

# リアリティの 再現

# 2



佐藤 いまり

imarik@nii.ac.jp  
国立情報学研究所

私たちは、視覚というフィルタを通して世界を観察し理解している。たとえば、物理的には同じ輝度を持つ物体表面であっても物体表面の模様や周辺部の明るさにより、見えの印象が大きく異なる。本稿では、コンピュータグラフィックスの中心的な課題である視覚的に現実感の高い画像合成を目指す写実的なリアリティの再現と人間の感性を刺激することでリアリティを感じさせるような感性的なリアリティの再現を目指し、筆者らがこれまで進めてきた研究を紹介する。

## 写実リアルと感性リアルの再現

コンピュータグラフィックス (CG) の研究分野では、現実感の高い画像生成をその中心的な課題として、さまざまな描画アルゴリズムやハードウェアが開発されてきた。CGにより実現される写実的な表現は、映画やテレビにおける仮想物体の実写への重ね込みなど、写実性が要求されるアプリケーションにおいて大きな効果を示している。また、ネットワークの普及、デジタルアーカイブ技術の発達に伴い、彫刻などの芸術品や文化財に対して、その物体が持つ複雑な形状や艶などの微妙な質感をモデル化し、その見えをCGを用いてコンピュータ上で現実感高く生成するための技術にも注目が集まっている。

一方、絵画やアニメーション作品といった映像表現では、描かれるシーンを作者の独特な世界観を通して表現することにより、見ている人の想像力を刺激して現実をより強く感じさせるような表現（以下、感性リアルと呼ぶ）が積極的に用いられる。すなわち、大げさな形状変化や、作者の主観に基づいて表現された質感など、およそ写実的でない表現に強いリアリティを感じてしまうの

はなぜなのだろうか。

絵画やアニメーション作品などにおいて、作者により表現された感性リアルが見る人へと伝わり、また伝わり方も千差万別ではないことを考慮すると、写実リアルと感性リアルはまったく別物というよりも、両者に共通するようなリアリティを伝えるための要素が存在するようにも思われる。本稿では、写実的なリアリティおよび感性的なリアリティの獲得および合成を目指し、筆者らがこれまで開発してきた技術を紹介する。

## 写実リアルの追求

CGの研究分野では、視覚的に現実感の高い画像生成の実現に向け、これまでにさまざまな描画アルゴリズムやハードウェアなどが開発されてきた。さらには、物体の持つ微妙な質感が表現できる反射モデル式も提案され、複雑な反射特性や形状を持つ物体であっても、反射モデル式に基づき高速に描画するといったことが可能となってきた。

レンダリング技術の急速な発展の一方で、写実的なリアリティを求めて実物体の持つ複雑な質感などを追求すればするほど、その物体の形状モデルや反射パラメータを手作業などで設定するのが難しいということが問題となってきた。画像生成に用いる物体のモデルをどのようにして設定すればよいかという問題に対して、実際の物体の形状や反射特性をカメラやレンジファインダといった3次元センサを用いて観察することにより、その物体に関するモデルを獲得するというアプローチが注目されるようになってきた。本章では、光源環境の変動に伴う物体の見えの変化を実物体の観察からいかにモデル

化するかということを考えていく。

午前中と午後、晴れの日と曇りの日など、対象物体を取り巻く光源環境の変動に伴いその物体の見えは大きく変化することが知られている。屋内外のさまざまな光源環境下で対象物体の見えを生成する技術は、物体認識および画像合成の分野で活発に研究が進められてきた。

従来研究は、光源環境の変化に伴う物体の見えの変動(視点位置を固定した場合)は、比較的低次元の線形部分空間によって表現できることを示している。そのような見えの変動を表す部分空間を張ることができる基底画像は、一般に、対象物体をさまざまな光源下で撮影した画像群に主成分解析をかけることにより求められる(図-1に概念図を示す)。

しかしながら、図-2に示すようにどのような光源をどの方向に配置して、その光源下で撮影された何枚の入力画像を準備すれば基底画像が正しく求まるのかという点がこれまで十分に検討されてこなかったため、経験的に十分に多いと考えられる画像を準備して基底画像を求めることが多い。これにより少ない画像から効率よく基底画像を求めることができないという点が問題とされていた。

また、点光源下で撮影された対象物体の画像をそのまま基底画像として、その線形結合<sup>☆1</sup>および補間により任意光源下の物体の見えを生成する手法も提案されている。しかしながら、一般的な光源環境を対象とした場合、すべての方向からの入射光を考慮する必要があり、どのように点光源を配置して基底画像を準備すれば、基底画像の補間および線形結合により物体の見えを現実感高く生成できるのかについては、やはり明らかにされていない。

最近になり、球面調和関数を用いた周波数領域における反射解析により、任意光源下における画像は周波数領域で定義される部分空間を用いて精度よく表現できることが報告されている<sup>4)</sup>。そのような部分空間を張るような基底画像は、球面上に広がり、球面調和関数に基づき輝度が定義される周波数光源(図-3の上段に周波数光源の例を示す: 緑は正の値, 赤は負の値を示す)の下での物体の画像(図-3下段)に相当し、この基底画像の利用は、任意光源下での顔認識や、複雑光源下における物体画像の効率的な生成に有効であることが示されてきた。

しかしながら、点光源と異なり、球面調和光源は球面に広がり、正と負の両方の値をとる複雑な分布を持つ連

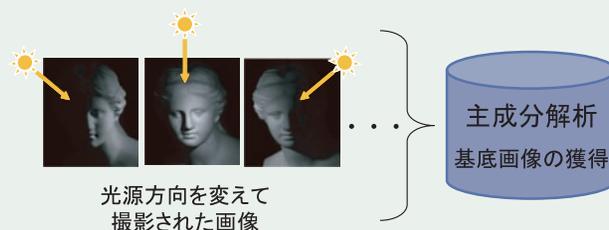


図-1 主成分解析による基底画像の獲得

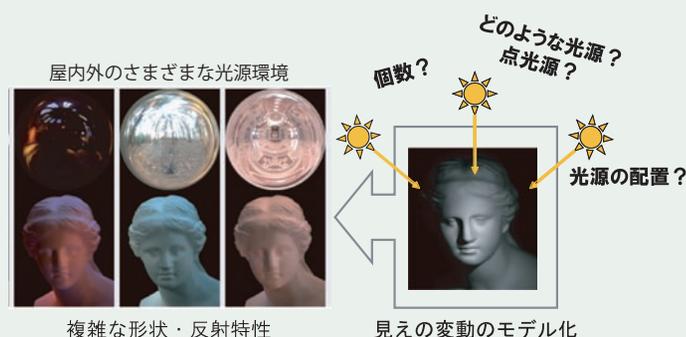


図-2 複雑な形状や反射特性を持つ実物体の見えの変動を十分に観察するための条件とは?

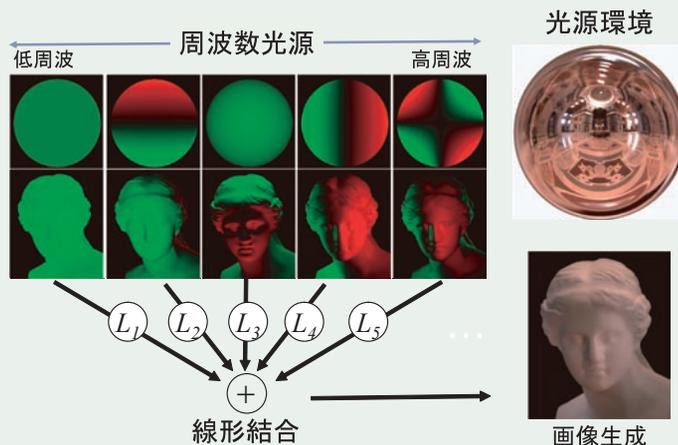


図-3 周波数領域で定義される周波数光源と基底画像を示す。基底画像の線形結合に基づき任意光源環境下での画像生成が行われ、その際の結合係数 ( $L_1, L_2, \dots, L_5$ ) は光源分布の周波数係数となる。

続光源であるため、そのような光源を実際に構築し、実物体の調和基底画像を準備することは容易ではない。

以上をまとめると、主成分解析により基底画像を求める方法ではどれだけの入力画像があれば十分であるかが明らかでなく、少数の入力画像から効率よく基底画像を求めることが難しかった。同様に、点光源下で定義される基底画像では、どのような空間隔で点光源を配置し基底画像を準備すれば、基底画像の補間およびその線形和により物体の見えを正確に生成できるのかについての議論が十分になされてこなかった。また、調和基底画像

☆1 画像の明るさを何倍かして足し合わせること。

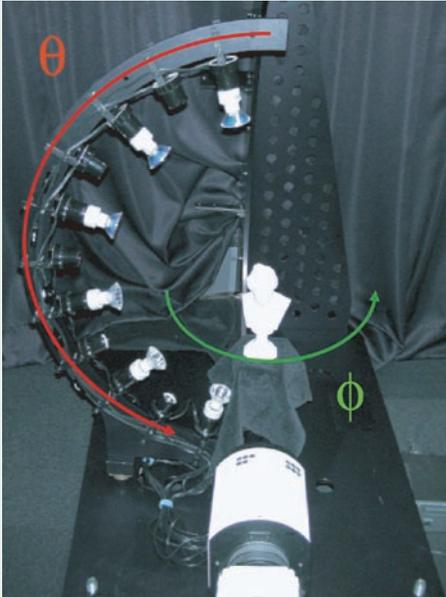


図-4 撮像装置: 回転テーブルに取り付けられたアーム上に等間隔で点光源を配置し、これを等間隔で回転させ、各点光源下で画像を撮像する。

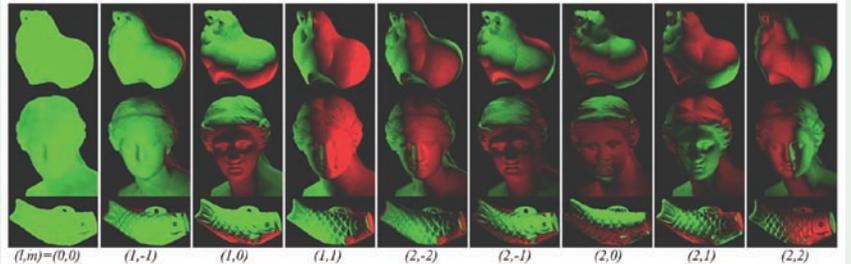


図-5 得られた調和基底画像: 緑は正の値, 赤は負の値を示す。

を直接求める方法では、実際の球面調和光源下で物体の画像を獲得することが困難であったため、形状と反射特性をあらかじめ与えてCGにより合成しなければならなかった。

このような背景のもと、我々は複雑な分布を持つ球面調和光源ではなく、一般的な点光源を用いて撮影された画像に基づき調和基底画像を解析的に求める手法を提案している<sup>5)</sup>。提案手法では、物体の反射特性の周波数特性と球面調和関数のサンプリング定理に基づき、どのようなサンプリング間隔で光源を配置しながら画像を撮影すれば、その物体の見えの変動を表現するのに十分であるかという点を明らかにしている。以下に、点光源下で撮像された実画像から調和基底画像を求めて画像合成に利用した例を紹介する。

この実験では、a) 羊の置物(陶器)、b) ビーナス像(石膏)、c) 鯉のぼりの置物(陶器)を対象物体として用いている。図-4に提案手法で用いる撮像装置<sup>☆2</sup>を示す。サンプリング定理に基づく手法では、必要とされる入力画像数が物体表面の反射特性がどこまでの高周波成分を含んでいるのかを示す周波数帯域に応じて増減する。

すなわち、この装置を用いて $N$ 次の周波数を満たすサンプリング間隔で画像を取得するためには、回転テーブルに取り付けられたアーム上に等間隔( $\Delta\theta = 2\pi/2N$ )で点光源を配置し、これを等間隔( $\Delta\varphi = 2\pi/2M$ )で回転させて、各光源下で画像を取得する必要がある。

ここで、a) ,b) の物体に関しては、艶に相当するような鏡面反射特性がほとんど観察されず、完全拡散面に近い反射特性を持つため、拡散面の最大周波数のサンプリング間隔を満たすように撮像された36枚の入力画像を用いて、9枚の調和基底画像を求めた<sup>☆3</sup>。一方、c) の物体に関しては、比較的鏡面反射が観察されるため、144枚の入力画像を用いて、拡散面より高次である36枚の調和基底画像を求めた。

このようにして得られた調和基底画像の例を図-5に示す。ここで、36枚および144枚といった比較的粗なサンプリングにもかかわらず、求められた球面調和基底画像では、球面調和光源下での見えに相当する複雑な陰影がうまく表現されていることが分かる。

提案手法により求められた基底画像の線形結合(図-3を参照のこと)により対象物体を屋内外の複雑な光源環境下において合成した結果を図-6に示す。ここでは、Debevecらにより提供されているLight Probeによる光源環境の計測結果<sup>3)</sup>を利用した。屋内外の複雑な光源環境の変化に応じて、現実感の高い物体の見えが生成されている様子がよく分かる。

### ❖ 不十分なサンプリングに基づくエリアシングの回避

先に説明したように、サンプリング定理に基づく手法

☆2 Surface Reflectance Sampler, TechnoDream21 corporation.

☆3 人間の顔も拡散面に近い反射特性を持つと考えれば、36枚の入力画像を準備することで、その人の任意光源環境下での画像を合成することができる。

では、必要とされる入力画像数が物体表面の反射特性の周波数帯域(何次元までの高周波数成分を持つかを示す)に応じて増減する。これに対し、撮像装置の制約などから十分な枚数の入力画像を準備できない場合やその周波数帯域を設定することが難しい場合も十分に予想される。

これまであまり議論されてこなかったが、実物体を対象とした場合、反射特性のモデル化に利用できる入力画像枚数には限りがあるため、物体の見えの変動が十分に観察できなかつた場合に生じる影響(エイリアシング)を考慮することは重要である。

我々は、拡散球を点光源で照らすことにより構築される拡散光源下で物体表面の見えを観察することにより、物体の見えのモデル化において、不十分なサンプリングに起因するエイリアシングを回避することができることを示している<sup>6)</sup>。

図-7に拡散光源を用いた撮像装置を示す：対象物体を包み込むかたちで拡散球(乳白色で中が空洞な拡散球を点光源で照らすことにより、点光源からの明るさを拡散して物体表面を照らすことができる)が配置されている。拡散光源の利用により、限られた枚数の入力画像からも、物体表面の持つ周波数帯域に左右されず、入力画像のサンプリング間隔から決定される周波数帯域まで、エイリアシングの影響なく基底画像を獲得することが可能となった。

以下、視点位置や光源環境の変化に応じて物体表面の見えが大きく変化する複雑な構造色を持つ貝殻(あわび)を対象物体として用いた実験結果を紹介する。前章の実験と同様に、回転テーブルに取り付けられたアーム上の点光源を拡散球の外側を回転させ、各光源下で物体の画像を準備することにより基底画像を求めた。

対象物体を一般的な室内光源環境下で撮影した画像と、提案手法により求められた調和基底画像の線形結合として生成された画像とを比較した結果を図-7に示す。ここでは、魚眼レンズ<sup>☆4</sup>付きカメラを用いて光源分布を計測し、その周波数係数を求め、基底画像の線形結合に基づき画像を生成している。鏡面反射や構造色の分布など、全体として実際の見えと非常によく一致している様子が分かる。また、基底画像の線形結合により対象物体を屋内外の複雑な光源環境下において合成した結果を図-8に示す。光源環境の変化に応じて大きく変動するような現実感の高い物体の見えを生成することができている。

☆4 180度の画角を持つ広角レンズ。



図-6 複雑光源環境下において生成された画像：上段に光源環境を示す。



図-7 拡散光源を用いた撮像装置：拡散球の上部にカメラが配置されており、拡散球上に空けられたカメラ用の穴を通して、物体の見えを観察している。



図-8 光源環境の変化に基づく見えの変動を合成。

## 感性リアルの再現

前章まで、写実リアルを再現するための手法を紹介した。次に、感性的なリアリティ再現へ向けて、絵画における陰影付けのメカニズムを解析・画像生成へ応用した我々の試みを紹介する。



図-9 “Still Life: Drawing Board, Pipe, Onions and Sealing-Wax” by Vincent van Gogh

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バス上に表現される。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。たとえば、図-9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。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さまざまな成果があげられているが、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利用し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、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。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画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。

このような背景のもと、筆者らは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している<sup>2)</sup>。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。絵画から

シーンの3次元形状を獲得する手法と画家による陰影付けのメカニズムを与えられた絵画から学習する方法について、以下で概説する。

#### ❖ 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、筆者らが用いた幾何形状のモデリングソフト「Canoma」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「Facade」と呼ばれるモデリングシステムのアルゴリズム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。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し、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当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かたちでモデル形状を得ることを可能としている。「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-10に示す。

#### ❖ 絵画における物体表面の明るさ

絵画に描かれているシーンにおいて、物体表面の明るさを観察した画家は、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バス上にのせていく。しかしながら、画家により描かれる世界はシーンの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言われている<sup>1)</sup>。

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）に近い色が用いられ陰影部分には固有色から離れた色が利用されることが多いことが知られている<sup>1)</sup>。たとえば、ゴッホの絵画を色相、彩度、明度に変換した図-11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-12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向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。

#### ❖ 色相変化・彩度変化・明度変化の解析

前節までの考察に基づき、補色対比の効果が施された絵画では、光源の遮蔽により光源から寄与分が変化し、それに伴い物体表面の明るさが変化している個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て、絵画中に観察され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. 光源環境の推定：絵画の中に描かれた物体の中から解析に利用する物体とその物体が影を落とすシャドウ面の3次元形状を推定し、シャドウ面に落とされた物体の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. 照度比の計算：推定された光源方向に白色の光源を配置し、シャドウ面において光源からのエネルギーが遮蔽物体によりどれだけ遮蔽されているかを示す照度比を計算する。
3. 照度比に基づく色変換のモデル化：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、明度との関係を考慮することにより、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。

#### ❖ 絵画空間への仮想物体の重ね込み

推定された光源環境とモデル化された画家による陰影付けのメカニズムを用いて、絵画空間に仮想物体を同じ

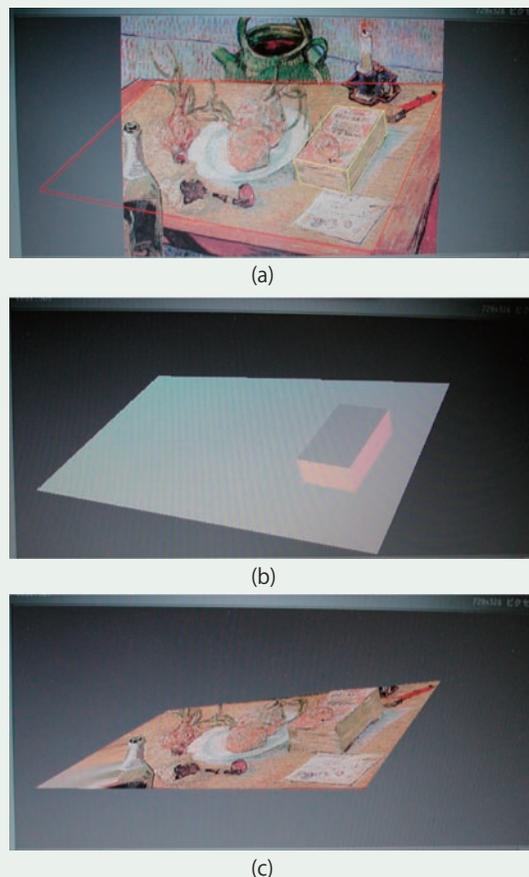


図-10 Canomaにより得られた幾何形状：(a) プリミティブを利用した幾何形状特徴の入力、(b) 得られた遮蔽物体およびシャドウ面の3次元形状、(c) テクスチャが付加された3次元形状。

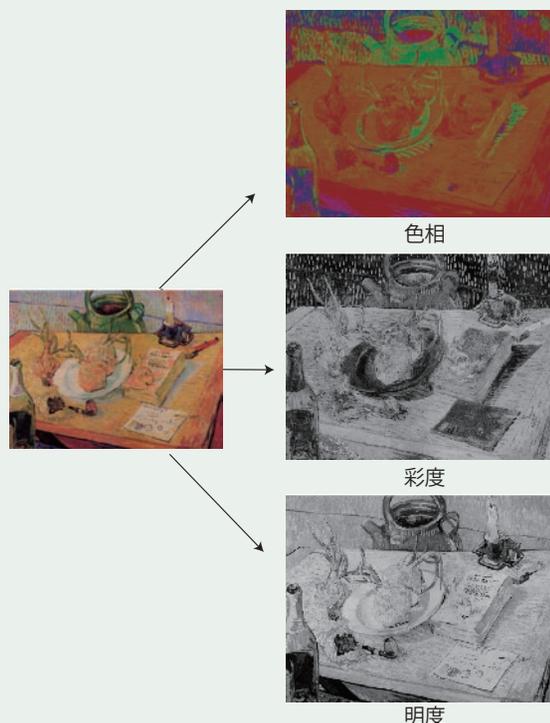


図-11 色相、彩度、明度への変換

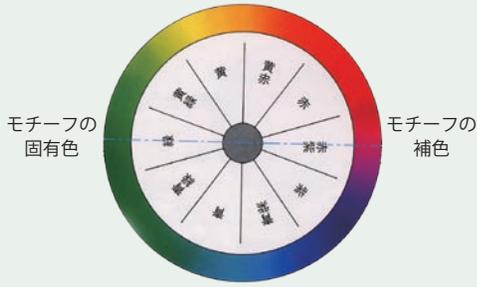


図-12 色相環



(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

図-13 上段: "Still Life: Drawing Board, Pipe, Onions and Sealing-Wax" by Vincent van Gogh, 下段: "Artist in Studio", by Rembrandt

ような陰影で重ね込んだ例を紹介する。具体的には、入力画像の画素単位で以下の処理を行っていく。

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)に対応しているのかを判断する。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。

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-13 (c) に示す。合成画像では、仮想物体はまわりの物体の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-13 (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。

## 写実リアルから感性リアルへ

本稿では、視覚的に現実感の高い画像合成を目指す写実リアルと人間の感性を刺激してリアリティを感じさせるような感性リアルの再現を目指し、筆者らがこれまで進めてきた研究を紹介した。写実リアルの再現に関しては、光源環境の変化に伴う実物体の見えの変動をコンピュータ上で再現する手法を紹介した。また、感性リアルの再現に関しては、絵画を対象として、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紹介した。今後は、写実リアルと感性リアルの両者に共通するような要素、すなわち写実リアルと感性リアルの相関について解析を進めたいと考える。

### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 佐藤, 佐藤, 池内: 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, 情報処理学会論文誌コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.44, No.SIG9, pp.132-141 (July 2003).
- 3) Debevec, P. E.: Rendering Synthetic Objects into Real Scenes: Bridging Traditional and Image-based Graphics with Global Illumination and High Dynamic Range Photography, Proc. SIGGRAPH '98, pp.189-198 (July 1998).
- 4) Ramamoorthi, R. and Hanrahan, P.: A Signal-processing Framework for Inverse Rendering, Proc. SIGGRAPH '01, pp.117-128 (2001).
- 5) Sato, I., Okabe, T., Sato, Y. and Ikeuchi, K.: Appearance Sampling for Obtaining a Set of Basis Images for Variable Illumination, Proc. IEEE Int'l Conf. Computer Vision, pp.800-807 (Oct. 2003).
- 6) Sato, I., Okabe, T., Sato, Y. and Ikeuchi, K.: Using Extended Light Sources for Modeling Object Appearance under Varying Illumination, in Proc. IEEE Int'l Conf. Computer Vision, pp.325-332 (Oct. 2005).

(平成18年3月6日受付)