

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 4 日現在

機関番号：17104

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26540088

研究課題名(和文) カメラレスポンス関数未知の単一画像の理解

研究課題名(英文) Single-image understanding under unknown radiometric response functions

研究代表者

岡部 孝弘 (Okabe, Takahiro)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：00396904

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：一般ユーザが民生用カメラで撮影した単一画像の理解を目指して、カメラレスポンス関数未知の画像から、光源環境、反射特性、および、形状などのシーンの記述を復元する手法を開発した。具体的には、基底関数の線形結合表現に基づく全方位光源分布とレスポンス関数の同時推定、テクスチャ分布のエントロピー最小化に基づくテクスチャとレスポンス関数の同時推定、および、両者を統合した全方位光源分布とテクスチャとレスポンス関数の同時推定を実現した。また、非線形レスポンス関数が形状復元に与える影響を調べるとともに、可積分条件に基づく形状とレスポンス関数の同時推定を試みた。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have developed an image-based technique for recovering the description of a scene such as shape, reflectance, and illumination from a single image taken by a consumer camera with an unknown and nonlinear radiometric response function. Specifically, we proposed a joint estimation of an illumination distribution and a response function on the basis of their low-dimensional linear models, a joint estimation of surface reflectance and a response function via entropy minimization, and a joint estimation of an illumination distribution, surface reflectance, and a response function by combining the above two methods. In addition, we investigated how the surface shape recovered by conventional shape from shading is distorted by nonlinear response functions, and tried to jointly estimate surface shape and a response function on the basis of the integrability constraint.

研究分野：視覚情報処理

キーワード：コンピュータビジョン イメージベーストモデリング

1. 研究開始当初の背景

ヒトの視覚機能の計算機による模倣に端を発するコンピュータビジョン (CV) の研究において、単一画像の理解、つまり、単一画像から形状・反射特性・光源環境などのシーンの記述を復元する研究は、中心的な研究テーマの一つである。ヒトは単一画像からでもシーンの記述をある程度理解していると思われるが、単一画像のある画素値 (一つの観測値) からその画素に対応するシーンの記述 (複数の未知数) を復元することは、一般に不良設定問題である。

従来研究では、良設定問題となる条件下においてシーンの記述を復元したり、シーンの記述に関する事前知識を用いて不良設定性を軽減したりしてきた。ところが、従来研究では、線形のカメラレスポンス関数を持つ理想的なカメラで撮影された画像を仮定していた。つまり、画素値が物理的な明るさ (輝度) に比例することを前提としていた。しかしながら残念なことに、ほとんどの民生用カメラは、白とびや黒つぶれを抑えて画質を向上させるために、レスポンス関数が非線形、つまり、画素値と輝度の関係が非線形であることが知られており、それらで撮影された画像に既存技術を適用することはできない。

2. 研究の目的

本研究では、一般ユーザが民生用カメラで撮影した単一画像の理解を目指して、シーンの記述とカメラレスポンス関数を同時に復元するという新たな方法論を確立する。具体的には、レスポンス関数未知の単一画像から、レスポンス関数とシーンの光源環境、反射特性、または、形状を同時に復元する問題に取り組む。特に、これらの復元が良設定問題になる条件を明らかにして、その場合の復元技術を開発するとともに、不良設定問題になる場合には、シーンの記述に関する事前知識を併用して復元する技術も開発する。

近年、インターネット上には、日々膨大な画像データが蓄積され続けているが、それらのほとんど全ては一般ユーザが民生用カメラで撮影したものである。本研究の成果は、このようなサイバースペースに存在する一般的な画像の理解においても鍵となる技術であると期待される。さらに、ヒトの目の感度もまた非線形のレスポンス関数で記述されることから、ヒトの視覚情報処理の研究分野に示唆を与えることも期待される。

3. 研究の方法

本研究では、民生用カメラなどで撮影されたカメラレスポンス関数未知の単一画像を対象として、光源環境、反射特性、および、形状などのシーンの記述を復元する技術を開発する。具体的には、レスポンス関数がベ

き乗や基底関数の線形結合などにより少数個のパラメータを用いて近似的に表現できることを利用して、シーンの記述とレスポンス関数のパラメータを同時に復元する。

レスポンス関数未知の光源環境の復元が良設定問題になると考えられるのに対して、レスポンス関数未知の反射特性の復元や形状の復元は不良設定問題になると考えられる。そこで、反射率に関するスパース性や奥行きに関する可積分条件などの事前知識を併用して、シーンの記述とレスポンス関数の同時復元を行うことを検討する。

4. 研究成果

(1) 光源環境の復元

シーンの形状と反射特性が既知であると仮定して、画像からシーンの光源環境を復元する技術は、インバースライティング (inverse lighting) と呼ばれる。インバースライティングは、シーンの理解のみならず、仮想物体の実画像への重畳といった拡張現実感や複合現実感でも重要な技術である。

被写体が十分遠方の光源に照らされているとき、シーンの光源環境は、被写体から見て天頂角 θ ・方位角 ϕ の方向からの入射光の強度、つまり、2次元の全方位光源分布として記述される。この光源分布もまた適当な基底関数の線形結合で表現できることから、レスポンス関数未知のインバースライティングは、光源分布の結合係数とレスポンス関数の結合係数の同時推定の問題に帰着する。

そこで、光源分布については球面調和関数の線形結合で、レスポンス関数については実データに主成分分析を適用して得られる固有ベクトルの線形結合で表現しておき、単一画像の画素値を手掛かりにして、これらの線形結合係数を同時に推定する手法を提案した。また、推定の安定性が各々の基底関数を並べた行列、つまり、被写体の形状・テクスチャや画素値の分布に依存することから、どのような条件下において推定が安定/不安定になるのかを調べた。さらに、推定を安定に行うための拘束条件 (レスポンス関数の非負値拘束や滑らかさ拘束) について検討を行った。

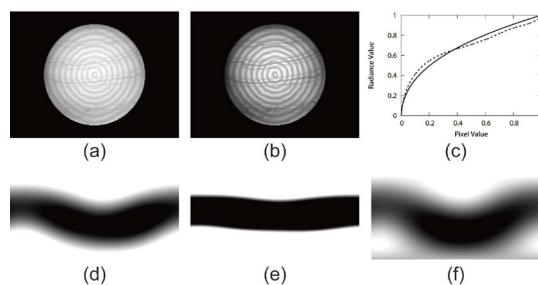


図 1: 光源環境とレスポンス関数の同時推定

合成画像を用いた実験結果の一例を図1に示す。テクスチャのある球を正面（カメラと同じ）方向の単一平行光線で照らしたときの画像を(a)と(b)に示す。(a)はカメラレスポンス関数が線形なとき、(b)は非線形なときの画像である。線形なレスポンス関数を仮定した従来手法を用いて、(a)を入力として推定した光源分布を(d)に、(b)を入力として推定した光源分布を(e)に示す。ここで、光源分布の縦軸は天頂角、横軸は方位角である。提案手法を用いて、(b)を入力として推定した光源分布を(f)に示す。(d)(e)(f)を比較すると、(e)よりも(f)の方が(d)に近いことから、提案手法が従来手法よりもうまく働くことが分かる。(c)の実線はレスポンス関数の真値を、破線は推定値を表す。提案手法により、レスポンス関数を正しく推定できていることも分かる。

(2) 反射特性の復元

シーンの光源環境と物体の形状が既知であると仮定して、画像から物体の反射特性を復元する問題を考える。特に、物体表面が Lambert model に従うと仮定して、反射率（テクスチャ）を復元する。このとき、観測値の数（＝方程式の数）が画素数に等しい一方で、未知数（各画素に対応する物体表面の反射率とレスポンス関数のパラメタ）の数は画素数よりも大きくなるので、レスポンス関数未知のテクスチャ復元は不良設定問題になる。

そこで、テクスチャに関する事前知識を併用して、テクスチャとレスポンス関数を同時に復元する手法を提案した。例えば、人工物は少数の素材で構成されることが多いため、その反射率の分布はスパースになる。より一般には、人工物だけでなく自然物にも当てはまる性質として、反射率の分布はエントロピーが小さいことが知られている。提案手法では、レスポンス関数をべき乗（画素値＝輝度のガンマ乗）で表現し、様々なガンマの値に対してテクスチャを推定しておいて、推定されたテクスチャのエントロピーが最小となるときにガンマを正解とみなした。

実画像と合成画像を用いた実験を行い、提案手法の有効性を確認した。合成画像を用いた実験結果の一例を図2に示す。テクスチャのある球を正面方向の単一平行光線と環境光で照らしたときの画像を(a)と(b)に示す。(a)はレスポンス関数が線形なとき、(b)は非線形なときの画像である。(b)を提案手法の入力としたときに、エントロピー最小化に基づいて推定したテクスチャとレスポンス関数を(e)と(f)に示す。これらが各々の真値(c)と(d)に類似していることから、提案手法がうまく働いていることが分かる。

(3) 光源環境と反射特性の復元

上記の(1)と(2)を組み合わせて、レスポ

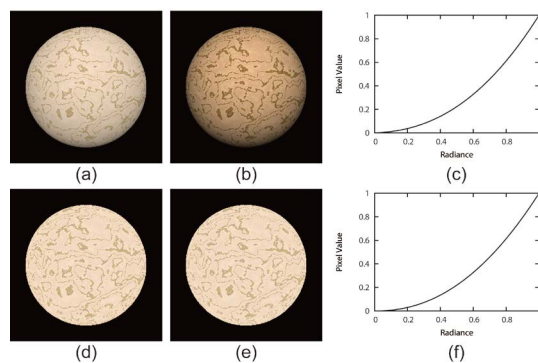


図2：反射率とレスポンス関数の同時推定

ス関数未知の単一画像から光源環境とテクスチャの両方を推定する手法を提案した。具体的には、光源環境を球面調和関数の線形結合で、レスポンス関数をべき乗で表現し、エントロピー最小化に基づいて、光源環境とテクスチャとレスポンス関数の3つを同時に推定した。

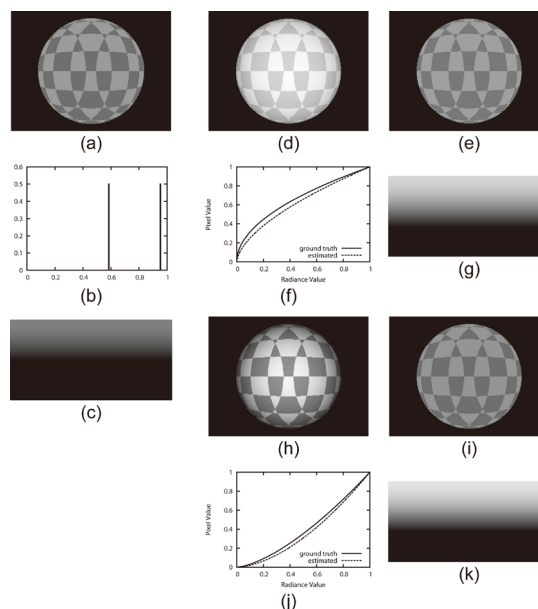


図3：光源環境、反射率、および、レスポンス関数の同時推定

合成画像を用いた実験結果の一例を図3に示す。テクスチャのある球を正面方向の単一平行光線と環境光で照らしたときの画像を対象とした。(a)、(b)、および、(c)にテクスチャの真値、テクスチャの分布（ヒストグラム）、および、光源分布を示す。(d)、(e)、(f)、および、(g)は、ガンマが0.5のときの入力画像、推定されたテクスチャ、レスポンス関数（実線が真値、破線が推定値）、および、推定された光源分布である。(h)、(i)、(j)、および、(k)はガンマが1.5のときの結果である。これらの結果から、光源環境、テクスチャ、および、レスポンス関数が単純なときは、提案手法がうまく働くことが分かる。一方で、これらが複雑なときは、提案手法が

うまく働かないことも明らかになった。これは、エントロピーが微分可能ではないために、勾配法などを用いて解を求めることができないことに起因する。特に、複雑な光源環境や複雑なレスポンス関数に対しては、それらを表現するためのパラメタ数が増加してしまうことから、解の探索に関する問題がより顕著になる。この問題を解決するために、エントロピーの代替となるテクスチャに関する事前知識、具体的には全変動 (total variation) などを検討している。

(4) 形状の復元

シーンの光源環境と物体の反射特性が既知であると仮定して、画像から物体の形状を復元する技術は、shape from shading (SfS) と呼ばれる。SfS では、物体が明るさと方向が既知の単一平行光線に照らされ、物体の反射特性が反射率一様の Lambert model で記述されることを仮定することが多い。このとき、観測値の数 (=方程式の数) が画素数に等しい一方で、未知数 (各画素に対応する物体表面の奥行きとレスポンス関数のパラメタ) の数は画素数よりも大きくなるので、レスポンス関数未知の SfS は不良設定問題になる。

そこで本研究では、まず、非線形のレスポンス関数が従来の SfS に与える影響を調べた。具体的には、正面方向の単一平行光線で照らした Lambert 球の画像について、ガンマの値を変えたときに従来の SfS で復元される形状を調べた。図 4 に示す結果から、ガンマ=1 のときに概ね正しい形状が得られるのに対して、ガンマ<1 のときは画素値が大きくなり、物体表面がより光源 (=カメラ) 方向を向いているとみなされるために、高さ方向に縮んだ形状が得られ、逆に、ガンマ>1 のときは画素値が小さくなり、物体表面の勾配がより大きいとみなされるために、高さ方向に伸びた形状が得られることが分かる。

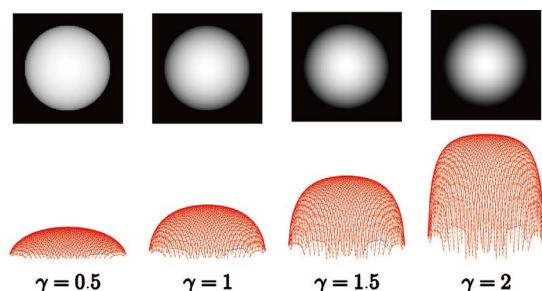


図 4 : SfS による形状復元結果

次に、事前知識 (可積分条件) に基づいて物体形状とカメラレスポンス関数の両方を推定することを試みた。可積分条件を課すことで一意に決定されるような形状があることは分かったが、一般的な 3次元形状に対しては、形状を安定に復元するのが困難であることも分かった。

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)

[学会発表] (計 6 件)

(1)小田武蔵, 岡部孝弘, "カメラ応答関数未知の単一画像からの形状復元は可能か?", 情報処理学会研究報告, Vol. 2016-CVIM-202, No. 35, 2016年5月12日, 立命館大学(大阪府・茨木市)

(2)小田武蔵, 岡部孝弘, "カメラ応答関数未知の単一画像からの形状復元", 電子情報通信学会 2016年総合大会, ISS-SP-209, 2016年3月16日, 九州大学(福岡県・福岡市)

(3)大田秀弥, 岡部孝弘, "カメラレスポンス関数未知の単一画像からのテクスチャと光源分布の推定", 情報処理学会研究報告, Vol. 2016-CVIM-201, No. 3, 2016年3月3日, 金沢工業大学(石川県・野々市市)

(4)鍋島美希子, 岡部孝弘, "カメラレスポンス関数未知の単一画像からのテクスチャ推定", 情報処理学会 第77回全国大会, 5ZG-07, 2015年3月17日, 京都大学(京都府・京都市)

(5)Shuya Ohta and Takahiro Okabe, "Does Inverse Lighting Work Well under Unknown Response Function?", In Proc. the 10th International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP2015), pp. 652-657, 2015年3月14日, Berlin (Germany)

(6)大田秀弥, 岡部孝弘, "単一画像からの光源分布とカメラレスポンス関数の同時推定", 情報処理学会研究報告, Vol. 2014-CVIM-192, No. 23, 2014年5月15日, 近畿大学(大阪府・東大阪市)

[その他]

ホームページ等

<http://www.pluto.ai.kyutech.ac.jp/~okabe/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡部 孝弘 (OKABE, Takahiro)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号 : 00396904

(2) 研究分担者

佐藤 洋一 (Sato, Yoichi)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号 : 70302627