

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：14603

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26540085

研究課題名(和文) 8次元光伝播からの幾何・光学情報の抽出

研究課題名(英文) Extraction of Geometric and Photometric information from 8-D Light Transport

研究代表者

向川 康博 (Mukaigawa, Yasuhiro)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：60294435

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)：本研究の目的は、4次元光線空間の照明と4次元の光線空間の記録からなる8次元の光伝播を対象とし、表面下散乱や体積散乱などの光学現象から幾何・光学情報を解析することである。4次元光線空間の照明については、効率的な校正法と、奥行きごとに異なるパターンを投影できる照明システムを開発した。また、4次元光線空間の記録については、光線空間カメラを用いて光線の位置と方向に関する滑らかさを拘束とした領域分割法を明らかにした。さらに、研究実施中に急速に普及しはじめたToFカメラを用いて、時間軸方向の新たな次元を加えた光伝播の時間的な解析にも取り組み、光伝播の時間的な遅れから材質を推定するなどの成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：This research aims to analyze geometric and photometric properties of subsurface scattering and volume scattering from 8-D light transport which consists of 4-D light field illumination and 4-D light field recording. For the illumination, we have developed an effective calibration method and a new illumination system which simultaneously projects different patterns onto different depths. For recording, a light field camera is used and the measured 4-D light field is analyzed by a new segmentation method which introduces spatial and angular smoothness as a constraint. Moreover, we have tried temporal analysis of light transport with a new temporal dimension using a ToF camera which becomes common during the research period and we have confirmed that material can be estimated from the time delay of light transport.

研究分野：コンピュータビジョン

キーワード：光伝播 光線空間 プロジェクタ・カメラシステム 反射屈折光学系 ToFカメラ

### 1. 研究開始当初の背景

コンピュータビジョン分野において、8次元の光伝播を計測・解析することが、シーン中の光学現象を理解するために有効であることは古くから知られている。それに関わらず、そのような研究例が見当たらないのは、多次元であるがゆえに取り扱いが難しく、解析はおろか、そもそも計測すらできないことが主な原因である。そのため、国内外の多くの研究は、4次元(反射特性のみ)や6次元(均一な照明分布)などの縮退した光伝播を扱ってきた。

応募者は、2009年度より挑戦的萌芽研究「多面体ミラーを用いた8次元光線空間の記録」を開始し、楕円体に内接する多面体鏡にプロジェクタ・カメラを組み合わせた独自の光学デバイスを開発し、8次元光伝播の計測に成功した。実際に、様々な物体の光伝播を計測してみて、表面の微細形状や材質だけではなく、外からは直接見ることのできない内部の不均一性や不純物の位置によっても8次元光伝播が大きく変化することに気づいた。すなわち、8次元光伝播にはシーンに関する幾何的・光学的特徴が豊富に含まれているのである。手元に8次元光伝播を計測できるデバイスがあり、それを解析するための豊富なアイデアがあることが、この新しい試みに挑戦しようとする背景である。

### 2. 研究の目的

光源から発せられた光がシーン中で反射・屈折・散乱等を繰り返す、複雑に伝播していく様子は、8次元光伝播として表現できることが知られている。しかし、このデータは次元数が高いために取り扱いが難しく、これまでほとんど解析の対象とはなっていなかった。本研究では、8次元光伝播にはシーンに関する幾何的・光学的特徴が豊富に含まれていることに着目し、これらの情報を抽出することでシーンを解析しようという新しい試みに挑戦する。

これまでの解析法の多くが縮退してしまった低次元の情報源からシーン解析しようと苦労していたのに対して、本研究は光伝播を記録した高次元データを直接解析の対象として、これまでの問題を解決しようという独創的なアイデアの提案である。

### 3. 研究の方法

本研究課題では、8次元光伝播に潜在的に含まれるシーンの光学情報と幾何情報をどのようにして抽出するのかという挑戦的な問題に取り組む。この問題を解決するために、計測と解析という観点で整理し、以下の3つのサブテーマに分けて研究開発を進める。

(1) 8次元光伝播の効率的なサンプリング

(2) 8次元光伝播の分解

(3) 8次元光伝播の低次元断面

各テーマの研究方法については以下の通りである。

#### (1) 8次元光伝播の効率的なサンプリング

前述の通り、8次元光伝播はそのまま計測すると、計測時間とデータ量が膨大になることから、完全なサンプリングは事実上不可能である。しかし、8次元光伝播は冗長なデータであり、無計画なサンプリングを回避することで、サンプリングを効率化できる。そこで、本サブテーマをさらに以下に述べる2つに分け、8次元光伝播を効率的にサンプリングするための方法を明らかにする。

##### (1-a) 重点サンプリングによる効率化

ある入射光に対する出射光の範囲は限られており、出射光が存在しない角度はサンプリングの必要はない。また、内部状態によっては、入射光の僅かな変化に対して、出射光がほとんど変化しない場合がある。このような場合に、無計画にすべての角度をサンプリングするのは無駄である。そこで、出射光の範囲を予想し、出射光の存在する範囲を重点的にサンプリングする手法を明らかにする。

##### (1-b) 圧縮センシングによる効率化

近年の圧縮センシング技術の進化により、多くの光学現象は適切に直交変換することで粗な情報になり、サンプリングのための時間やデータサイズを極端に減少できることが知られている。そこで、8次元光伝播についても、入射光と出射光の関係は適切な周波数空間において粗であると仮定できることから、どのように周波数空間に変換すれば、効率的に圧縮センシングできるかを明らかにする。

#### (2) 8次元光伝播の分解

8次元光伝播を効率的にサンプリングできたとしても、そのままでは解析が難しい。そこで、複雑な光伝播を、その幾何的・光学的性質の違いに基づいて成分分解することで、高次元データの解析を容易にする方法を明らかにする。従来より、例えば反射光の解析では、まず観測値を拡散反射成分と鏡面反射成分に分解することから始められる。これは、物理現象の異なる成分が混在していると、解析が煩雑になるからである。同様の前処理は、8次元光伝播にも有効である。例えば、観測される表面下散乱を観測方向に依存する成分と依存しない成分に分けることで、それらを別々に取り扱うことが可能となる。このような分解によって、高次元データの取り扱いを容易にし、8次元光伝播からの幾何・光学情報の抽出につなげる。

#### (3) 8次元光伝播の低次元断面

8次元の光伝播に含まれるシーンの幾何・光学情報を抽出することで、シーン理解を実現するための新しい手法を開発する。高次元のままでは取り扱いが難しいため、新たに低次元断面の可視化技術を開発する。8次元のデータは、いくつかの次元を無視すれば

低次元断面に縮退できるが、これでは必要な情報も失われてしまう。主成分分析によって重要な情報のみを残して不要な軸を縮退させる方法も考えられる。しかし、この低次元化は、平面である必要はなく、また連続している必要もない。そこで、断面と縮退を組み合わせ、さらに必要な情報を網羅しつつ、不要な高次元情報は見せない新しい切り方の低次元断面としての高次元情報の可視化技術を確立する。これにより、重要な幾何・光学情報を効率良く抽出し、対象シーンの幾何特性や光学特性を推定することを目指す。

#### 4. 研究成果

初年度は、8次元光伝播の効率的なサンプリング方法について研究を行った。本研究では、研究代表者が2009年～2011年にかけて行った科研費挑戦的萌芽研究「多面体ミラーを用いた8次元光線空間の記録」で開発した多面体ミラーを再利用して8次元光線空間を記録することを想定していた。しかし、この多面体ミラーは、対象物体を取り巻く半球面上を通過する光線をできるだけ等しい密度で網羅的にサンプリングすることを目的に設計されているため、情報の重要度に合わせて効率的にサンプリングすることができなかった。

そのため、どのようにカメラと平面鏡を組み合わせれば、任意の位置に仮想カメラを配置できるかについて解析し、最適な平面鏡の配置について検討を行った。具体的には、様々な位置と角度に平面鏡を配置した場合に生成できる仮想カメラの位置・角度の組み合わせを調査した。その結果、1台のカメラと1枚の平面鏡の組み合わせで実現できる仮想カメラの方向と位置に関する幾何学的な制約を明らかにした。

これにより、例えば物体表面での反射光は正反射方向にピークが来るように、重要な情報が含まれている方向に重点的に仮想カメラを配置することが可能となる。逆に、多重散乱のように、入射光の角度の変化に対して、出射光の分布がほとんど変化しないような場合など、さほど重要でない方向には少数の仮想カメラしか配置しないなど、情報の重要度に合わせて効率的にサンプリングすることが可能となった。

初年度は、8次元光伝播の効率的なサンプリングを実現することを目的としていた。研究計画の時点では、(a)重点サンプリングによる効率化と、(b)圧縮センシングによる効率化の2通りを検討していた。検討を進めた結果、(a)は平面鏡の配置を変えることで用意に実現可能であること、一方で、(b)は対象とする光学現象に強く依存し一般化が難しいことが明らかとなった。そこで、主に(a)に注力し、平面鏡を用いた仮想カメラの配置方法を明らかにし、当初の目標を概ね達成した。

2年目においては、4次元の光線を発生さ

せて4次元の光線として記録できる基本的な枠組みを明らかとした初年度の成果を踏まえて、特に4次元の光線を発生させるプロジェクタ側と、4次元の光線を記録するカメラ側に分け、それぞれについて具体的な応用を定めて、技術的な可能性を探求した。まず、4次元光線の発生については複数のプロジェクタを同時に用いて、異なる軌行に異なるパターンを投影できるシステムを構築した。具体的には、数値計算で求められた4次元光線空間をできるだけ忠実に再現するために、各プロジェクタから投影される2次元パターンの最適化手法を明らかにした。一方、4次元光線の記録については、光線空間カメラを用いて4次元的に光線の領域分割を行うアルゴリズムを新たに開発した。具体的には、機械学習と、隣接する光線の類似性に基づいたエネルギー最小化問題として解く手法を明らかにした。これらの成果は、光伝播という高次元データからシーンの幾何学的・光学的情報を抽出し、シーンを理解するための重要な基礎技術となる。

最終年度は、高次元の光伝播から潜在的な情報を抽出することで、シーンの幾何学的・光学的情報を推定し、シーンを高度に理解できる手法を確立し、本研究課題の最終目標を達成する。特に、本研究課題を申請した2013年秋には、光の飛行時間から距離を計測するTime of Flightカメラは一般的ではなかったが、近年では、光伝播解析に利用できるようになってきた。光が伝播する光路長を直接計測できれば、複雑な光伝播の解析に大きく役立つ。そこで、解析のための道具として新たにTime of Flightカメラも加えて、本研究課題を遂行した。

まず、4次元光線空間の照明については、少ない計測から光線強度を校正する解法を明らかにした。さらに、照明が2次元ではなく4次元である利点を活かして、軌行きごとに異なるパターンを投影できる照明システムの完成度を高めた。また、4次元の光線空間の記録については、光線空間カメラを用いて光線の位置と方向に関する滑らかさを拘束とした領域分割法を明らかにした。さらに、研究実施中に急速に普及しはじめたToFカメラを利用した光伝播解析に新たに取り組んだ。その結果、時間軸方向の光伝播の解析が可能となり、ToFカメラを用いて透明物体の3次元形状を推定したり、ToFカメラで計測した距離情報の歪みから材質を推定するなど、当初の予想をはるかに超える研究成果が得られた。

#### 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6件)

T. Aoto, T. Sato, Y. Mukaigawa, N. Yokoya, "4-D Light Field Reconstruction by

Irradiance Decomposition", IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, 2017 (9:13), DOI: 10.1186/s41074-016-0014-z, Apr.2017. 査読有り .

K. Tanaka, Y. Mukaigawa, H. Kubo, Y. Matsushita, Y. Yagi, "Recovering Inner Slices of Layered Translucent Objects by Multi-frequency Illumination", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.39, No.4, DOI: 10.1109/TPAMI.2016.2631625, pp.746-757, Apr.2017. 査読有り .

T. Iwaguchi, T. Funatomi, H. Kubo, Y. Mukaigawa, "Light Path Alignment for Computed Tomography of Scattering Material", IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, DOI: 10.1186/s41074-016-0003-2, Aug. 2016. 査読有り .

石原葵, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博, "多重スクリーンへの個別情報提示のための輝度勾配を考慮した4次元光線空間の生成", 画像電子学会誌 ビジュアルコンピューティング論文特集号, Vol.45, No.3, pp.287-295, <http://ci.nii.ac.jp/naid/40020962017>, July 2016. 査読有り .

B. Yuan, T. Tamaki, T. Kushida, Y. Mukaigawa, H. Kubo, B. Raytchev, K. Kaneda, "Optical tomography with discretized path integral", Journal of Medical Imaging, DOI:10.1117/1.JMI.2.3.033501, July 2015. 査読有り .

青砥隆仁, 佐藤智和, 向川康博, 武富貴史, 横矢直和, "中空透明球体を用いた近接点光源の位置推定", 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J98-D, No.3, pp.534-545, <http://ci.nii.ac.jp/naid/120005867223>, Mar. 2015. 査読有り .

〔学会発表〕(計5件)

K. Tanaka, Y. Mukaigawa, T. Funatomi, H. Kubo, Y. Matsushita, Y. Yagi, "Material Classification using Frequency and Depth Dependent Time-of-Flight Distortion", Proc. CVPR2017, July 2017. Hawaii, USA.

K. Tanaka, Y. Mukaigawa, H. Kubo, Y. Matsushita, Y. Yagi, "Recovering Transparent Shape from Time-of-Flight Distortion", Proc. CVPR2016, June 2016. Las Vegas, USA.

H. Mihara, T. Funatomi, K. Tanaka, H.

Kubo, H. Nagahara, Y. Mukaigawa, "4D Light-field Segmentation with Spatial and Angular Consistencies", Proc, ICCP2016, May 2016. Evanston, USA.

K. Tanaka, Y. Mukaigawa, H. Kubo, Y. Matsushita, Y. Yagi, "Recovering Inner Slices of Translucent Objects by Multi-frequency Illumination", Proc. CVPR2015, June 2015. Boston, USA.

B. Yuan, T. Tamaki, T. Kushida, B. Raytchev, K. Kaneda, Y. Mukaigawa, H. Kubo, "Layered optical tomography of multiple scattering media with combined constraint optimization", The 21st Korea-Japan joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV2015), Jan. 2015. Mokpo, Korea.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

向川 康博 (MUKAIGAWA, Yasuhiro)  
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授  
研究者番号：60294435

### (2) 研究分担者

松下 康之 (MATSUSHITA, Yasuyuki)  
大阪大学・情報科学研究科・教授  
研究者番号：30756507