

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：14401  
研究種目：基盤研究(A)（一般）  
研究期間：2019～2023  
課題番号：19H01123  
研究課題名（和文）質感と三次元形状のイメージングに関する研究

研究課題名（英文）Research on Appearance and 3D imaging

## 研究代表者

松下 康之（Matsushita, Yasuyuki）

大阪大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：30756507

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 30,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、カメラを用いて実世界にある物体の3次元形状と質感の両方をデータとして獲得し、実物体のデジタル3次元コピーを手軽に生成する技術の開発を目標としました。この研究を通じて、3次元形状と物体の質感を表現する反射率の同時推定技術が進展し、デジタル3次元化技術が進展しました。従来の3次元デジタル化のための撮影装置は大掛かりなものでしたが、それをコンパクトに実現する方法についても研究が進みました。これらの成果については、国際会議や国際論文誌にて広く発信しました。

## 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、人間の視覚機能の一部である3次元形状と反射率の認識に関わる機能が、計算機上に実現できるかを問い、またそれを通じて人間の視覚機能の計算可能性について理解するという学術的な意義があります。また、実物体を3次元デジタル化することには、デジタルツイン等における広い応用先があり、産業的、社会的に大きな意義があります。

研究成果の概要（英文）：The goal of this research was to develop a technology to easily generate a digital 3D copy of a real-world object by acquiring both the 3D shape and reflectances of a real-world object as digital data using a camera. Through this research, the technology for simultaneous estimation of 3D shape and reflectance was developed, and digital 3D digitization technology was advanced. While the conventional photographic equipment for 3D digitization is large in scale, this research has also progressed on how to realize it in a compact manner. These results were widely disseminated at international conferences and in international journals.

研究分野：コンピュータビジョン

キーワード：コンピュータビジョン 3次元形状推定 質感推定

### 1. 研究開始当初の背景

カメラを用いた実世界物体の三次元形状及び質感(反射率分布)の推定はコンピュータビジョンにおける重要な基盤技術であると共に、ロボットの制御、計算機による物体認識、車の自動走行、製品の品質検査など、幅広い応用が期待されている。物体の「見え」は入射光分布、物体の形状、そして反射率・透過率などの物体の光学的特性に依存する。これまでコンピュータビジョンにおける中心的な課題は三次元形状の獲得であったが、これらの手法の多くは単純化されたランバート拡散反射モデルを仮定しており、この仮定と実物体の反射特性との相違は直接的に形状推定誤差となっていた。さらに、これらの手法は三次元形状推定のみを主眼としており物体表面の双方向反射率分布関数(BRDF; Bidirectional Reflectance Distribution Function、以下簡単のため反射率分布関数)の推定は別の研究分野として扱われ、形状推定と反射率分布推定を同時に行うという試みはこれまでにほとんど行われていなかった。物体の「見え」は三次元形状と反射率分布により決定付けられる関数と見なせるため、三次元形状と反射率分布を推定する問題は同時推定問題として扱うべきであり、その実用的な解法を開発することでより高精度な三次元形状推定が期待できるばかりか、反射率分布関数の獲得が可能となり、コンピュータビジョンの応用可能性は大きく進展すると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、高精度な「質感+三次元」イメージング技術の確立を目的とする。三次元形状推定技術は長い歴史がある一方で、質感を表現する反射率分布関数の推定は、世界中でも比較的少数のグループによってのみしか研究が進められていない。また三次元形状推定と質感の推定は多くの研究において個別の問題として扱われてきたという現状がある。上述のとおり物体の「見え」は三次元形状と質感の関数で表現されるため、形状推定問題と質感推定問題は互いに依存関係にある。本研究ではこの依存関係に着目し、両者を同時推定問題として扱うことで質感と三次元形状の高精度な推定手法の開発を目指す。その実現のために、これまでに試みのない「データ駆動型」のアプローチを導入する。具体的には、「見え」から三次元形状と質感を推定する問題をマッピングの問題と捉え、このマッピングを確立するために大規模な反射率分布関数データセットを作成し、最適な形状と反射率分布関数のペア(具体的には物体各点における法線と、その点における反射率分布関数)を機械学習、あるいは最近傍探索によって獲得する。反射率分布関数データセットの規模は10万程度の材質を最終的には想定しており、これは計算シミュレーションによって獲得する。本提案のようなデータ駆動型アプローチによる質感や三次元形状推定手法は前例が無く、独自性は非常に高いと考えられる。このようなデータ駆動型アプローチは、近年のGPUや多コアCPUに代表される並列計算環境の深化が礎となるため、以前の計算環境では困難であったことがその一因と考えられる。これまでに少数ながら反射率と三次元形状の同時推定の手法が提案されてきたが、いずれも限定的な特定のパラメトリック反射モデルを仮定していたため仮定と現実の乖離による形状及び反射率の推定誤差が大きいという問題があった。本提案のデータ駆動型アプローチではノンパラメトリックな反射率分布関数を直接的に利用することにより、より高精度な三次元形状推定及び反射率分布関数の獲得が期待でき、仮想現実感やグラフィックス等のアプリケーションへの応用が広がると考えられる。

### 3. 研究の方法

本研究課題では、上述の背景を踏まえて高精度な「質感+三次元」イメージング技術を確立すべく理論構築と実証実験を行い、開発した技術の適用可能な範囲を明らかにする。具体的な研究項目は以下の三項目である。

(A) **大規模反射率分布関数データセットの構築と解析**: 多様な質感を網羅するために大規模な反射率分布関数のデータセットを構築する。具体的には、物理的に正しい画像合成を行うための物理ベースのレンダリングツールPBRT (Physics-based Ray Tracer)等を用いて、あらゆる光学的パラメータ(鏡面反射率、拡散反射率等)におけるシーンの「見え」を生成し、各々のパラメータにおいて得られるノンパラメトリックな反射率分布関数をルックアップテーブル(lookup table)の形式で生成する(図2)。さらに、こうして得られた大量のルックアップテーブルに対して、高階特異値分解(HOSVD; Higher Order Singular Value Decomposition)による線形な部分空間解析や深層学習で用いられるオートエンコーダ(Auto-Encoder)による非線形な圧縮を試み、多様な反射率分布関数を表現しうるコンパクトな表現(基底)を探索する。また、作成したデータセットは広く一般に公開する。

(B) **データ駆動型アプローチによる「質感+三次元形状」推定手法の開発**: 項目(A)で作成した反射率分布関数データセットを用いて、これまでの最適化によるパラメータ推定のアプローチとは異なる「データ駆動型アプローチ」による反射率分布関数と三次元形状の同時推定手法を開発する。この新しいデータ駆動型アプローチにより、これまでに困難であった多様で未知の反射パラメータを持つ物体の三次元形状推定とその反射率分布の獲得が可能となる。具体的には、以下の二つの手法を検討している。一つは機械学習(深層学習)を用いて、異なる光源下で撮影さ

れた複数枚の入力画像列から各ピクセルにおける反射率分布関数と法線へのマッピングを確立する方法である。これまでに研究代表者らの予備的な実験において、入力画像列から法線へのマッピングは安定に確立できることがわかっており、これを拡張することで反射率分布関数も同時に推定することを目指す。二つめの手法は、反射率分布関数と三次元形状の同時推定問題を、項目(A)で作成した大量のルックアップテーブルを利用した「探索問題」と位置付ける手法である。入力画像列を最もよく説明する反射率分布関数と形状(法線)を最近傍探索により発見することで、この同時推定問題の解を得る。この手法では、探索効率が問題となるが、数理的な予備検討では大部分の演算を事前計算しておくことが可能であることがわかっており、実用的な手法が開発できると確信している。

(C) **実世界物体の「質感+三次元」イメージングの展開**:作成した反射率分布関数データセットと、反射率分布関数と三次元形状の同時推定手法を用いて、実世界物体を対象とした高精度な「質感+三次元」イメージング技術を多方面で展開する。また、研究で開発する先進的なアルゴリズムとその実装であるソフトウェアの整備、及びガイドラインの作成を進め、広く利用される技術としての土台を作る。

#### 4. 研究成果

2019年度には、項目(A)の双方向反射率分布関数(BRDF)データセットの構築を行った。DisneyのPrincipled BSDF及びMERL BRDF datasetを利用して、多様なパラメータの組み合わせにおけるBRDFを計算機により生成し、入射光方向、法線方向、及びマテリアルの三軸で構成されるテンソル型のルックアップテーブルを生成するとともに、その低ランク性を数値計算により確認した。大規模なルックアップテーブルを生成するために、計算サーバとストレージを導入し効率的に計画をすすめることができた。また、生成したルックアップテーブルを利用して、異なる光源下で観察されたシーンの画像列から法線とBRDFを同時推定する枠組みについて検討を進めた。この事前検討により、法線とBRDFの推定問題が探索問題として定式化できることがわかり、その効率的な解法について検討を進めた。また、その近似計算手法として深層学習を利用した法線とBRDFの同時推定問題にも着手し、事前検討によると効率的にこれらを推定することができるとわかってきた。さらに、項目(B)の実世界物体の質感+三次元イメージングの実用化を見据えたイメージングセットアップに関する事前検討を進めた。この事前検討により二眼カメラと一つの点光源を用いた簡便なセットアップの実現可能性が見えてきた。

2020年度には、項目(B)における(1)実用的な三次元イメージングセットアップと(2)機械学習による法線とBRDFの同時推定の2つの小項目に注力した。小項目(1)に関しては、高精細な三次元形状を得るための最小限のイメージングセットアップを検討し、二眼ステレオカメラと単一のLEDのみによる撮像系でこれを実現する方式について実装と検証を進めた。実装した試作機での実験では、自然な環境光下でも提案する撮像系によって高精細な三次元形状の復元が可能であることが確認できた。項目(2)に関しては、当該グループで開発した深層学習を用いた照度差ステレオ法技術(Deep photometric stereo networks)をさらに発展させ、法線のみでなくBRDFを同時推定する深層学習器を設計した。実世界の被写体を用いた実験により、その有効性が確認できた。また、小項目(3)として、2019年度に作成したBRDFデータベースを用いて、大規模なルックアップテーブルを用い、法線を離散化するアイデアを導入することで、探索に基づく照度差ステレオ法を設計し、その効果について検証を行った。さらに小項目(4)として、深層学習に基づく照度差ステレオ法で具体的に「何」が学習されているのかについて実験的な解析を進め、定性的な解釈を得た。以上のように、研究実施計画は予定通り進行していると同時に、当初想定していなかった小項目(4)に関する結果も得られた。

2021年度には、項目(C)の実世界物体を対象とした「質感+三次元」イメージングの展開、項目(B)の簡易なイメージングセットアップによる三次元計測技術、及び、360度ステレオカメラを用いた室内の三次元形状、反射率、光源の同時推定、さらに得られた法線から面としての三次元形状(メッシュなど)を復元するための法線の積分について検討を進めた。項目(C)では、開発した深層学習をベースとした法線+質感推定技術を多様な実物体に適用し、その有効性を確認した。項目(B)では、スマートフォンを用いた簡易なイメージングセットアップについて検証し、屋内・屋外シーンにおける提案手法の三次元計測の有効性を確認した。また、360度カメラ2台を用いたステレオヘッドを作成し、室内の三次元形状、反射率、光源の推定を行う深層学習器を提案した。さらに幾何学的なアプローチに基づく法線積分手法を開発し、既存の手法に比べて高精度に三次元形状の復元が可能である手法を開発した。

2022年度には、項目(B)内の小項目(1)実世界物体を対象とした「質感+三次元」イメージングの展開、小項目(2)簡易なイメージングセットアップによる三次元計測技術、及び、小項目(3)獲得した法線から面としての三次元形状(メッシュなど)を復元するための法線積分について検討を進めた。小項目(1)では、多波長照度差ステレオ及び未校正照度差ステレオ法に関する研究を

進め、より実用的な質感+三次元推定技術の開発を行った。小項目(2)では、スマートフォン上のカメラと LED を利用した簡易なイメージングセットアップによる三次元復元技術を開発し、屋内・屋外シーンにおける提案手法の有効性を確認した。小項目(3)では、新たに双方向(bilateral)的な法線積分法を開発し、既存手法に比して高精度に三次元形状の復元が可能となることを示した。

以上の結果は、コンピュータビジョン分野におけるトップジャーナルである IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)に5件、International Journal of Computer Vision (IJCV)に3件の論文を、また、トップ国際会議である IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)に6件、European Conference on Computer Vision (ECCV)に3件を含む、計19件の国際論文として発表することができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 8件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Xu Cao, Michael Waechter, Boxin Shi, Ye Gao, Bo Zheng, Fumio Okura, Yasuyuki Matsushita	4. 巻 130
2. 論文標題 Shape and Albedo Recovery by Your Phone using Stereoscopic Flash and No-Flash Photography	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Computer Vision (IJCV)	6. 最初と最後の頁 1403 ~ 1415
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11263-022-01597-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Heng Guo, Fumio Okura, Boxin Shi, Takuya Funatomi, Yasuhiro Mukaigawa, and Yasuyuki Matsushita	4. 巻 130
2. 論文標題 Multispectral Photometric Stereo for Spatially-Varying Spectral Reflectances	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Computer Vision (IJCV)	6. 最初と最後の頁 2166-2183
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11263-022-01634-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Heng Guo, Zhipeng Mo, Boxin Shi, Feng Lu, Sai-Kit Yeung, Ping Tan, and Yasuyuki Matsushita	4. 巻 44
2. 論文標題 Patch-Based Uncalibrated Photometric Stereo Under Natural Illumination	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)	6. 最初と最後の頁 7809-7823
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPAMI.2021.3115229	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Santo Hiroaki, Samejima Masaki, Sugano Yusuke, Shi Boxin, Matsushita Yasuyuki	4. 巻 44
2. 論文標題 Deep Photometric Stereo Networks for Determining Surface Normal and Reflectances	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)	6. 最初と最後の頁 114 ~ 128
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPAMI.2020.3005219	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Chen Guanying, Han Kai, Shi Boxin, Matsushita Yasuyuki, Wong Kwan-Yee K.	4. 巻 44
2. 論文標題 Deep Photometric Stereo for Non-Lambertian Surfaces	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)	6. 最初と最後の頁 129 ~ 142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPAMI.2020.3005397	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Santo Hiroaki, Samejima Masaki, Sugano Yusuke, Shi Boxin, Matsushita Yasuyuki	4. 巻 7
2. 論文標題 Deep Photometric Stereo Networks for Determining Surface Normal and Reflectances	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)	6. 最初と最後の頁 1 ~ 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPAMI.2020.3005219	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hiroaki Santo, Michael Waechter, Wen-Yan Lin, Yusuke Sugano, Yasuyuki Matsushita	4. 巻 -
2. 論文標題 Light structure from pin motion: Geometric point light source calibration	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Computer Vision (IJCV)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11263-020-01312-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Enomoto Kenji, Waechter Michael, Okura Fumio, Kutulakos Kiriakos N., Matsushita Yasuyuki	4. 巻 45 (4)
2. 論文標題 Discrete Search Photometric Stereo for Fast and Accurate Shape Estimation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)	6. 最初と最後の頁 4355-4367
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPAMI.2022.3198729	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 Xu Cao, Boxin Shi, Fumio Okura, Yasuyuki Matsushita
2. 発表標題 Normal Integration via Inverse Plane Fitting With Minimum Point-to-Plane Distance
3. 学会等名 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Junxuan Li, Hongdong Li, Yasuyuki Matsushita
2. 発表標題 Lighting, Reflectance and Geometry Estimation From 360deg Panoramic Stereo
3. 学会等名 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuma Minami, Hiroaki Santo, Fumio Okura, Yasuyuki Matsushita
2. 発表標題 Symmetric-light Photometric Stereo
3. 学会等名 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Lilika Makabe, Hiroaki Santo, Fumio Okura, Yasuyuki Matsushita
2. 発表標題 Shape-coded ArUco: Fiducial Marker for Bridging 2D and 3D Modalities
3. 学会等名 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Guanying Chen, Michael Waechter, Boxin Shi, Kwan-Yee Kenneth Wong, Yasuyuki Matsushita
2. 発表標題 What is Learned in Deep Uncalibrated Photometric Stereo?
3. 学会等名 European Conference on Computer Vision (ECCV) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroaki Santo, Michael Waechter, Yasuyuki Matsushita
2. 発表標題 Deep near-light photometric stereo for spatially varying reflectances
3. 学会等名 European Conference on Computer Vision (ECCV) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Xu Cao, Michael Waechter, Boxin Shi, Ye Gao, Bo Zheng, Yasuyuki Matsushita
2. 発表標題 Stereoscopic Flash and No-Flash Photography for Shape and Albedo Recovery
3. 学会等名 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenji Enomoto, Michael Waechter, Kiriakos N. Kutulakos, Yasuyuki Matsushita
2. 発表標題 Photometric Stereo via Discrete Hypothesis-and-Test Search
3. 学会等名 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (国際学会)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 Heng Guo, Fumio Okura, Boxin Shi, Takuya Funatomi, Yasuhiro Mukaigawa, Yasuyuki Matsushita
2. 発表標題 Multispectral Photometric Stereo for Spatially-Varying Spectral Reflectances: A Well Posed Problem?
3. 学会等名 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Xu Cao, Hiroaki Santo, Boxin Shi, Fumio Okura, Yasuyuki Matsushita
2. 発表標題 Bilateral Normal Integration
3. 学会等名 European Conference on Computer Vision (ECCV) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Xu Cao, Hiroaki Santo, Fumio Okura, Yasuyuki Matsushita
2. 発表標題 Multi-View Azimuth Stereo via Tangent Space Consistency
3. 学会等名 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------