求められた光源分布全体からのシャドウ面の点への照度は、ある輝度を持つ光としてこの点において反射され、この点の明るさとして観察される。ここで、絵画内のシャドウ面における反射は拡散反射のみであり Lambertian モデルに従うと仮定すると、式 (3) より、明度画像において観察されるべき明るさ P を求める式を以下のとおり得る。

$$P = \sum_{i=1}^n K_d L(\theta_i, \phi_i) S(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \quad (11)$$

K_d は拡散反射の色と強度を示す定数を表す。ここで、 $K_d S(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i$ を計算することができる係数 a_i としてまとめ、 $L(\theta_i, \phi_i)$ を未知数 L_i とすると、式 (11) から、シャドウ面の各画素に対し、未知数 L_i に対する線形方程式 $P = \sum_{i=1}^n a_i L_i$ を得る。

このことにより、シャドウ面から m 個の画素を選定すると、それらの画素の値 P と未知数である光源輝度 $L(\theta_i, \phi_i)$ を以下の m 個の方程式で関係付けることができる。

$$P_j = \sum_{i=1}^n a_{ji} L_i \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (12)$$

したがって、連立方程式を解くのに十分な数のピクセルを選定することにより、未知数である光源輝度を解くことができる。

著者らにより提案された手法⁽¹²⁾ では、画像中に観察される各画素において計算された遮蔽係数 $S(\theta_i, \phi_i)$ の組合せを解析し、この解析に基づいて解の安定性を考慮しながら推定する光源輝度 L_i の分布を設定するという前処理を行っている。遮蔽係数の組合せによる画素のグループ化の様子を図 8 に示す。ここで、同じ色で示された領域は同じ遮蔽係数 $S(\theta_i, \phi_i)$ の組合せを持っていることを示しており、中央の黒い領域は遮蔽物体に相当する。

また、各グループに対し、そのグループに所属する画素の平均値を求め、このグループが示す遮蔽係数 $S(\theta_i, \phi_i)$ の際に観察される色とすることにより、入力

$S(\theta_i, \phi_i)$ 、 $\cos \theta_i$ は、シーンの幾何的な情報から計算することができる値、 K_d はシャドウ面の最も明るい画素の値を拡散反射パラメータとして得ている。

画像に含まれるノイズなどの影響や物体の形状誤差による影響を軽減している。そして、この手法では、そのように解の安定性を考慮して設定された各光源の輝度 L_i を画素のグループ化によりノイズなどの影響を取り除いた明るさから、光源輝度は非負であるという光源が持つ物理的な拘束を利用して安定に解いている。

絵画にこの光源推定手法を適用する際にも、上記の画素の遮蔽係数に基づくグループ化による明るさの平滑化の作用は大きく、これにより画家のタッチに起因する画素間の局所的な変化に推定が大きく左右されることが回避でき、実験結果で示す図 10 (a) のゴッホ (上段)、レンブラント (下段) の絵画例とともに、明度画像内に観察される遮蔽物体が落とす影と同じような広がりを持つ影を生成するような光源輝度分布を得ることができた。

また、光源輝度は非負であるという光源の持つ物理的な拘束のもと光源分布を解くことの作用も大きく、この拘束により影内の明るさを一部だけを明るくするような負の光源 (負の輝度を持つ光源のため、この光源が遮蔽される領域が明るくなるといった実光源とは反対に作用する光源) を含むことなく、絵画内に観察される影の特徴に最も近い影を生成できかつ物理的に存在可能な非負の光源分布を求めることができた。

6.2 照度比と色相, 彩度, 明度変化への対応関係の解析

本章では、推定された光源分布を用いてこのシーンで観察されるべき遮蔽物体の影を再現し、再現された影内の明るさと実際に絵画内で観察される明るさとを比較することにより、どのような色相変化, 彩度変化, 明度変化が画家により施されているかを解析する。

まず、推定された光源分布を用いて、シャドウ面の各画素における照度を求める。次にシャドウ面において観察される最大の照度を E , 各画素の照度を E_i とし、各画素における照度比を $\frac{E_i}{E}$ (0 から 1 までの 100 段階) として求める。

次に、シャドウ面の明部 (照度 = E の画素) より明部の色相 h , 彩度 s , 明度 v をその平均値として求め、陰影部 ($E_i < E$ の照度を持つ画素) より各照度比 ($\frac{E_i}{E}$) のときに観察される色相 h_i , 彩度 s_i , 明度 v_i を同じ照度比を持つ画素の平均として求める。

求めた h と各照度比のときに観察される h_i を式 (5) に、 s と s_i を式 (6) に、 v と v_i を式 (7) にそれぞれ代入することにより、各照度比 $\frac{E_i}{E}$ に対応する色相変化 ($H(\frac{E_i}{E})$), 彩度変化 ($S(\frac{E_i}{E})$), 明度変化 ($V(\frac{E_i}{E})$) を求めていく。

図 9 にこのようにして求められたゴッホの絵画における照度比と色相変化, 彩度変化, 明度変化の関係を示す (上段)。ここで、横軸は推定された光源分布により求められた照度比 $\frac{E_i}{E}$ を示し、縦軸は各照度比において絵画中で観察される色相変化, 彩度変化, 明度変化をそれぞれ示している。

ゴッホの絵画から得られた色変換のプロットでは、照度比が小さい部分では物体の色相が補色に近い色合いが利用され、明部に近付くにつれ色相が固有色に近付いていく様子がよく分かる。また、彩度に関しては、照度比 0.6 前後で大きく変化するところが大きな特徴となっており、明度に関してはゆるやかな変化ながら、照度比が大きくなるにつれ明るくなるように描かれている様子が分かる。

また、図 10 下段 (a) のレンブラントの絵画より得たプロットを図 9 に示す (下段)。この絵画は写実的な絵画のため実世界のシーンで観察される物体表面の変化に似たプロットが得られ、色相, 彩度とも物体表面の明部から陰影部にかけて大きな変化は見られず、明度に関しては線形変化に近いプロットが得られた。また、色相変化に関しては少し特徴があり、照度比が小さくなるにつれ、色相がゆるやかに赤色に近づく傾向が見られた。

次に、上記で得た照度比と色相変化, 彩度変化, 明度変化の関係を示すプロットを入力として、照度比とこれらの変化との関係を関数を用いて近似する。この関数を利用することにより、画家による色変換を少ないパラメータを用いて画像生成に利用することが可能となる。具体的には、Nelder-Mead simplex アルゴリズム¹⁰⁾に基づき、照度比と色変換の関係を示すプロットにおいて照度比 $r = \frac{E_i}{E}$ のときの ($H(r)$), 彩度変化 ($S(r)$), 明度変化 ($V(r)$) と照度比 r を以下の 5 次式 (13) に代入して得られる値の差が最小になるようにそれぞれの変化を近似する。図 9 にゴッホ, レンブラントの絵画から得られた変換関数 $f(r)$ を示す。

$$f(r) = a_0 + a_1 r + a_2 r^2 + a_3 r^3 + a_4 r^4 + a_5 r^5 \quad (13)$$

7. 絵画空間への仮想物体の重ね込み

本章では、推定された光源環境と輝度変換関数を用いて、絵画空間に仮想物体を違和感なく重ね込む手法について述べる。具体的には、入力画像の画素単位で以下の処理を行う。

まず、各画素が仮想物体表面に対応しているのか、絵画に描かれた物体表面 (以下、絵画物体表面) を対応しているのかを判断する。ここでは、幾何形状取得

の際に求めたカメラパラメータにより絵画の投影中心から各画素を通る視線を求め、この視線が仮想物体表面上の点に当たる場合には、仮想物体表面に対応しているとし、それ以外の場合には絵画物体表面に対応しているとする。

絵画物体表面に対応している場合には、仮想物体を配置したことにより絵画物体表面に生じた変化を加える。すなわち、絵画物体表面上に仮想物体からの影が生成される場合には、その影に応じて、絵画に描かれている物体表面の明るさを調節する。そして、仮想物体表面に対応している場合には、推定された光源環境を用いて、仮想物体表面上で観測されるべき色を計算する。

7.1 仮想物体からの影の計算

合成画像において、絵画物体表面の観察されるべき色を計算する。具体的には、入力画像上で観察された絵画物体表面上の色に対して、仮想物体により生じた影の影響を考慮することにより、合成画像内で絵画物体平面の観察されるべき色を求める。

はじめに、仮想物体および遮蔽物体による光源の遮蔽を考慮して絵画物体表面の点における照度 E' を推定された光源分布より求める。次に絵画物体表面の明部(物体による光源の遮蔽が生じない画素)の照度を E として、各画素の照度 E' に対応する照度比 $r = \frac{E'}{E}$ を求める。

さらに、求めた照度比 $r = \frac{E'}{E}$ を式(13)の色変換関数 $f(r)$ に代入することにより、照度比が $r = \frac{E'}{E}$ の際に画家により施されると考えられる色相変化 $H(\frac{E'}{E})$ 、彩度変化 $S(\frac{E'}{E})$ 、明度変化 $V(\frac{E'}{E})$ を求める。

次に、物体による光源の遮蔽が生じた際に絵画中で観察されるべき絵画物体表面の点の色相 h' 、彩度 s' 、明度 v' は絵画物体表面の明部(照度 = E の画素)の色相 h 、彩度 s 、明度 v と $H(\frac{E'}{E})$ 、 $S(\frac{E'}{E})$ 、 $V(\frac{E'}{E})$ を利用して

$$h' = h + H\left(\frac{E'}{E}\right) \quad (14)$$

$$s' = s * S\left(\frac{E'}{E}\right) \quad (15)$$

$$v' = v * V\left(\frac{E'}{E}\right) \quad (16)$$

のように求めることができる。求めた h' 、 s' 、 v' を RGB 値に変換し各画素の色とすることにより、仮想物体を絵画物体表面に配置したときに生じると考えられる色合いの変化を絵画物体表面に付加することができる。

7.2 仮想物体表面上の色の計算

仮想物体表面を同じ反射係数により構成される Lambertian 面と仮定し、仮想物体の自己遮蔽および他の物体による遮蔽を考慮して推定された光源環境において絵画中で描かれるべき仮想物体の表面の色を以下のとおり計算する。

まず、推定された光源分布を用いて、仮想物体表面の点において、他の物体および自己遮蔽が起こらない際に観察される照度 E とこれらの遮蔽を考慮した場合の照度 E' を計算し、各点の照度比 $r = \frac{E'}{E}$ を求める。

前章と同様に、照度比 $r = \frac{E'}{E}$ を色変換関数 $f(r)$ に代入することにより各点の照度比に対応する色相変化 $H(\frac{E'}{E})$ 、彩度変化 $S(\frac{E'}{E})$ 、明度変化 $V(\frac{E'}{E})$ を求める。

次に、物体による遮蔽が起こらない場合(照度 = E)の仮想物体表面の色相 h 、彩度 s 、明度 v と求めた $H(\frac{E'}{E})$ 、 $S(\frac{E'}{E})$ 、 $V(\frac{E'}{E})$ を式(14)、式(15)、式(16)それぞれ代入することにより、絵画的な陰影が施された際の仮想物体の表面の色相 h' 、彩度 s' 、明度 v' を求める。求めた h' 、 s' 、 v' を RGB 値に変換し、その色を絵画中の画素の色とすることにより、仮想物体を絵画的な陰影で絵画中に重ね込むことができる。

8. 合成結果

6章で推定した照度比変換の関数を用いて、仮想物体を絵画的な陰影で絵画に重ね込んだ合成結果を図10(c)に示す。合成画像では、仮想物体はまわりの物体落とす影と同じような色分布を持った影を机上(または床)に落としており、このことは提案手法により求められた照度比変換の関数が画家により施された色変換のメカニズムをうまく近似できていることを示している。

また、遮蔽物体と同じ幾何形状を持つ仮想遮蔽物体とシャドウ面と同じ反射特性を持つ仮想平面を仮想遮蔽物体周辺に重ね込んだ例を図10(b)に示す。この例においても、仮想遮蔽物体は机上(または床上)に絵画中の遮蔽物体と同じような影を落としていることから、光源分布が正しく推定され、求められた照度比変換関数が実際の画家の色変換のメカニズムをよく近似していることが分かる。

さらに、提案手法により解析された画家の色変換のメカニズムが他の固有色を持つ物体に対しても有効であることを確かめるために、ゴッホの絵画における机の色合いを変化させて、仮想物体を重ね込んだ例を図11に示す。この例では、机の天板の色相は同時期にゴッホにより描かれた図11の机のもの一致する

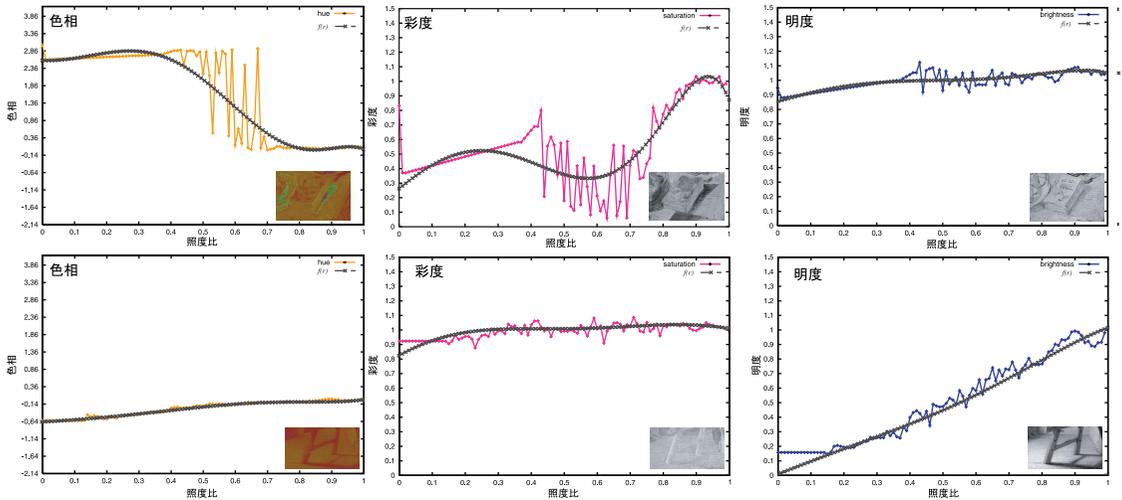


図 9 照度比と色相・彩度・明度の関係：ゴッホ（上段），レンブラント（下段）
 Fig.9 Color transitions performed by Vincent van Gogh (top row) and by Rembrandt (bottom row).



図 10 上段：“Still Life: Drawing Board, Pipe, Onions and Sealing-Wax”. フィンセント・ファン・ゴッホ作，下段：“Artists in Studio”. レンブラント作
 Fig.10 Top row: “Still Life: Drawing Board, Pipe, Onions and Sealing-Wax” by Vincent van Gogh, bottom row: “Artists in Studio” by Rembrandt.

ように変更してあり，6章で得られた色変換関数(図9上段)を用いて，仮想物体を異なる色相を持つ机上に重ね込むことを行った。

この例においては，提案手法により解析に利用したシャドウ面とは異なる色相を持つ物体表面に対しても，固有色の緑から薄青色，赤紫といった補色への変化を示す陰影を生成することができた。また，光源環境が異なるため明るさそのものは異なるものの，図11の同時期に描かれた絵画においても同じような薄青色，赤紫といった色合いを持つ影が観察されることから，



図 11 色相の異なる物体表面への仮想物体の重ね込み
 Fig.11 Superimposing a synthetic object onto the wooden table of different surface color.

推定された色変換のメカニズムがこの時期のゴッホの特徴を示しているように推察される。

提案手法により推定された画家の色変換のメカニズムの評価に関しては、実際にその絵画が描かれたときのシーンの情報が残っていないためその客観的な評価は難しい。絵画の専門家による評価と絵が描かれたシーンの情報(写真など)が残っている絵画を対象とした客観的な評価の双方を行うことを今後の課題として考えている。

9. 結 び

本報告では、単画像からの光源分布推定手法の応用することにより絵画が描かれた際の物体の見えを推定し、画家による色変換のメカニズムを絵画内に観察される陰影から自動的に推定する手法を提案した。提案手法では、画家の色合いの変化が物体による光源の遮蔽と大きく関係していることに注目し、絵画中で物体が落とす影領域を解析することにより、光源の遮蔽と画家が用いる色合いの関係のモデル化を行った。そして、提案手法により推定された画家の陰影付けのメカニズムを利用することにより、絵画中に新たな仮想物体を違和感のない絵画的な陰影で重ね込むことを行った。ここで、本論文で導いた画家の色変換のメカニズムは補色対比の効果が施された絵画を対象として導かれたものであり、本研究では数枚の絵画を用いてそのモデルの検証を行っている。そのため、今後は様々な特徴を持つ絵画に対しても提案するモデルを適用し、提案するモデルが絵画全般に対して妥当であるか否かの検討をさらに行う必要があると考える。また、本研究では取り扱わなかった画家特有の筆使いに関しては、絵画から画家特有のタッチを学習し、学習されたフィルタを用いて画像に絵画風のテクスチャを付加する技術が発表されており⁶⁾、今後は、それらの技術と組み合わせ、筆使いも色合いも絵画風の画像の生成手法に取り組みたいと考えている。

謝辞 本研究は、文部科学省研究費(特別研究員奨励費、特定領域研究(c)課題番号13224051)および科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業(CREST)の研究助成により行われた。有益なご意見をいただいた査読者の方々に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 小林, 鈴木: 絵画の色彩的特徴に関する数量的分析, シンポジウム「自分科学における数量的分析」報告集, pp.65-79 (Mar. 1996).
- 2) 視覚デザイン研究所(編): 巨匠に教わる絵画の

技法—画家の目と技でつづる美術史(1998).

- 3) Debevec, P., Taylor, C. and Malik, J.: Modeling and rendering Architecture from Photographs: A hybrid geometry- and image-based approach, *Proc. SIGGRAPH 96*, pp.11-20 (Aug. 1996).
- 4) Curtis, C., Anderson, S., Seims, J., Fleischer, K. and Salesin, D.: Computer-Generated Water color, *Proc. SIGGRAPH 97*, pp.421-430 (Aug. 1997).
- 5) Horn, B.K.P.: *Robot Vision*, The MIT Press, Cambridge, MA (1986).
- 6) Hertzmann, A., Jacobs, C., Oliver, N., Curless, B. and Salesin, D.: Image Analogies, *Proc. SIGGRAPH 01*, pp.327-340 (Aug. 2001).
- 7) Klein, A., Li, W., Kazhdan, M. and Correa, W.: Non-Photorealistic Virtual Environments, *Proc. SIGGRAPH 00*, pp.527-534 (Aug. 2000).
- 8) Litwinowicz, P.: Processing Images and Video for An Impressionist Effect, *Proc. SIGGRAPH 97*, pp.407-414 (Aug. 1997).
- 9) Salisbury, M., Wong, M., Hughes, J. and Salesin, D.: Orientable Textures for Image-Based Pen-and-Ink Illustration, *Proc. SIGGRAPH 97*, pp.401-406 (Aug. 1997).
- 10) Nelder, J.A. and Mead, R.: A Simplex Method for Function Minimization, *Computer Journal*, Vol.7, pp.308-313 (1965).
- 11) Sato, I., Sato, Y. and Ikeuchi, K.: Illumination Distribution from Shadows, *Proc. IEEE CVPR 99*, pp.306-312 (June 1999).
- 12) Sato, I., Sato, Y. and Ikeuchi, K.: Stability Issues in Recovering Illumination Distribution from Brightness in Shadows, *Proc. IEEE CVPR 01*, pp.II-400-407 (Dec. 2001).
- 13) Canoma, MetaCreations International Ltd.

(平成 14 年 9 月 6 日受付)

(平成 15 年 3 月 28 日採録)

(担当編集委員 岡谷 貴之)



佐藤 いまり

1994年慶應義塾大学総合政策学部卒業。2002年東京大学大学院学際情報学府修士課程修了。同大学院博士課程に在学中。日本学術振興会特別研究員。1992年8月～1993年8月

CMU, Center for Machine Translation, Research Assistant, 1994年～1996年 CMU, The Robotics Institute, Visiting Scholar. 1997年より東京大学生産技術研究所にてコンピュータビジョン, コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。画像の理解・認識シンポジウム(MIRU2000)最優秀論文賞, 平成11年度日本バーチャルリアリティ学会論文誌論文賞を受賞。



佐藤 洋一(正会員)

1990年東京大学工学部機械工学科卒業。東京大学大学院情報工学専攻を経て, 1991年～1996年までCMUロボティクス学科博士課程に在籍。1997年1月 Ph.D. in Robotics 修了。

1997年より東京大学生産技術研究所研究機関研究員を経て同研究所専任講師。コンピュータビジョン, ヒューマン・コンピュータ・インタラクション, およびコンピュータグラフィックスに関する研究に従事。平成11年山下記念研究賞, Int. Conf. Shape Modeling and Applications '97最優秀論文賞, MIRU2000最優秀論文賞, 平成11年度日本バーチャルリアリティ学会論文誌論文賞を受賞。電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会, ACM, IEEE 各会員。



池内 克史(正会員)

1973年京都大学工学部機械工学科卒業。1978年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。工学博士。MIT人工知能研究所, 電総研, CMU 計算機学部を経て,

1996年より東京大学生産技術研究所教授。人間の視覚機能, 明るさ解析, 物体認識, 人間による組み立て作業の自動認識等の研究に従事。論文賞(ICCV-90, CVPR-91, AIJ-92, ロボット学会誌-97, IEEE R&A誌-98, 画像の理解・認識シンポジウム(MIRU2000), 平成11年度日本バーチャルリアリティ学会論文誌)受賞。電子情報通信学会, 人工知能学会, 日本ロボット学会, 日本バーチャルリアリティ学会各会員。OSA 会員, IEEE 会員(Fellow)。