

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 10 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23500214

研究課題名(和文) 解析的微小面拡散反射モデルに基づく光学的画像解析に関する研究

研究課題名(英文) Photometric Stereo and Shape-from-Shading with Surface Radiance Correction and Reflectance Property Estimation

研究代表者

原 健二(Hara, Kenji)

九州大学・芸術工学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50380712

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：Lambertian反射モデルは、拡散反射を簡潔に表すモデルとしてコンピュータビジョンや画像処理の分野で標準的に利用されている。しかし、特に粗い面において実際に観測される拡散反射はLambertianモデルに厳密に従わないことが知られている。本研究では、Lambertianモデルに基づく通常の照度差ステレオ(Photometric Stereo)と陰影からの形状復元(Shape-from-Shading)の手法をそれぞれ拡張し、粗い面にも適用可能でかつ表面法線と拡散反射特性を同時推定する二手法を開発した。合成画像と実画像を用いた実験により、提案手法の有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：The Lambertian reflectance model has been widely used in the field of computer vision and image processing to compactly model diffuse reflection. However, it is known that the observed reflections, especially on the rough surfaces, do not obey the Lambertian model closely. In the research, we extended the two standard Lambertian-based methods for photometric stereo and shape-from-shading to be applicable even to rough surfaces and to simultaneously estimate surface normals and diffuse reflectance property, respectively. Through experiments with synthetic and real images, we showed the validity of the two proposed methods.

研究分野：コンピュータビジョン

キーワード：照度差ステレオ 陰影からの形状復元 反射パラメータ推定 Oren-Nayarモデル

1. 研究開始当初の背景

仮想空間における物体の見えをコンピュータグラフィックスの技法で現実感高く生成するため、現実に存在する物体の観察に基づき、物体表面の反射特性や幾何形状といった見えに関する情報を自動的に獲得しつつ高品質な仮想物体画像を合成する modeling from reality アプローチが注目されており、コンピュータビジョンとコンピュータグラフィックスの分野で盛んに研究がなされてきている。実世界シーンの見えは、反射特性 (reflectance)、光源状況 (illumination)、幾何形状 (geometry) の三要素から決まる。そこで、一枚または複数枚の物体画像を入力として与え、その見えをこれらの各構成要素に因子分解して得られた結果を用いて、撮影時とは異なる任意の視点や光源状況下の仮想画像を合成することが可能となり、この光学的な画像解析はインバースレンダリング・ライティングと呼ばれる。特に、この三要素の中のひとつを既知とし、残り二つを未知として推定する技術は、実用・学術の両面から極めて重要である。さらに、反射特性が既知であることは実際にはほとんどないことから、反射特性を推定対象のひとつに指定すると、1) 幾何形状を既知として光源状況と反射特性を推定する問題、2) 光源状況を既知として幾何形状と反射特性を推定 (未知の反射特性をもつ物体表面の形状再構成) する問題、のいずれかに帰着する。我々は、2) の幾何形状と反射特性の決定する問題に興味がある。

二色性反射モデル理論によれば、光の反射は、拡散反射成分と鏡面反射成分の線形和で近似的に表現することが可能である。これらのうち、拡散反射は、現実に最も多く観察される基本的かつ重要な光学現象である。これまでに提案されている光学的画像解析手法の多くが拡散反射モデルとしてランバートモデルを採用している。一方、ランバートモデルよりも実測に忠実な拡散反射モデルとして、微小平面 (microfacet) の微視的な法線分布に基づく Oren - Nayar モデルが知られている。そこで、従来の光学的画像解析手法に対し、Oren - Nayar モデルの適用が可能になれば、推定精度や推定パラメータ数 (ランバートモデルのパラメータはアルベドのみであるのに対し、Oren - Nayar モデルのパラメータはアルベドと表面粗さの二つ) に関して改善が期待できる。しかし、Oren - Nayar の双方向反射分布関数 (BRDF) に含まれる最大値オペレータ (max operator) のために、この BRDF は光源方向と表面法線方向に関して微分不可能である。また、Oren - Nayar モデルを形状復元問題に用いる場合、光源方向、視点方向や入力画像枚数などに関して曖昧性 (ambiguity) が存在しているが、この曖昧性が解消される条件は明らかにされていない。これらのことが Oren - Nayar モデルの光学的画像解析における利

用を妨げていると考えられる。

2. 研究の目的

まず、Oren - Nayar モデルの BRDF における max オペレータを微分可能関数で置換することにより、Oren - Nayar モデルを微分可能な反射モデルに修正した解析的 Oren - Nayar モデルを導出する。ここで、max オペレータの近似関数として log-sum-exponential (LSE) や ISR モデルなどいくつかのものが知られているが、これらの中から変域や数値的安定性などを考慮して最適なものを選出する。これにより、しばしば非線形最適化に帰着する光学的画像解析の問題に対し、Oren - Nayar モデル下においても、Levenberg-Marquardt (LM) 法や勾配法など広く利用されている微分ベースの最適化手法が利用可能になる。さらに、前述の Oren - Nayar モデルに関する曖昧性について理論解析を行い、Oren - Nayar モデルを形状復元問題に適用するための条件を求める。

次に、実物体の画像 (列) を入力として与え、解析的 Oren - Nayar モデルの反射パラメータと物体の幾何形状を同時推定する二手法を新たに開発する。ひとつめの手法は、photometric stereo の枠組みに属し、光源方向が異なる複数枚の画像を入力とするものである。このような手法として、近年、Birkbeck らは、テクスチャ物体と非テクスチャ物体の両方に対して形状と反射特性を交互に再構成する手法を示した [6]。彼らは、物体表面の拡散反射特性がランバートモデルに従い、しかも反射パラメータの値が物体表面上で一定、すなわち反射特性が空間的に均一 (homogeneous) であることを仮定している。これに対し、最近、Alldrin らは、光源方向が異なる複数枚の画像を入力として、非パラメトリックで空間的に不均一 (inhomogeneous) な BRDF と幾何形状を同時推定する手法を提案した。この手法は、データ駆動反射モデル (data-driven reflectance model) を用いており、少なくとも数十オーダーの枚数の入力画像を必要とする。本研究では、反射成分分離を行って得られた拡散反射成分に対し、解析的 Oren - Nayar モデルを導入することにより、少数枚の入力画像からの高精度な形状復元および空間的に不均一な表面粗さパラメータとアルベドの同時推定を試みる。二つめの手法は、shape-from-shading の枠組みに属し、単一平行光源下で撮影された一枚の画像を入力とするものである。この従来手法のほとんどが物体表面の拡散反射特性がランバートモデルに従い、かつ反射特性が空間均一であることを仮定している。最近、Biswas らは、一枚画像から幾何形状、空間的に不均一なアルベドと光源方向を推定する問題を解決している [8]。彼らの手法では、形状再構成のための空間的に変化するランバート反射の取り

扱いに重点が置かれている。本研究では、解析的 Oren - Nayar モデルを導入し、その曖昧性が解消される適用条件を示したうえで、一枚の画像から空間的に不均一なアルビドと表面粗さパラメータ、そして幾何形状を同時推定する手法の開発を目指す。

以上に述べたように、本研究の遂行により、photometric stereo と shape-from-shading のいずれの枠組みにおいても、従来のランバートモデルに基づく手法から、より高精度な形状復元と空間的に不均一なアルビドと表面粗さの両パラメータの推定とを実現する手法へと、光学的画像解析分野における大幅な進展が期待できる。

3. 研究の方法

(1) 解析的 Oren - Nayar モデルの導出、(2) 解析的 Oren - Nayar モデル下における形状復元問題における曖昧性解析、(3) 光源方向が異なる複数枚の画像を入力とし、解析的 Oren - Nayar モデルの下において、反射パラメータと物体の幾何形状を同時推定する手法の開発、(4) 単一平行光源下で撮影された一枚の画像を入力とし、解析的 Oren - Nayar モデル下において、反射特性が空間的に均一であることを仮定したうえで、反射パラメータと物体の幾何形状を同時推定する手法の開発 ((3)における入力画像枚数を一枚に拡張)、(5) 単一平行光源下で撮影された一枚の画像を入力とし、解析的 Oren - Nayar モデル下において、反射特性が空間的に不均一であることを許容したうえで、反射パラメータと物体の幾何形状を同時推定する手法の開発 ((4)における反射特性に関する仮定を空間不均一に拡張) を順次遂行する。

4. 研究成果

少数枚の拡散反射画像を入力とする照度差ステレオ、及び一枚の拡散反射画像を入力とする陰影からの形状復元の通常手法に対し、適用範囲を比較的滑らかな面から粗い面を含むより幅広い材質の面に、なおかつ推定対象を表面法線のみから表面法線と拡散反射特性の両方にそれぞれ拡張した。

照度差ステレオ法の拡張手法では、表面法線方向や視線方向に関して微分可能となるように近似された Oren-Nayar モデルを用いて複数枚の拡散反射画像から表面法線と拡散反射特性に関する最小二乗問題を通常の勾配法で高速かつ省メモリで解く手法を提案した。

陰影からの形状復元の拡張手法では、光源方向と視線方向が等しく、拡散反射特性が物体表面上で均一という仮定の下で、拡散反射画像の物体領域における最大ノ最小画素値から得られる代数方程式を解くことにより、拡散反射特性と物体形状を復元する手法を提案した。いずれの手法においても、Lambertian モデルを仮定した通常の方法推定手法と比べて、復元精度を向上させること

が可能になると同時に、拡散反射特性も推定できることが確認された。

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)

[雑誌論文](計 11 件)

K.Inoue, K.Hara, K.Urahama,
On Hue-Preserving Saturation
Enhancement in Color Image Enhancement,
IEICE Trans.Fundamentals., Vol. E98-A,
No.3, pp.927-931, 2015, 査読有。

K.Hara, K.Inoue, K.Urahama,
Gradient Operators for Feature
Extraction from Omnidirectional
Panoramic Images, Pattern Recognition
Letters (PRL), Vol.54, pp.89-96, 2015,
査読有

K.Hara, K.Inoue, K.Urahama,
A Differentiable Approximation
Approach to Contrast-Aware Image Fusio,
IEEE Signal Processing Letters (SPL),
Vol.21, No.6, pp.742-745, 2014, 査読
有

原, 井上, 浦浜, 解析的 Oren-Nayar モデルを用いた表面法線と反射特性の推定,
電子情報通信学会論文誌, Vol.J97-D,
No.4, pp.895-898, 2014, 査読有

張, 原, 井上, 浦浜, 全方位パノラマ画像のためのラプラシアンフィルタ, 電子情報通信学会論文誌(画像符号化・映像メディア処理レター特集), Vol.J96-D,
No.9, pp.2003-2006, 2013, 査読有

K.Hara, K.Inoue, K.Urahama,
Generalized Mixture Ratio Based Blind
Image Separation, IEEE Signal
Processing Letters (SPL), Vol.20, No.8,
pp.743-746, 2013, 査読有

原, 井上, 浦浜, 相似変換に基づく非反復画像分離, 電子情報通信学会論文誌(画像符号化・映像メディア処理レター特集), Vol.J95-D, No.9, pp.1682-1685, 2012, 査読有

原, 西野, 一枚の画像からの反射特性とテクスチャの推定, 電子情報通信学会論文誌 (MIRU 推薦論文), Vol.J95-D,
No.8, pp.1511-1521, 2012, 査読有

原, 井上, 浦浜, ロバストバイラテラルフィルタによる混合雑音除去, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J95-D, No. 2, pp.339-341, 2012, 査読有

K.Hara, K.Inoue, K.Urahama,
Resolving Permutation Ambiguity in
Correlation-Based Blind Image
Separation, Pattern Recognition
Letters (PRL), Vol.33, pp. 559-567,
2012, 査読有

K.Inoue, K.Hara, K.Urahama,
Non-Iterative Symmetric
Two-Dimensional Linear Discriminant
Analysis, IEICE Transactions on
Information and Systems, Vol.94, No.4,
pp. 926-929, 2011, 査読有.

〔学会発表〕(計7件)

An-shui Yu, K.Hara, K.Inoue, K.Urahama,
Spatially-Variable Laplacian Edge
Detector for Fisheye Images, Proc. of
IWAIT and IFMIA, OS.19, Taipei,
2015.01, 査読有

原, 松田, 井上, 浦浜, 陰影からの形状
復元のための反射特性推定と表面輝度補
正, Visual Computing/グラフィックスと
CAD 合同シンポジウム(VC/GCAD), 東京,
2014.06, 査読有

于, 井上, 原, 浦浜, 一般化画像生成モ
デルによる画像のコントラスト強調,
Visual Computing/グラフィックスとCAD
合同シンポジウム(VC/GCAD), 東京,
2014.06, 査読有

原, 道原, 井上, 浦浜, 解析的 Oren-Nayar
モデルとその照度差ステレオへの応用,
Visual Computing/グラフィックスとCAD
合同シンポジウム(VC/GCAD), 青森,
2013.06, 査読有

原, 井上, 浦浜, 画像融合のための微分
不可能最適化アプローチ, Visual
Computing/グラフィックスとCAD 合同シ
ンポジウム(VC/GCAD), 東京, 2012.06,
査読有

原, 西野, エントロピー最小化による単
一画像からの反射特性とテクスチャの推
定, V 画像の認識・理解シンポジウム
(MIRU 2011), 金沢, 2011.07, 査読有

原, 井上, 浦浜, 反射と不透明領域の線
形ブラインド分離, Visual Computing/グ
ラフィックスとCAD 合同シンポジウム
(VC/GCAD), 東京, 2011.06, 査読有

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原 健二 (HARA KENJI)

九州大学・大学院芸術工学研究院・准教授
研究者番号: 50380712

(2) 研究分担者

井上 光平 (INOUE KOHEI)
九州大学・大学院芸術工学研究院・准教授
研究者番号: 70325570

(3) 連携研究者

浦浜 喜一 (URAHAMA KIICHI)
九州大学・大学院芸術工学研究院・教授
研究者番号: 10150492