

絵画における陰影特徴の解析とその画像合成への応用

佐藤 いまり[†] 佐藤 洋一[§] 池内 克史^{†§}

[†]東京大学大学院学際情報学府 [§]東京大学生産技術研究所

E-mail : {imarik, ysato, ki}@iis.u-tokyo.ac.jp

あらまし 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行程は、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言われている。この色変換の行程に対し、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の応用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自動的に抽出する手法を提案する。さらには、抽出された陰影付けのメカニズムを仮想物体を絵画に違和感ない陰影で重ね込む際に用いる、あるいはコンピュータグラフィックス画像生成のための絵画風陰影付けに利用する方法を提案する。

Superimposing Synthetic Objects into Oil Paintings with Artistic Shadings

Imari Sato[†], Yoichi Sato[§], and Katsushi Ikeuchi^{†§}

[†] Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, University of Tokyo

[§] Institute of Industrial Science, University of Tokyo

Abstract 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 Figure 7, non-photorealistic blue to white color transition is observed inside shadows cast by the book placed on the wooden table. In this study, we attempt to determine color transitions performed by artists from given paintings and to 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行程は、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言われている。例えば、図 7 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、このような影の生

成が可能なカラー光源下でシーンを描いたとは考えられず、観察される陰影から非現実的な絵画的陰影へ変換しゴッホは描いたと考えるのが自然である。

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。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、観察されるどの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が [1, 3, 4], そのほとんどが水彩画風, あるいは油絵風といった筆使いを CG 画像上で実現するためのものであり, 絵画的な色合い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。

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パ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。このような背景のもと, 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自動的に抽出する手法を提案する。

提案手法を用いて抽出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, あるいはコンピュータグラフィックス画像生成のための絵画風陰影付けに利用することが可能となる。提案手法は以下の仮定に基づき絵画より描かれたシーンを復元する。

- 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。¹
- 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タとして得ている。
- 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知識が全く無い状態では, 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極めて難しい。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取る。

¹ゴッホの絵画では, 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 枚の写真から幾何モデルを得ることを可能とするモデリングソフト [6] を利用することにより得ている。

本報告の構成は以下のとおりである。まず, 2 章と 3 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との関係について考える。次に, 4 章で単画像からの光源分布推定にもとづいた絵画の陰影付け手法の解析方法を述べ, 5 章で抽出された陰影付けメカニズムを利用しての合成画像の生成方法について説明し, 6 章で実験結果を示す。最後に 7 章で結ぶ。

2 シーンにおいて観察される物体表面の明るさ

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 1 (a) に示すような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。

図 1 (a) 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 [2]。

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

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。

$$E_1 = \sum_{i=1}^n L(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \quad (2)$$

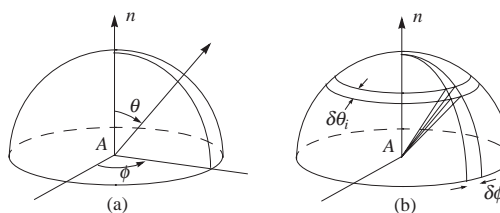


図 1: 光源環境の近似

次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が減った場合 (図 2 (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は以下のように求まる .

$$E_2 = \sum_{i=1}^n L(\theta_i, \phi_i) S(\theta_i, \phi_i) \cos\theta_i \quad (3)$$

$S(\theta_i, \phi_i)$ 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 .

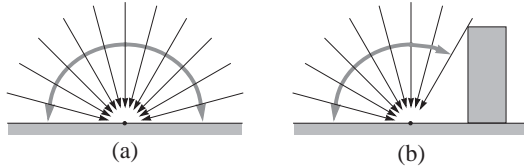


図 2: 物体表面の照度: (a) 遮蔽無し (b) 遮蔽有り

2.1 物体表面の照度と明るさの関係

ここで, 物体による遮蔽が生じない場合 (図 2 (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 2 (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 .

$$I' = I \frac{E_2}{E_1} \quad (4)$$

3 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, 画家特有のメカニズムに基づいて観察された色を変換しキャンバス上にのせていく. ここで, 同一絵画内に表現された陰影には類似したパターンが多く観察されることから, そこにはある一定の陰影付けのルールのようなものが存在することが考察される. 例えば, 図 7 のゴッホの絵画においても, 机上に存在する物体が落とす影には同じような青色の傾向が強く観察され, キャンバスにのせる色の選定には物体に光源の遮蔽, 照度の変化が大きく関係していることが推測される .

そのため, 提案手法では, 画家は絵画が描かれたシーンにおいて観察される実際の照度比 $\frac{E_2}{E_1}$ を陰影付け用の新しい照度比 $\frac{E_2'}{E_1}$ (以下, 絵画照度比) にある

一定のルールに基づいて変換し陰影付けを行っている」と仮定し, 画家の陰影付けメカニズムを以下のとおり定義する .

(1) 照度比から絵画照度比への変換

$$\frac{E_2}{E_1} \rightarrow \frac{E_2'}{E_1} \quad (5)$$

(2) 絵画照度比による色合いの決定

$$I' = I \frac{E_2'}{E_1} \quad (6)$$

例えば, 実際にシーンにおいて観察される点 A における照度比が $\frac{E_2}{E_1} = 0.5$ の場合, $\frac{E_2}{E_1} = 0.5 \rightarrow \frac{E_2'}{E_1} = 0.7$ という照度比の変換が行われた場合, 画家がキャンバス上にのせる色 I' は $I' = I \times 0.7$ となる .

また, この照度比から絵画照度比への変換は Red, Green, Blue の各色チャンネル間で独立に行われるものとする. 例えば, ゴッホの絵画において机上の本がおとす影は青色から白色へと段階的に変化しているが, このような色合いの変化は照度比の変換を各色独立で行うことにより実現することができる. そのため, 以下の章で行う陰影付けの解析も各色チャンネル独立で行うこととする .

4 照度比変換メカニズムの解析

本章では, 単画像からの光源分布推定手法を絵画に適用することにより絵画が描かれた際のシーンを再現し, そのシーンにおいて観察されるべき物体の見えを生成することにより照度比変換のメカニズムを解析していく. 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落とされた影を利用することにより光源分布を推定する.
2. 次に, 推定された光源分布に基づき, 絵画が描かれた際に画家により観察されたと思われる遮蔽物体の影を再現する .
3. 生成された影と画家により描かれた影を比較することにより, 個々の照度比に対しどのような絵画照度比への変換が行われているのかを求める .

以下, これらの手順の具体的な処理について説明する .

4.1 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 R, G, B の画素値の平均により生成されたグレースケール画像より求めていく。

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 [5] で提案された物体の陰影にもとづく光源分布推定手法を用いて推定する。[5] では、まず、入力画像の明るさと各光源輝度 $L(\theta_i, \phi_i)$ の遮蔽物体による遮蔽を考慮することにより得られた画像上に観察される明るさと光源分布との関係式に基づき、光源輝度 $L(\theta_i, \phi_i)$ を未知数とする方程式を入力画像の各画素について導く。次に入力画像から導かれた連立方程式を解くことにより $L(\theta_i, \phi_i)$ を求め、 $L(\theta_i, \phi_i)$ の集まりとしてシーンの光源分布を推定する。

絵画の場合、推定に用いる遮蔽物体の影内の明るさ自体が画家による陰影付けの影響を含んでおり、入力画像中の遮蔽物体の影内の明るさが物理的に正しいものになっているとは限らないという問題が生じる。そのため、推定される光源輝度分布にも大きな影響が及ぶことが考えられたが、図 7 のゴッホ、レンブラントの 2 つの絵画例とともに、絵画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 (1 方向に光源輝度が集中する) を得ることができた。

これは、物体表面上の明るさが物理的に正しいとは限らない絵画に対しても、影に基づく光源推定手法により、絵画内の影の分布を最も良く再現する光源輝度分布が得られたことを示している。

4.2 照度比と絵画照度比の対応関係の解析

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を比較することにより、どのような色変換が画家により行われているかを解析する。

影内の各画素における絵画照度比に関しては、式 (6) より、

$$\frac{I'}{I} = \frac{E_2'}{E_1} \quad (7)$$

という関係が成り立つため、照度比 $\frac{E_2}{E_1} = 1.0$ の時に絵画中で観察される明るさを I_1 、各画素で観察さ

れる明るさを I_2 とすると、 $\frac{I_2}{I_1}$ として求めることができる。

この関係に基づき、影内の各画素において、推定された光源分布に基づいて計算した照度比 (例: $\frac{E_2}{E_1} = 0.5$) と、絵画において実際に描かれている絵画照度比 (例: $\frac{E_2'}{E_1} = \frac{I_2}{I_1} = 0.7$) の対応関係を各色チャンネルについて求めていく。

この解析により得たゴッホに行われた色変換を図 3 のプロットに示す。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 $\frac{E_2}{E_1}$ を示し、縦軸は各照度比において絵画中で観察される絵画照度比 $\frac{E_2'}{E_1} = \frac{I_2}{I_1}$ を表している。

ゴッホの色変換のプロットでは、照度比が 0.35 前後で Blue チャンネルが他の Red, Green の色チャンネルに比べて最も強くなり、照度比が 0.8 を越えたところから 3 チャンネルとも近い値で同じように推移しているという特徴が観察された。このことは、ゴッホが照度比が低いところでより青色を使う傾向にあることを示している。

また、レンブラントの画像より得たプロットを図 4 に示す。この絵画は写実的な絵画のため、ゴッホとは対照的に線形変化に近いプロットが得られている。レンブラントは光の当たっている部分に焦点をあてた描き方をするとされているが、得られたプロットにおいても照度比 0.5 以上の部分の変化に注目しそのダイナミックレンジを広げるような傾向が観察され、レンブラントが光と闇のコントラストが強く出るような描き方をしている様子が顕著に表れている。

次に、上記で得た照度比と絵画照度比の関係を示すプロットを入力として、照度比から絵画照度比への変換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、照度比と絵画照度比の対応関係をルックアップテーブル化することなく、少ないパラメータを用いて画家による色変換を画像生成に利用できるようになる。

具体的には、5 次関数を利用して絵画照度比への変換を以下のとおり近似する。

$$f(r) = a_0 + a_1 r + a_2 r^2 + a_3 r^3 + a_4 r^4 + a_5 r^5 \quad (8)$$

ここで r は、照度比を表している。

上記で得られた輝度比と絵画照度比との関係を示すプロットをもとに、照度比 r の時に絵画上で観察される絵画照度比 $\frac{I_2}{I_1}$ と、照度比 r を式 (8) に代入して得られる値の差が最小になるように数値計算ソフ

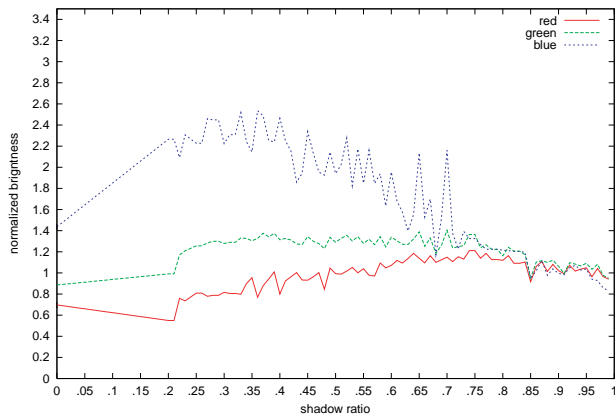


図 3: ゴッホ : 照度比と絵画照度比の関係

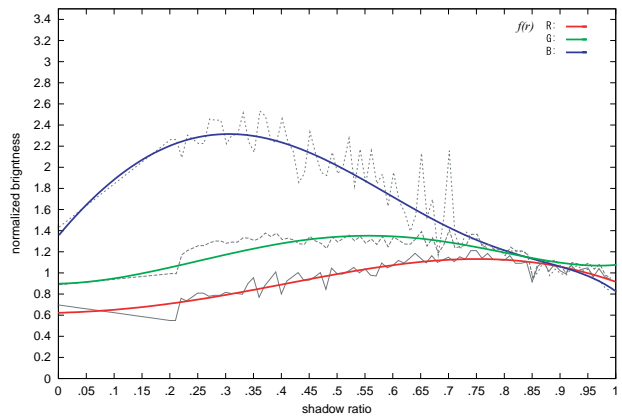


図 5: ゴッホ: 色変換関数による近似

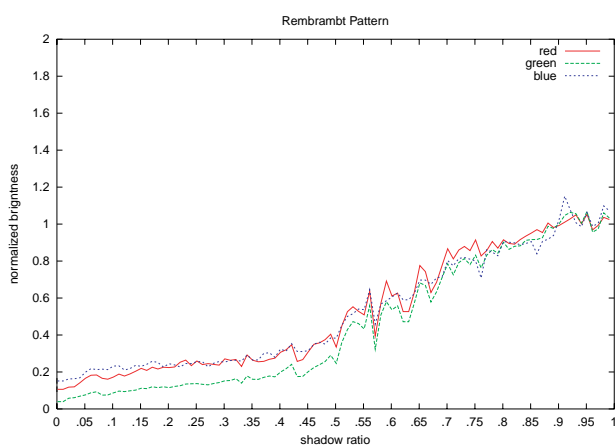


図 4: レンブラント : 照度比と絵画照度比の関係

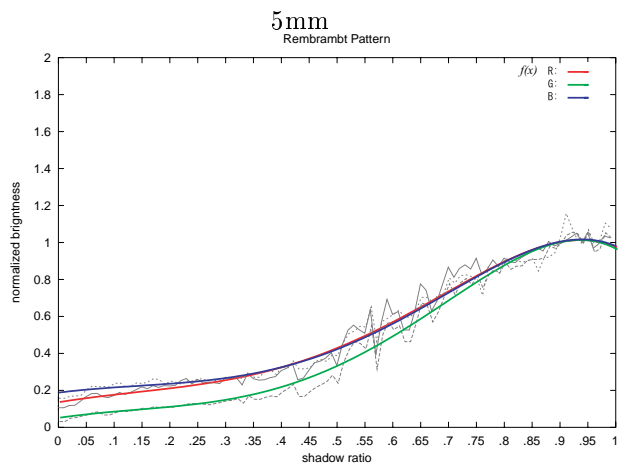


図 6: レンブラント: 色変換関数による近似

ト MATLAB を利用して係数 $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ を求める。

図 5 にゴッホの絵画から得られた変換関数, 図 6 にレンブラントの絵画から得られた変換関数を示す。

5 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を見ているのか, 絵画に描かれた物体表面 (以下, 絵画物体表面) を見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, 仮想物体表面を見ているとし, それ以外の場合には絵画物体表面を見ているとする。

次に仮想物体表面を見ている場合には, 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し (5.1 章), 絵画物体表面を見ている場合には, 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 (5.2 章)。

5.1 仮想物体表面上の色の計算

物体自身および他物体による光源遮蔽を考慮にいれ, 推定された光源環境下において絵画中で描かれるべき仮想物体の表面 (Lambertian 面とする) の色

を以下のとおり計算する.

まず物体表面の点における照度 E_1 (仮想物体による光源の遮蔽を考慮しない場合) と E_2 (光源の遮蔽を考慮する場合) を推定された光源分布を式 (2), 式 (3) にそれぞれ代入することにより求め, E_1, E_2 により求められる照度比 $r = \frac{E_2}{E_1}$ を式 (8) の色変換関数 $f(r)$ に代入することにより, 絵画特有の色変換が行われた後の絵画照度比 $\frac{E_2'}{E_1'}$ を求める.

$$\frac{E_2'}{E_1'} = f\left(\frac{E_2}{E_1}\right) \quad (9)$$

次に物体による遮蔽が生じない際の物体表面の輝度を推定された光源分布より求める.

$$R_1(\theta_e, \phi_e) = \sum_{i=1}^n f(\theta_i, \phi_i; \theta_e, \phi_e) L(\theta_i, \phi_i) \cos\theta_i \quad (10)$$

ここで, $f(\theta_i, \phi_i; \theta_e, \phi_e)$ は, 仮想物体表面の双方向性反射率分布関数², (θ_e, ϕ_e) は視線方向を表す.

最後に $\frac{E_2'}{E_1'}$ と R_1 により, 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仮想物体表面の色 R_2 を以下のとおり求める.

$$R_2 = R_1 \frac{E_2'}{E_1'} \quad (11)$$

5.2 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, 合成画像内で仮想物体物体の観察されるべき色を求める.

仮想物体表面と同様に, 絵画物体表面の点における照度 E_1 (仮想物体による光源の遮蔽を考慮しない場合) と E_2 (光源の遮蔽を考慮する場合) を推定された光源分布より求め, 照度比 $r = \frac{E_2}{E_1}$ を式 (8) の色変換関数 $f(r)$ に代入することにより, 絵画特有の色変換が行われた後の絵画照度比 $\frac{E_2'}{E_1'}$ を求める.

入力画像内での絵画物体表面上の点において観察される色を I とすると, この色は絵画物体表面の照度が E_1 の時に観察される色である. 絵画空間に仮想物体を融合させた合成画像において, その絵画物体表面上の点で観察されるべき色を I' とすると, I' は

²方向 (θ_i, ϕ_i) からの入射光強度と方向 (θ_e, ϕ_e) への反射光輝度の比率を示す関数.

絵画照度比 $\frac{E_2'}{E_1'}$ を利用して, 以下のように求めることができる.

$$I' = I \frac{E_2'}{E_1'} \quad (12)$$

6 合成結果

4章で求めた色変換の関数を用いて, 仮想物体を違和感のない絵画的な陰影で絵画に重ね込んだ合成結果を図 7 (c) に示す (上段: ゴッホ, 下段: レンブラント). 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色変換の関数が画家による行われている色変換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もつ仮想平面を仮想遮蔽物体周辺に重ね込んだ例を図 7 (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おり, このことは推定された光源分布が正しく, 求められた色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できていることを示している.

さらに, 提案手法で求められた絵画照度比への変換関数を CG 画像生成の際の陰影付けに用いる応用実験を行った. 図 8 (a) は従来のグラフィックスの手法でレンダリングした CG 画像 (海上の 3 頭のイルカを表す) であるが, 同様のシーンをゴッホの絵画照度比変換関数を用いてレンダリングした結果を (b) に示す. また, さらに市販の画像処理ソフトを用いて絵画風の筆使いの画像処理を施したものを (c) に示す.

提案手法により求められた絵画照度比変換関数を用いることにより, 自動的に絵画的な色合いを持つコンピュータグラフィックス画像をユーザが具体的な色合いを指定することなく生成することが可能となった. また, 絵画的な CG を生成するためには, CG に絵画的な筆使いを加えることのみならず, 画家による色変換を考慮した絵画的な陰影付けを行うことがその要素として重要であることをこの実験結果は示している.



図 7: (a) 入力画像, (b) 遮蔽物体およびシャドウ面の重ね込み, (c) 新たな仮想物体の重ね込み, 上段: “Still Life: Drawing Board, Pipe, Onions and Sealing-Wax” by Vincent van Gogh, 下段: “Artist in Studio”, by Rembrandt.



図 8: CG 画像生成への色変換関数の応用

7 結び

本報告では, 単画像からの光源分布推定手法の応用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自動的に抽出する手法を提案した. 提案手法により抽出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絵画的な陰影で重ね込む, あるいは CG 画像において絵画風の色合いを自動的に実現することが可能となった.

参考文献

- [1] C. Curtis, S. Anderson, J. Seims, K. Fleischer, and D. Salesin, “Computer-Generated Water color,” *Proc. SIGGRAPH 97*, pp. 421-430, Aug 1997.
- [2] B. K. P. Horn, *Robot Vision*, The MIT Press, Cambridge, MA, 1986.
- [3] P. Litwinowicz, “Processing Images and Video for An Impressionist Effect,” *Proc. SIGGRAPH 97*, pp. 407-414, Aug 1997.
- [4] M. Salisbury, M. Wong, J. Hughes, D. Salesin, “Orientable Textures for Image-Based Pen-and-Ink Illustration,” *Proc. SIGGRAPH 97*, pp. 401-406, Aug 1997.
- [5] 佐藤, 佐藤, 池内, “物体の陰影に基づく光源環境の推定,” 情報処理学会論文誌 CVIM, Vol. 41, No. SIG10(CVIM1), pp.31-40, December 2000.
- [6] Canoma, MetaCreations International Ltd.