

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 6日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22680015

研究課題名（和文） 未較正光源を用いた物体のモデリングとその画像生成への応用

研究課題名（英文） Image-based modeling using uncalibrated light sources and its application to image synthesis

研究代表者

岡部 孝弘（OKABE TAKAHIRO）

東京大学・生産技術研究所・特任准教授

研究者番号：00396904

研究成果の概要（和文）：

近年、写実的画像生成に対するニーズの高まりから、物体の幾何学的・光学的モデルを実画像から獲得する技術として知られる照度差ステレオが再び注目を集めている。いわゆる古典的照度差ステレオには、物体を照らしている光源が既知である、物体表面の反射特性がランバートモデルに従う、カメラ応答関数が線形であるといった仮定がある。本研究では、一般ユーザにも使いやすいモデリング技術の開発を目指して、これらの仮定を緩和した手法を提案した。

研究成果の概要（英文）：

Photometric stereo, which is known as an image-based technique for estimating the shape and reflectance of an object, draws renewed attention in the context of photorealistic image synthesis. However, it is known that so-called classic photometric stereo has three limitations: it assumes known light sources, the Lambert model, and a linear camera response function. In this study, we relaxed those limitations so that photometric stereo becomes easy to use for general users.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2011年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2012年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	10,100,000	3,030,000	13,130,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学，知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：コンピュータビジョン，画像生成

1. 研究開始当初の背景

近年、映画やゲームなどの娯楽・芸術分野だけでなく、インターネットを介した電子商取引や文化遺産のデジタルアーカイビングなどの様々な分野で、写実的画像の生成に対するニーズが高まっている。写実的画像生成、つまり、見えのリアリティの追及のために、

コンピュータビジョン分野とコンピュータグラフィックス分野の学際領域では、シーンや物体の幾何学的・光学的モデルを実画像から獲得するイメージベースモデリング（image-based modeling）の研究が盛んに行われている。

画像から物体のモデルを獲得する技術の

一つとして、1980年にWoodhamの提案した照度差ステレオが知られている。物体の見えは、反射特性、いわゆる双方向反射率分布関数(BRDF)で記述され、物体表面の法線に敏感に依存するが、照度差ステレオには、この法線を直接獲得することが出来るというメリットがある。また、様々な光源下で撮影された画像を利用する照度差ステレオには、法線だけでなく、物体表面の色やテクスチャ(拡散反射率)も同時に獲得することが出来るというメリットもある。このような特長から、照度差ステレオは、写実的画像生成の文脈においてその技術的価値が再評価され、最近、活発に研究されている。

しかしながら、Woodhamの提案したいわゆる古典的照度差ステレオには、二つの限界がある。まず、物体を照らす光源の方向が既知であると仮定しているために、あらかじめ特殊な装置を用いるなどして、光源方向を較正する必要がある。また、物体表面の反射特性として理想的な拡散反射を記述するランバートモデルを仮定しているために、光沢のある物体には適用できないなど、適用可能な対象物体が制限される。

2. 研究の目的

上記のような背景から、本研究では、古典的照度差ステレオを一般化して、光源や反射特性に関する制限を緩和することを目指す。具体的には、未較正光源、つまり、方向や位置が未知の光源を用いて物体の幾何学的・光学的モデルを獲得する技術を確立する。これにより、特殊な装置を必要とせず、非専門家の一般ユーザがフリーハンドで動かした光源の下で撮影した画像から、物体の幾何学的・光学的モデルを獲得することが可能になる。特に、一年目は(1)方向が未知の遠方光源(平面波)を用いた手法を開発する。二年目は、それをさらに拡張して、(2)位置が未知の近接光源(球面波)を用いた手法を開発する。物体表面の反射特性に関しては、三年目に、(3)様々なBRDFに共通する性質を利用したり、ロバスト推定(外れ値除去)を用いたりして、照度差ステレオの適用範囲を拡大する。また、これらの応用として、写実的画像の生成にも取り組む。

3. 研究の方法

(1)の方向が未知の遠方光源を用いた物体のモデリングでは、物体表面の各点を様々な方向の光源下で観察される陰により符号化して、符号の類似度を手掛かりにして法線を推定する手法を提案した。

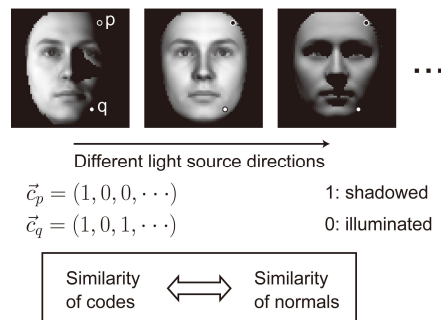
申請時における計画では、二年目に(2)の位置が未知の近接光源を用いた物体のモデリングに取り組む予定であったが、我々のグループや他のグループによる最近の研究

の発展により、光源に関する仮定はかなり緩和されてきたと言える。その一方で、研究を進めるうちに、カメラの応答関数に関する仮定を緩和することが重要であることが分かってきた。カメラの応答関数は、シーンの物理的な明るさと画素値の関係を記述するものである。古典的照度差ステレオでは、応答関数が線形、つまり、シーンの物理的な明るさが画素値に比例することを仮定しているが、民生用カメラの応答関数は、一般に非線形である。そのため、陰影を手掛かりにして実物体のモデリングを行うには、マシンビジョン用の特殊なカメラを用いるか、あるいは、民生用カメラの応答関数を事前に校正する必要がある。そこで(2)'として、非専門家の一般ユーザが民生用カメラで使える技術の開発を目指して、古典的照度差ステレオのカメラ応答関数に関する制限を緩和することに取り組んだ。具体的には、物体表面の法線と反射率を推定すると同時に、カメラの応答関数を自動的に校正する手法を提案した。提案手法のカギとなるアイデアは、光源方向と物体表面の法線から予測される物理的な明るさと、画素値と応答関数から予測される物理的な明るさの整合性を利用することにある。

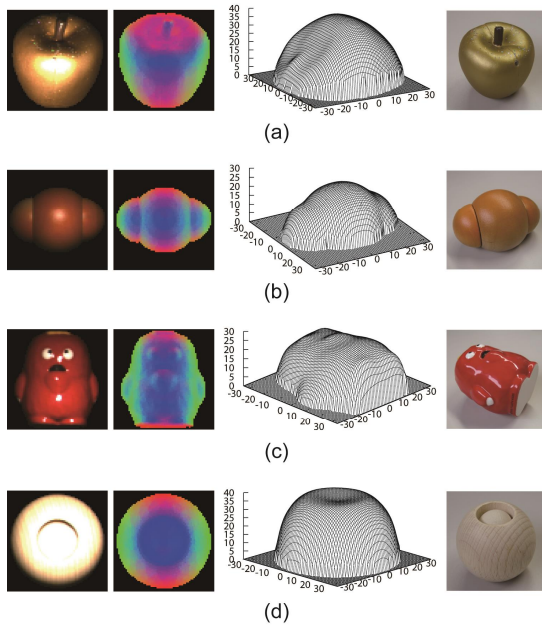
(3)の反射特性に関する制限の緩和では、(2)'の提案手法をさらに発展させて、カメラの応答関数に関する仮定を緩和するだけでなく、物体表面の反射特性に関する仮定も緩和することに取り組んだ。具体的には、いわゆるロバスト推定(外れ値除去)の枠組みに基づいて、ランバートモデルに従わない鏡面反射成分などを外れ値として扱うことで、ツヤのある物体に対しても、物体表面の法線と拡散反射率を推定すると同時に、カメラの応答関数も自動的に校正する手法を提案した。

4. 研究成果

(1)の方向が未知の遠方光源を用いた物体のモデリングでは、「陰に基づく符号化による法線推定法」を提案した(下図)。実画像、および、合成画像を用いた実験を行い、対象物体の形状が凸で、かつ、光源を対象物体の周りで一様に動かす場合には、百枚程度の画



像を用いて、物体表面の法線を高い精度で推定出来ることを示した（下図）。



一方、対象物体の形状が凸でない場合には、影や相互反射の影響により観察される陰符号に外れ値が含まれることから、法線の推定精度が悪化する場合がある。そこで、非凸領域の法線の推定精度を実験的に検証するとともに、ロバスト推定を用いた提案手法の拡張について検討を行った。

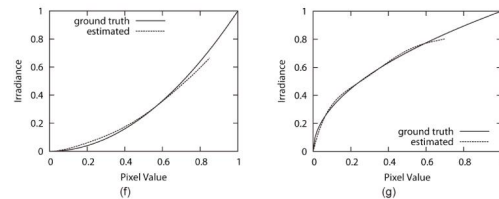
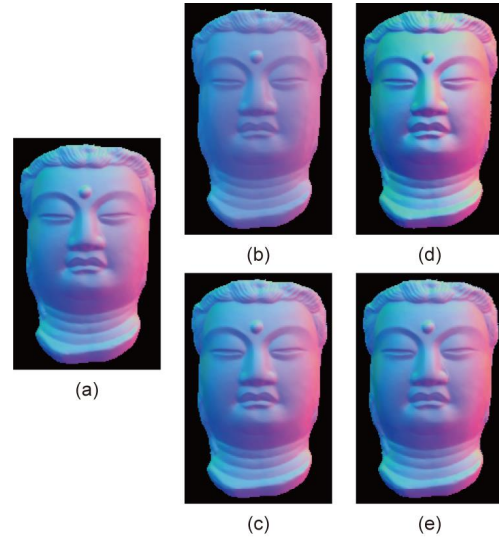
また、陰がGBR (Generalized Bas Relief) 変換と呼ばれる変形変換の下で保存されるために、一般に、陰からの形状復元には不定性がある。提案手法では、光源分布の一様性に基づいて不定性の問題を解決しているが、光源分布が一様でない場合には、推定された形状に歪が生じる。そこで、光源分布の偏りに基づく光源の重みを導入することにより、非一様分布光源の影響を緩和するように、提案手法を拡張した。

提案手法の副産物として、推定された法線から、光源方向も推定することが出来る。その結果、方向が既知の光源下の画像が大量に得られることになるので、それらの重ね合わせ（凸結合）により、任意照明下の画像を生成することを検討した。

近年、照度差ステレオの一般化に関する研究が盛んに行われるようになってきた。提案手法は、陰の利用に加えて、符号化という陰の利用の仕方もユニークであり、国内外において一定の評価を得ている。

(2)'のカメラ応答関数に関する制限の緩和では、「物体表面の法線・拡散反射率とカメラ応答関数の同時推定法」を提案した。つまり、照度差ステレオの枠組みに、カメラ応答関数の自動校正を導入した。この研究では、カメラ応答関数（厳密にはその逆関数）が多

項式近似出来ることに着目して、同時推定の問題が線形制約付の線形最適化問題に帰着することを示した。実画像、および、合成画像を用いた実験を行い、提案手法が法線・拡散反射率のみならずカメラ応答関数も推定出来ることを確認した（下図）。



	Surface normal (classic)	Surface normal (ours)	Inverse response function
Sphere(2.0)	11.3°	2.3°	0.027
Sphere(0.5)	13.1°	3.1°	0.015
Statue(2.0)	11.6°	2.1°	0.021
Statue(0.5)	13.0°	2.6°	0.015

提案手法によりカメラ応答関数の自動校正を実現したことで、マシンビジョン用の特殊なカメラを用いたり、民生用カメラの応答関数を事前に校正したりすることなく、対象物体の幾何学的・光学的特性を獲得することが可能になった。

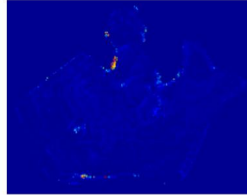
(3)の反射特性に関する制限の緩和では、「物体表面の法線・拡散反射率とカメラ応答関数の同時推定法：非ランバート面への拡張」を提案した。提案手法は、(2)'の成果をさらに発展させたものであり、ロバスト推定の枠組みに基づいて、ランバートモデルに従わない鏡面反射成分などを外れ値として扱うことで、ツヤのある物体に対しても、物体表面の法線・拡散反射率を推定すると同時に、カメラの応答関数も自動的に校正する手法を提案した。実画像ならびに合成画像を用いた実験を通して、提案手法の有効性を確認した（下図）。



(a)



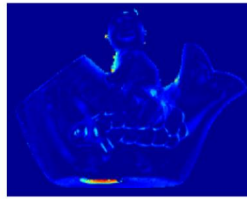
(b)



(c)



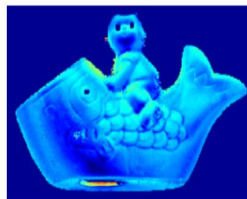
(d)



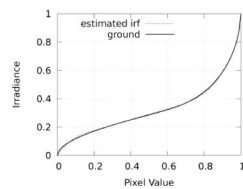
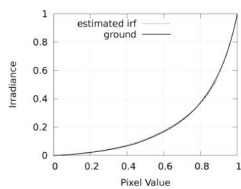
(e)



(f)



(g)



	Surface normal (classic)	Surface normal (auto-calib.)	Surface normal (ours)	Inverse response function
FISH(agfapan)	17.90°	3.89°	2.22°	0.0063
FISH(agfascala)	6.91°	3.13°	2.40°	0.0055
TOMATO(agfapan)	17.90°	2.77°	1.80°	0.0075
TOMATO(agfascala)	5.56°	1.76°	1.69°	0.0086

申請者の知る限り、提案手法は、物体表面の法線・拡散反射率とカメラ応答関数を同時に推定出来る唯一の手法であり、徐々にではあるが国内外で認知されつつある。また、上述のように、マシンビジョン用の特殊なカメラを用いたり、民生用カメラの応答関数を事前に校正したりすることなく、対象物体の幾何学的・光学的特性を獲得することが可能であることから、一般ユーザの利用という観点からも、今後の広がりが期待されている。

なお、カメラ応答関数に関する制限は、照度差ステレオのみならず、コンピュータビジョンにおける明るさ解析（画素値を手掛かり

にしたシーン理解) 全般における避けて通ることの出来ない極めて重要な問題である。したがって、本研究の成果である「カメラ応答関数の自動校正」という考え方は、他のコンピュータビジョンアルゴリズムにも導入することが求められており、今後の発展が期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 岡部孝弘, 佐藤いまり, 佐藤洋一, 陰に基づく符号化による法線推定, 電子情報通信学会論文誌, 査読有, Vol. J93-D No. 8, 2010, pp.1281-1291

[学会発表] (計3件)

- ① モンコンマーン ウィーンナート, 岡部孝弘, 佐藤洋一, カメラ応答関数の自動校正を伴う照度差ステレオ: 非ランバート物体への拡張, 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, 2013年01月23日, 京都大学
- ② Wiennat Mongkulman, Takahiro Okabe, and Yoichi Sato, Automatic radiometric calibration in photometric stereo by using irradiance consistency, 情報処理学会研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア(CVIM), 2011年11月18日, 筑波大学
- ③ Wiennat Mongkulman, Takahiro Okabe, and Yoichi Sato, Photometric stereo with auto-radiometric calibration, IEEE Color and Photometry in Computer Vision Workshop (CPCV2011), 査読有, 2011年11月12日, バルセロナ(スペイン)

[その他]

- ① ホームページ: <http://www.pluto.ai.kyutech.ac.jp/~okabe/index.html>
- ② アウトリーチ活動: オープンキャンパス(生研公開)における研究紹介
2012年6月1日・2日
2011年6月3日・4日
2010年6月4日・5日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡部 孝弘 (OKABE TAKAHIRO)
東京大学・生産技術研究所・特任准教授
研究者番号: 00396904