

## 研究課題別評価書

### 1. 研究課題名

「感性リアル」表現の制作支援を目的としたCG技術の開発

### 2. 氏名

佐藤いまり

### 3. 研究のねらい

コンピュータグラフィックス(CG)により現実感の高い映像コンテンツを生成するためには、その入力としてシーンの物体(形状や反射特性)に関する精密なモデルを必要とする。実在物体の持つような複雑な質感の生成を追求すればするほど、生成対象の物体に関するモデルを準備するのが難しいという問題が存在する。本研究では、実世界の観察に基づき、実在物体の持つ複雑な質感や形状をモデル化し写実的な画像生成を実現する技術を開発する。さらに人間の視覚特性を考慮することにより、人間の感性を刺激して現実感を感じさせるような感性的なリアリティを実現する画像加工技術の開発を行う。

### 4. 研究成果

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、様々な描画アルゴリズムやハードウェアが開発されてきた。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を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。

CGにより現実感の高い映像コンテンツを生成するためには、その入力としてシーンの物体(形状や反射特性)に関する精密なモデルを必要とする。レンダリング技術の急速な発展の一方で、実物体の持つような複雑な質感の生成を追求すればするほど、物体の形状モデルや反射パラメータを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、本研究では、実在シーンの観測に基づき実在物体のモデルを自動構築する技術を開発する。具体的には、照明変動に伴い物体表面の各点において観察される輝度変化に基づき実在物体の反射特性(色艶、質感)や形状をモデル化する手法の開発を進めた。さらに、人間の視覚特性を考慮することにより、効果的な画像提示方法についても研究を進めた。

#### 1) 質感のモデル化

実在物体の見え(色艶や質感など)のモデル化に際し、対象物体を観察するための照射方向(物体を照らす光源の方向)は、経験的に決められることが多く、どのような光源のもとで撮影された何枚の観察画像を準備すれば対象物体の反射特性が正しくモデル化できるのかという点は、これまで十分に検討されてこなかった。本研究では、物体の反射特性を表す双方向反射関数の周波数特性と球面調和関数のサンプリング定理にもとづき、どれだけの方向にどのような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。

提案手法を用いて実在物体の見えを効率良くモデル化し、屋内外の複雑な光源環境下におけるその物体の見えを生成した結果を図1に示す。ここでは、Debevecらにより提供されているLight Probeによる実光源環境計測を画像に用いた(図1上段:球面に広がる光源環境を画像として表示)。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良く分かる。

サンプリング理論に基づく解析を通し、対象物体の見えをモデル化するために必要な照射方向(物体を照らす光源の方向)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とが分かった。しかしながら、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対象物体の周波数帯域を明示する事が難

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

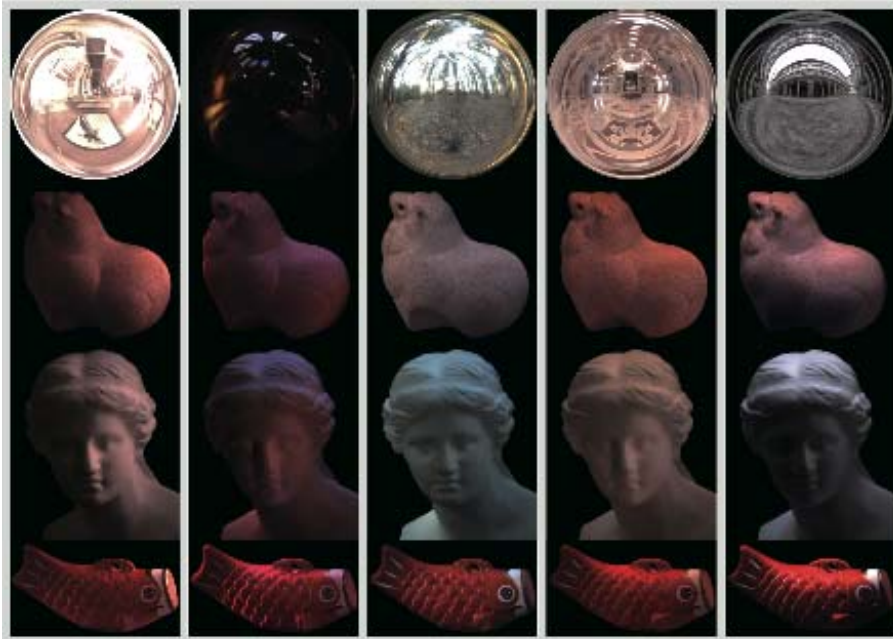


図1:複雑光源環境下において生成された画像:上段に光源環境を示す。

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っ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。

本研究では、この問題にも取り組み、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た。図2に拡散光源を用いた撮像装置と提案手法を用いて生成された画像を示す:対象物体を包み込む形で拡散球(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。これにより、従来は取り扱うことが困難であった非常に複雑な反射特性を持つ実在物体に対しても比較的少数枚の入力画像からモデルを獲得し、任意照明環境下の物体の見えを効率良く生成できるようになった。

図2では、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色・艶を持つ貝殻(あわび)を対象物体として用いた実験結果を紹介する。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照明変動に伴う物体の見えの変動をモデル化した。対象物体を一般的な室内光源環境下で撮影した画像と、提案手法により生成された画像とを比較した結果を図の中央に示す。ここでは、魚眼レンズ付カメラを用いて計測された研究室の実際の光源分布を用いて画像を生成した。鏡面反射や複雑な色合いなど、全体として実際の見えと非常に良く一致している様子が分かる。また、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の左に示す。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している様子が分かる。図3では、提案手法を用いて生成された画像を評価するために、一般的な物体を対象としてシミュレーション実験を行った結果を示す。正解画像(上段)に比べ遜色の無い画像が提案手法により生成できている(下段)ことが分かる。

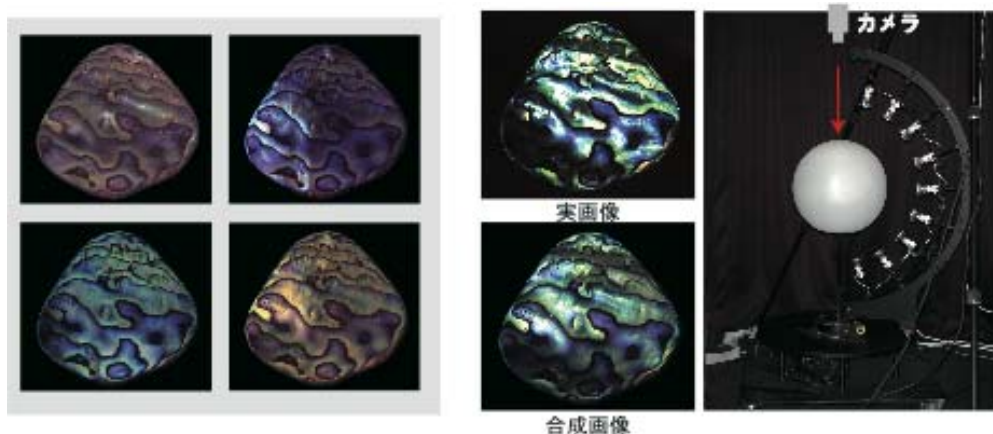


図2：拡散光源を用いた撮像装置（右）：拡散球の上部にカメラが配置されており、拡散球上に空けられたカメラ用の穴を通して、物体の見えるを観察している。光源環境の変化に基づき見えの変動を合成（左）。実画像と合成画像との比較（中央）。

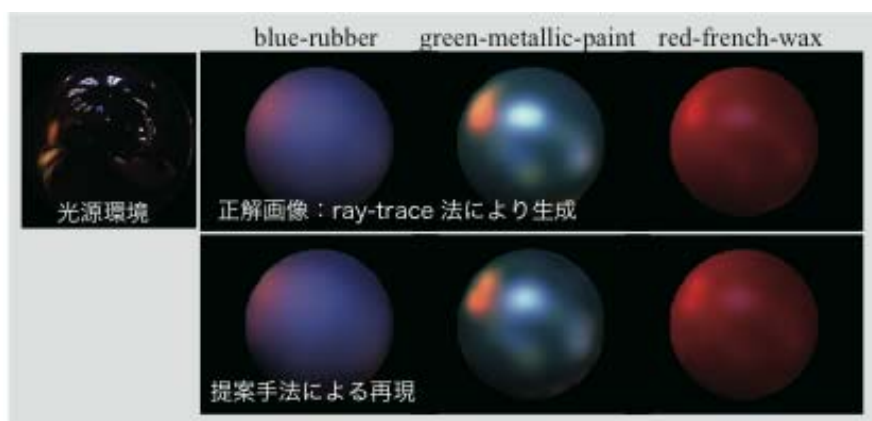


図3：CGを用いたシミュレーション実験。上段：ray-trace 法による正解画像。下段：提案手法を用いてサンプリング理論に基づき対象物体の見えるを効率良くモデル化し複雑な自然光源環境下での物体の見えるを生成している。正解画像と比べても遜色の無い見えが生成できていることが分かる。

## 2) 形状のモデル化

従来研究は、完全拡散反射などを表す反射モデル式を利用することにより物体表面の形状を推定できることを示している。しかしながら、現実世界の物体の中には、パラメトリックな反射モデル式で表現できないような複雑な反射特性を示す物体が多数存在する。本研究では、様々な照明条件で撮影された物体の画像列のみを利用して、反射モデルを仮定せず、物体を照らす光源方向も未知という困難な条件のもとで、物体形状を推定する手法を開発した。

具体的には、照明変動に伴い実在物体表面の各点で観察される輝度履歴（照明変動に伴う輝度の変化）に基づき物体の三次元形状を推定する手法を開発した。図4に示すように類似の法線ベクトルを持つ物体表面の点の輝度履歴はほぼ等しくなる。そこで、類似度と各点の法線ベクトルの類似度に密接な関係があることに着目し、多次元尺度構成法（観測された類似度に基づきデータ内の構造を見つけ出す方法）の枠組みで法線ベクトルを推定するという全く新しい発想に基づく形状推定手法を提案した。

実画像を用いた実験結果を図4に示す（推定に用いた入力画像列、推定された法線および物体形状を示す）。実験対象は、(a) ビスク焼きの猫、(b) プラスチックのレモン、(c) 陶磁器の羊であり、130枚から150枚の画像を用いて物体形状を復元している。おおまかな物体形状が詳



復元されている様子が分かる。特に、ビスク焼きの猫は、非一様なテクスチャに加えて鏡面反射やキャストシャドウが生じており、形状推定が困難であることが予想される。このような対象に対しても良好な結果が得られており、このことは提案手法により頑健な形状推定が可能なことを示している。

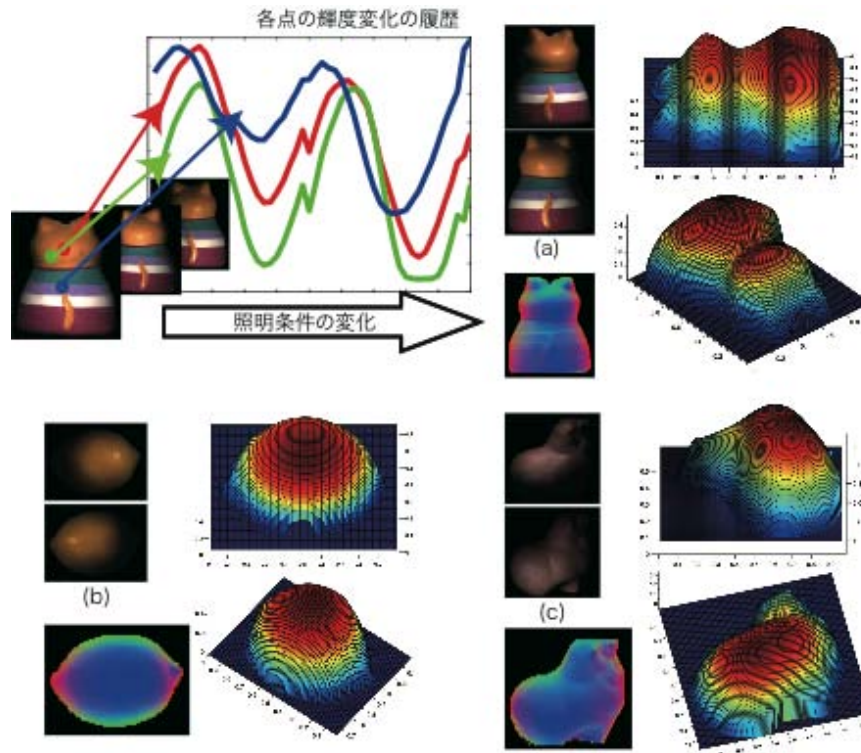


図4：実画像を用いた形状推定実験

### 3) 人間の視覚特性を考慮した効果的な画像提示

私たちが知覚する光の情報(波長や輝度)に比べ、コンピュータ上で生成された画像を提示する液晶モニタなどの画像提示デバイスが出力できる輝度の範囲(色や輝度のダイナミックレンジ)は限られている。そのため、このような画像提示デバイスを用いて、私たちが実世界で観察するような輝度や色のダイナミックレンジを再現することは難しい。

本研究では、出力デバイスの色や輝度の範囲を最大限活用して、液晶モニタなどの画像提示デバイスの色や輝度出力の限界を超えて、コントラスト高く色鮮やかな印象で画像を提示するための要素技術の開発を行った。具体的には、人間が知覚しない色誤差や輝度誤差を積極的に利用することにより実際に提示している明るさ以上にコントラストの高い画像として人間に知覚させるアプローチを検討した。

- ① 色誤差の利用: 人間の視覚特性を考慮し、同じ色に知覚される色領域を積極的に利用することにより、輝度高く色を再現できることを示した。
- ② 輝度誤差の利用: ユーザが知覚しない最小輝度差や画像各領域における空間周波数に基づき定められる輝度誤差を利用することにより、仮想的に画像提示デバイスの出力範囲を広げてことが画像を提示することが可能なことを示した。

### 5. 自己評価

研究の申請段階では、人間の感性を反映させて直感的に物体のモデル化が行えるモデリングツールの開発および画像生成アルゴリズムの開発を目指していた。しかしながら、領域会議での議論や研究総括からの助言を通して、完成度の高いモデリングツールの開発に焦点をあてるよりも、現実世界の写実性を画像として表現するために必要な要素は何かということに正面

から向き合うことに興味を持ち始めた。その結果、光学と感性の両側面から研究を進め、1) 質感のモデル化、2) 形状のモデル化、そして 3) 人間の視覚特性を考慮した効果的な画像提示について成果を挙げることができた。特に、1) 質感のモデル化の研究では、物体のどのような光源のもとで撮影された何枚の観察画像を準備すれば対象物体の反射特性(色艶・質感)を効率に精度良くモデル化できるのか、その必要撮影条件を理論的に明らかにすることができた。実在物体のモデル化作業の効率化と精度向上に貢献できる成果であると考え。また、2) 形状のモデル化では、様々な照明条件で撮影された物体の画像列のみを利用して、特定の反射特性を仮定せず、物体を照らす光源方向も未知という非常に困難な条件のもとで形状推定する技術を世界にさがけて提案することができた。3次元センサや光源装置などの特殊なデバイスを必要とせず、デジタルカメラなどの一般的な撮像機器を用いて形状を容易に獲得することも開発された技術の大きな利点であると考え。

## 6. 研究総括の見解(公開)

CG(コンピュータグラフィック)の研究分野では、現実感のあるリアルな画像生成が重要な1つの研究課題となっている。今回の研究では、複雑な質感や形状をもつ物体の画像を生成するための、観測画像の取得、モデル化や、画像をディスプレイ等に効果的に表示する技術開発について取り組んだ。

質感のモデル化においては、経験的に行なわれていた観測画像の取得を、双方向反射関数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、理論的に何枚画像を準備すればよいかを明らかにした。形状のモデル化においては、観測される輝度履歴に着目し形状を推定する方式を提案し、これまでパラメトリックな反射モデルでは不可能な形状でも推定することが可能になった。具体的には、屋内外の複雑な光源環境下でも、また特異な反射特性をもつ物体(あわびのような貝殻模様)でも、モデル化することができるようになった。ディスプレイなどの画像デバイスは、人が知覚する色や輝度などの光の情報量に比べて、狭い範囲でしか出力できない。人には知覚できない色誤差や輝度誤差の特性を利用し、デバイスが物理的限界を超えて色や輝度を提示しているかのように人が知覚する画像の表示技術を開発した。

今回の研究は、現実世界の写実性を画像として表現するための要素とは何かという課題設定を行い、正面から取り組んだものもある。その研究成果は、画像関連における学会でも高く評価された。今回開発された技術が、CG 作成の効率化に現場で活用されるよう更に研究が進められることを期待する。

## 7. 研究成果リスト(一部公開)

A: さきがけの個人研究者が主導で得られた成果

### (1) 論文(原著論文)発表

- I. Sato, T. Okabe, Q. Yu, and Y. Sato, "Shape Reconstruction Based on Similarity in Radiance Changes under Varying Illumination," *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV07)*, pp. 1-8, October 2007.
- I Sato, T Okabe, Y Sato, and K. Ikeuchi, "Appearance Sampling of Real Objects for Variable Illumination," *International Journal of Computer Vision*, vol. 75, no. 1, pp. 29-48, October 2007.
- 佐藤いまり, 岡部孝弘, 佐藤洋一, 池内克史, "任意光源環境における画像生成のための物体の見えの標本化," 情報処理学会論文誌, vol. 47, No. SIG10 (CVIM15), pp.107-119, July 2006.
- I. Sato, T. Okabe, Y. Sato, and K. Ikeuchi, "Using Extended Light Sources for Modeling Object Appearance under Varying Illumination," *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV 05)*, pp. 325-332, October 2005.
- 佐藤いまり, 岡部孝弘, 佐藤洋一, 池内克史, 「拡散光源を用いた物体の見えの標本化」, 情報処理学会 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU 2005), pp. 88-95, July 2005.

(2) 特許出願

なし

(3) その他

[受賞]

- 画像の認識・理解シンポジウム MIRU2005 優秀論文賞(H17.7)
- 平成21年度科学技術分野 文部科学大臣表彰 若手科学者賞(H21.4)

B: その他の主な成果について

(1) 論文(原著論文)発表

- Mark Ashdown, 佐藤いまり, 岡部孝弘, 佐藤洋一,「人間の視覚特性を考慮した投影画像の光学的補正」, 電子情報通信学会論文誌 D-II, vol. J90-D, no. 8, pp. 2115-2125, October 2007.
- Mark Ashdown, 佐藤いまり, 岡部孝弘, 佐藤洋一,「人間の視覚特性を考慮した投影画像の光学的補正」, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2006), pp.75-81, July 2006.

(2) 特許出願

なし

(3) その他

[受賞]

- 画像の認識・理解シンポジウム MIRU2006 優秀論文賞(H18.7)
- 電子情報通信学会 平成19年度論文賞 (H20.5)