

色度の分散比に基づく単一画像からのカメラ応答関数の推定

小田 武蔵^{1,a)} 岡部 孝弘^{2,b)}

概要: 画像の明るさ解析では、一般に、放射輝度と画素値の関係を表すカメラ応答関数が線形であることを仮定している。本稿では、民生用カラーカメラで撮影された単一画像の明るさ解析を目指して、民生用カメラの未知で非線形な応答関数を推定する手法を提案する。本研究では、色度が同じで明るさが異なる点をカメラで観察すると、応答関数が線形のときは同じ色度に、非線形のときは異なる色度になること、および、多くの画像が少数の色で構成されることに着目する。提案手法では、色度のクラス間分散・クラス内分散比を最小化することで、基底関数の線形結合で表現した応答関数の結合係数を推定する。合成画像を用いた実験を行い、提案手法の有効性を確認する。

1. はじめに

明るさ解析などの画像処理に民生用のカメラを使用する場合、一般に画像を較正する必要がある。これは民生用のカメラは多くの場合、画像として保存する際に、内部で様々な処理が施される事により、実際とは異なる画素値になっているからである。この内部処理の一つにカメラ応答関数がある。カメラ応答関数は、シーンの輝度値と画像として記録される際の画素値の関係を表す関数である。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、非線形のカメラ応答関数を持つことが知られている [4]。

従来の単一画像からの明るさに基づく 3 次元シーンのモデリング [2][5][6][8][9][13] は、画素値と輝度値が比例していること、つまりカメラ応答関数が線形であることを仮定している。したがって、カメラ応答関数が未知の画像の場合、カメラ応答関数を事前に較正・推定するか、応答関数を同時に推定する [15] 必要があった。カメラ応答関数の推定には複数の露光時間のみが異なる画像を用いる手法があるが、インターネット上の所与の画像に対して露光時間を変更することは困難である。そのため単一画像から推定する必要がある。

そこで本稿では、単一画像からのカメラ応答関数の推定に関する新たな手法を提案する。提案手法では、反射率が同じで明るさが異なる点をカメラで観察すると、応答関数が線形のときは同じ色度に、非線形のときは異なる色度に

なることに着目する。また、多くの画像が少数の色で構成されること [12] にも着目する。具体的には、色度のクラス間分散・クラス内分散比を最小化することで、基底関数の線形結合で表現される応答関数の結合係数を推定する。

本稿の構成は以下のとおりである。第 2 章ではカメラ応答関数に関する関連研究について述べ、第 3 章では提案手法について説明する。第 4 章で提案手法の有効性を確認するために行った実験の結果を紹介し、第 5 章で提案手法の問題点を整理したのち、第 6 章でまとめる。

2. 関連研究

2.1 カメラ応答関数の推定

カメラ応答関数はシーンの輝度値から画像として記録される際の画素値への変換を記述する関数である。カメラ応答関数 f によって放射輝度 E は画素値 I に $I = f(E)$ のように変換される。また単調増加であるためカメラ応答関数の逆関数（逆カメラ応答関数） g も存在する。カメラ応答関数の較正手法の一つに Debevec らの手法 [3] がある。この手法では同一環境下で撮影され、露出時間のみが異なる複数枚の画像を用いて推定する。カメラセンサーへの入射光量は露光時間に比例することを手掛かりにして、カメラ応答関数のパラメータを推定することができる。この手法を基に Mitsunaga ら [11] は周辺減光等を起こした画像領域を排除し自動的にカメラ応答関数を較正するアルゴリズムを開発している。

単一画像からのカメラ応答関数の推定手法はいくつか提案されている。Lin ら [7] はエッジ境界に沿った画素値、すなわち、輝度値の空間的な混合を手掛かりにしてを応答関数を推定している。しかし、推定に利用する情報はエッ

¹ 九州工業大学 大学院情報工学府 先端情報工学専攻

² 九州工業大学 大学院情報工学研究院 知能情報工学研究系

a) m_oda@pluto.ai.kyutech.ac.jp

b) okabe@ai.kyutech.ac.jp

ジに依存しているため、画像によっては上手く推定できない可能性がある。Wilburn ら [14] は、ディスプレイ上の2つのピクセルの時間的混合を利用する手法とモーションブラー、すなわち、空間的な混合の代わりに、時間的な混合を使用する2つの手法を提案している。前者は被写体としてディスプレイを用いなければならないこと、後者は被写体が静止している場合など、モーションブラーが発生していないときには利用できないという問題がある。Matsushita ら [10] は、ノイズ分布に基づいて応答関数を復元できることを示している。しかしノイズが対称的に分布していることを仮定しており、低照度環境下では暗電流ノイズ等の影響によりこの仮定が打ち消される。

2.2 カメラ応答関数の表現

カメラ応答関数の表現にはガンマ補正や多項式表現、ノンパラメトリック表現などがある。Grossberg らは実際のカメラ応答関数を主成分分析することにより複数の基底で表現するモデル Empirical Model of Response (EMoR) [4] を提案した。彼らは Mitsunaga らのアルゴリズムを使って実際のカメラ応答関数を測定し、ガンマ補正を加えた201個のカメラ応答関数のデータセット、Database of Response Functions (DoRF) を作成し、これに対し主成分分析を行った。EMoR は175個のカメラ応答関数平均である基本曲線 f_0 、主成分分析で求めた基底 $f_n (n=1,2,3,\dots,25)$ 及び係数 c_n を用いて画素値 I と輝度値 E の関係を

$$I = f_0(E) + \sum_{n=1}^N c_n f_n(E) \quad (1)$$

のように表現する。 N は用いる主成分の個数を表し、 $N=1$ で DoRF の応答関数を平均86%程の精度で、 $N=3$ で99.5%程の精度で近似的に表現することが可能である。同様に逆関数は

$$E = g_0(I) + \sum_{m=1}^M \beta_m g_m(I) \quad (2)$$

と表すことができる。

3. 提案手法

画像中のある画素に対応するシーンの放射輝度値を $\mathbf{E} = [E_R, E_G, E_B]$ とする。放射輝度値は一般に光源環境、被写体の反射特性、形状によって決まるが、反射特性がランバートモデルに従うとき、同じ照明に照らされている点の輝度値のRGB比 $E_R : E_G : E_B$ は被写体の反射率 $\rho = [\rho_R, \rho_G, \rho_B]$ のRGB比と一致する。つまり被写体の反射率が同じである画素の場合、明度は異なってもRGB比は同じになる。そのため図1(a)のような色の比率が一定な画像に対して、明度に関して正規化を行うと図1(b)のように一様な画像になる。

しかしカメラ応答関数が非線形な場合、そうはならない。

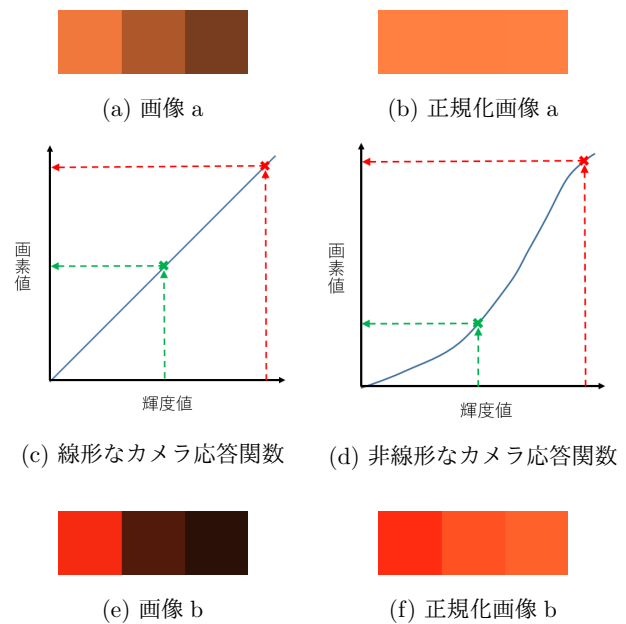


図1: 色比率

DoRF よりカメラ応答関数は、色度を一定のまま明度のみ変えるのではなく、RGB各バンド毎の輝度値に対して適用されることがわかる。そのためカメラ応答関数が線形な場合、輝度値と画素値が比例しているため、RGBの比率は一致するものの、非線形な場合は輝度値と画素値のRGBの色比率が異なる現象が起きる(図1(c)(d))。

つまり、非線形なカメラ応答関数によって変換された場合、RGB各バンドがバラバラな変化を起こすため図1(e)のように画素値が変わるだけでなくRGB比も変わってしまうため、正規化行くと図1(f)のように一様な結果にならない。よって反射率が同じでも、画像上では色度が明るさ毎に異なることになる。以上のことから反射率が同じであると思われる画素が共に同じRGB比をとる、つまりRGB比をそれぞれ $r = E_R / (E_R + E_G + E_B)$, $g = E_G / (E_R + E_G + E_B)$ を用いた r-g 空間で表現し、r-g 空間における色度の分布の分散が最小となるような逆カメラ応答関数を探索することで、カメラ応答関数を推定することが可能であると考えられる。

また Orchard ら [12] は画像を少数の色で近似して表現可能であることを示し、Alldrin ら [1] はテクスチャの分布は少数の鋭いピークを持つ、つまり材質毎に反射率は一定であり、複数の材質によって画像が構成されることを示した。よって反射率が等しい画素を少数のクラスに分類することが可能である。

提案手法では反射率の等しい画素をクラスタリングするとともに、カメラ応答関数による色度のシフトも考慮して、クラス間分散・クラス内分散比

$$J = \frac{\sigma_W}{\sigma_B} \quad (3)$$

を最小とするような逆応答関数の結合係数を求める。k番

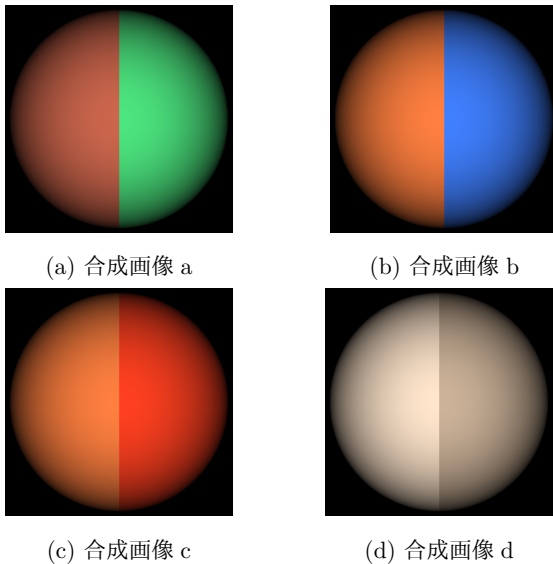


図 2: 合成画像

目のクラスの r と g の分散の和を $\sigma_k^2 (= \sigma_{kr}^2 + \sigma_{kg}^2)$ として
クラス間分散 σ_B ・クラス内分散 σ_W は

$$\sigma_B = \sum_{k=1}^n \frac{n_k}{n} \|\mathbf{m}_k - \mathbf{m}\|^2 \quad (4)$$

$$\sigma_W = \sum_{k=1}^n \frac{n_k}{n} \sigma_k^2 \quad (5)$$

のように表される．ここで $\mathbf{m}_k = (m_{kr}, m_{kg})$ はそれぞれ
 k 番目のクラスの r, g の平均と画素数を、また、 \mathbf{m}, n は
それぞれ全クラスの平均と画素数を表す．

具体的には、応答関数データセット DoRF[4] に含まれる
応答関数のうち、分散比 J を最小にするものを初期値とし
て、その近傍で結合係数 β_m を変化させて分散比が最小と
なる解を探索する．

4. 実験

4.1 実験環境

実験には図 2 のような 2 種類の反射率からなる球の合成
画像（各バンド 16bit）を用いた．画像に対して様々なカ
メラ応答関数による変換を行ったものを入力画像（図 3）と
する．入力画像に対し提案手法を適用しカメラ応答関数の
推定を行う．また基底関数の数 M は 3 とし、結合係数は
初期値 β_{m0} の近傍で $(\beta_{m0} - 0.25)$ から $(\beta_{m0} + 0.25)$ まで
変化させて解を探索を行った．また実画像への適用を考え
るため、合成画像にガウスノイズを加えてカメラ応答関数
による変換を行った画像に対しても同様の実験を行った．
ガウスノイズは画素値を 0 から 1 とし平均 0、標準偏差
0.0316, 0.0100 の 2 種類で適用した．

4.2 実験結果

カメラ応答関数が DoRF に含まれる場合は全ての画像
で、DoRF の中で正しいカメラ応答関数の時が最小になり、

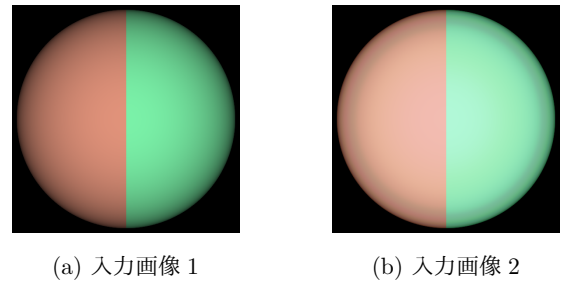
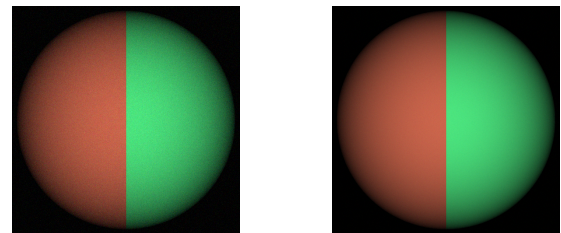


図 3: 入力画像例



(a) 標準偏差 0.0316 (b) 標準偏差 0.0100

図 4: ガウスノイズ球

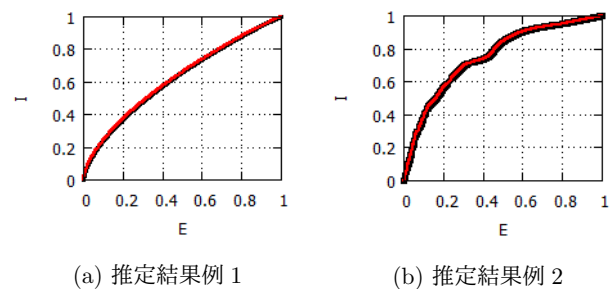


図 5: DoRF に含む場合（赤:合成画像 a 黒:真値）

また初期値の近傍から変化させても、正しいときに最小に
なり図 5 のように正しいカメラ応答関数を推定した．

カメラ応答関数が DoRF に含まれていない場合は、どの
応答関数においてもクラス間分散・クラス内分散比が最小
になった結合係数が、最も正しいカメラ応答関数に近似す
ることはなかった．また球の合成画像毎に結果は異なった．
図 6 に分散比をソートし、分散比毎の応答関数の RMSE を
プロットしたものを示す．また、DoRF で推定した初期値
を基に結合係数を変化させた結果も最も正しいカメラ応答
関数に近似することはなかったものの、概ね近似する結果
になった（図 7）．より高精度に推定するためには結合係数
の探索する範囲を広げる必要があると考えられる．

ガウスノイズを加えた画像では合成画像によって大きく
異なる結果がでた．どの画像でも DoRF に含まれるカメ
ラ応答関数であっても正しいカメラ応答関数を推定しな
かったものの、図 2(a)(b) の反射率を持つ球の画像に対し
ては概ね正しいカメラ応答関数を推定できたのに対し、図
2(c)(d) の反射率を持つ球の画像に対しては大きく異な
った応答関数を推定した．このような結果になった理由とし

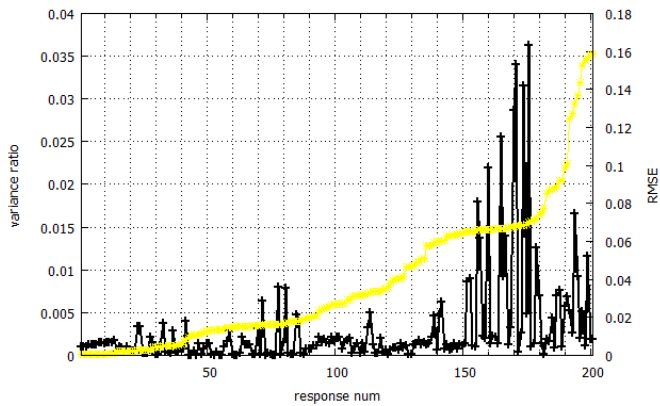


図 6: 分散比毎の推定したカメラ応答関数の RMSE(黄:分散比 黒:RMSE)

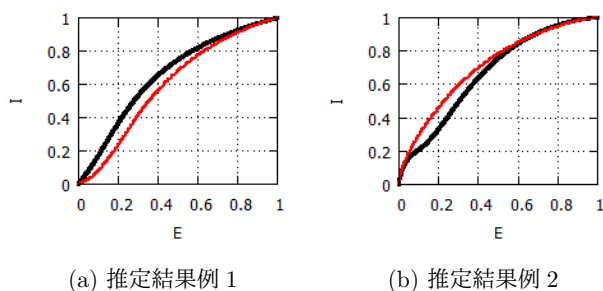


図 7: DoRF に含まれない場合 (赤:推定結果 黒:真値)

て、図 2(c) では 2 種類の反射率が比較的類似しているためだと考えられる。お互いが似た反射率を持つ場合ノイズの影響はクラス間分散値に大きく影響を与えてしまう。また図 2(d) では上記の理由に加えて反射率の RGB 比が 1:1:1 に近いめだと考えられる。提案手法では陰影による色度の差を手がかりにカメラ応答関数を推定しているため、RGB 比が 1:1:1 に近い場合、色度の差よりもノイズによる影響が大きく現れてしまったためこのような結果になったと考察される。

5. 問題点

クラス間分散・クラス内分散比は正しいカメラ応答関数のときに最小になる。そのため、提案手法ではカメラ応答関数がデータセットに含まれている場合、最小となる結合係数があるため正しく推定できるが、含まれない場合、結合係数を微小変化させて求めなければならない。この時の初期値が正しいカメラ応答関数から大きく異なっている場合、微小変化させる範囲を拡大しなければ求められない。

また明るさの差によるカメラ応答関数の影響を基に推定しているため、平面のような陰影が全くない画像だとカメラ応答関数の影響が現れないため推定することはできない。また白や黒、グレーのような RGB 比が 1:1:1 のような反射率を持つ場合、カメラ応答関数による色度の変化が起きないため推定することができない。それ以外にも、カメ

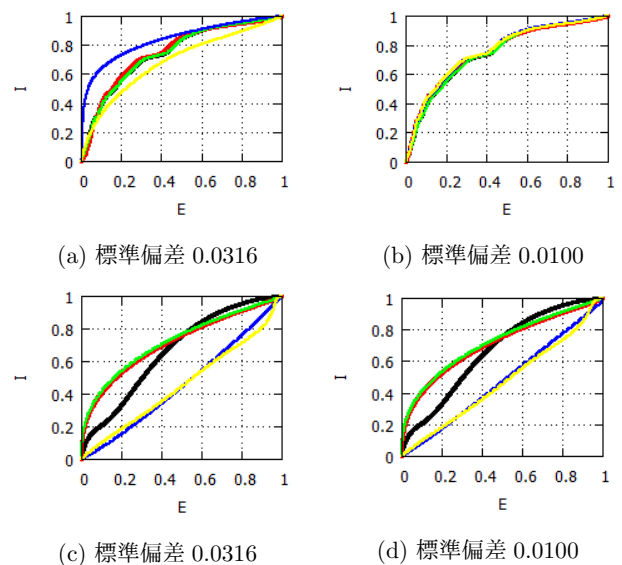


図 8: 推定結果例 (上:カメラ応答関数が DoRF に含まれる場合 下:カメラ応答関数が DoRF に含まれない場合) (赤:合成画像 a 緑:合成画像 b 青:合成画像 c 黄:合成画像 d 黒:真値)

ラ応答関数がガンマ補正のような分布の分散に影響を与えない特殊なものである場合、提案手法では理論上推定することは不可能である。

6. むすび

本研究ではカメラ応答関数未知の単一画像からカメラ応答関数を推定するために、色分布の分散比に基づいて推定する手法を提案するとともに、その有効性と問題点を確認した。提案手法では、画素値の RGB 比を r-g 色空間で表現し、クラス間分散クラス内分散比を最小にするような、カメラ応答関数を探索した。今後はカメラ応答関数の推定精度の向上および、総当りではない別の最適化手法について取り組みたい。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP26540088、および、JP17H00744 の助成を受けた。

参考文献

- [1] N. Alldrin, S. Mallick, and D. Kriegman, "Resolving the generalized bas-relief ambiguity by entropy minimization", In Proc. IEEE CVPR2007, pp.1-7, 2007.
- [2] J. Barron and J. Malik, "Shape, albedo, and illumination from a single image of an unknown object." In Proc. IEEE CVPR2012, pp.334-341, 2012.
- [3] P. Debevec and J. Malik, "Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs.", In Proc. of ACM SIGGRAPH, pages 369-378, 1997.
- [4] M. Grossberg and S. Nayar, "What is space of camera response functions?," In Proc. IEEE CVPR2003, pp.602-609, 2003.
- [5] K. Ikeuchi and B. Horn, "Numerical shape from shading and occluding boundaries", AI, 17(1-3), pp.141-184, 1981.
- [6] K. Ikeuchi, K. Sato, "Determining reflectance properties

- of an object using range and brightness images.”, IEEE Trans. PAMI, Vol.13, No.11, pp.1139-1153, 1991.
- [7] S. Lin, J. Gu, S. Yamazaki, and H.-Y. Shum, ”Radiometric calibration from a single image.”, In Proc. IEEE CVPR2004, pp.II-938-945, 2004.
- [8] S. Lombardi and K. Nishino, ”Reflectance and natural illumination from a single image.”, In Proc. ECCV2012, pp.582-595, 2012.
- [9] S. Marschner and D. Greenberg, ”Inverse lighting for photography.” In Proc. IS&T/SID Fifth Color Imaging Conference, pp.262-265, 1997.
- [10] Y. Matsushita and S. Lin, ”Radiometric calibration from noise distributions.”, In Proc. IEEE CVPR2007, pp.1-8, 2007.
- [11] T. Mitsunaga and S. Nayar, ”Radiometric Self Calibration.”, In Proc. of CVPR, volume 2, pages 374-380, June 1999.
- [12] M. Orchard and C. Bouman, ”Color quantization of images.”, IEEE Transactions on Signal Processing , 39(12):2677-2690, 1991.
- [13] F. Romeiro and T. Zickler, ”Blind reflectometry.”, In Proc. ECCV2010, pp.45-58, 2010.
- [14] B. Wilburn, H. Xu, and Y. Matsushita, ”Radiometric calibration using temporal irradiance mixtures.” In Proc. IEEE CVPR2008, pp.1-7, 2008.
- [15] 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.