

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：14603

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2017

課題番号：26700013

研究課題名(和文)幾何形状と反射特性の同時計測のための光線場再構成

研究課題名(英文)Light field reconstruction for estimating shape and BRDF

研究代表者

船富 卓哉 (Funatomi, Takuya)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：20452310

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、物体を取り巻く媒体中における散乱現象を利用することで、光の空間分布を観測し、その幾何形状と反射特性を同時に計測することを目的とする。ビームを入射し、物体表面で反射した光が媒体中で散乱した様子を周囲から観測し、トモグラフィ法を適用することで光線場を計算する。しかし、光の散乱は一般に等方でなく、光の入射方向を基準とした角度によって異なる強度で光を散乱する。そのため、媒体の散乱特性を計測し、また散乱の異方性を考慮したトモグラフィ法を適用することによって、観測画像列からの反射位置と反射特性の推定を実現した。

研究成果の概要(英文)：We aim to simultaneously estimate object's shape and BRDF by reconstructing light field of incident and reflected rays from scattered light in participating media. As well as X-ray computed tomography, we observed the scattered light by moving a camera around the subject. However, different from X-ray CT, it is required to care about the anisotropy of the scattering in tomography. Thus, we have developed methods to measure a phase function of the scattering media, appropriate optical density where single scattering is dominant, and reconstruct the light field from the observation where the scattering is anisotropy to simultaneously estimate the shape and BRDF of the subject.

研究分野：コンピュータビジョン

キーワード：計測工学 コンピュータビジョン 反射特性解析

1. 研究開始当初の背景

代表者は以前、物体に照射した光線が物体表面に到達するまでの様子を観測できるようになる散乱現象(図1)を利用することで、どのような表面特性を持つ物体に対してもその幾何形状を計測する手法を開発した。物体にレーザー光を照射し、散乱現象下で観測した画像から物体表面位置を推定することで、これまでは計測が困難であった黒色物体や金属物体を含め、さまざまな物体に対して幾何形状を計測できることを実証した。また、物体の反射モデル(Cook-Torranceモデル)と光の散乱モデルを基にシミュレーションを繰り返して観測画像を再現し、反射特性のパラメータを推定した[文献1]。この手法では計測物体の反射特性とシミュレーションに用いた反射モデルが一致している必要があるが、実世界にはこの仮定を満たさない物体も多く、まだまだ不十分であった。

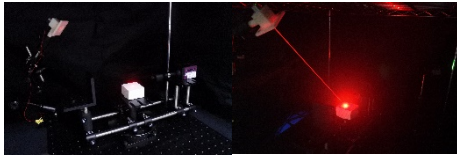


図1: 散乱を介した光線場の観測

2. 研究の目的

本研究課題では、物体を取り巻く媒体中における散乱現象を利用することで、光の空間分布を観測し、どのような表面特性を持つ物体に対してもその幾何形状と反射特性を同時に計測することを目的とする。幾何形状については、観測画像から入射光を検出することで獲得できることを既に示している。本研究課題ではこれを基に、媒体中における反射光の空間分布(光線場)を再構成することで、物体の反射特性も推定する。

[文献1]ではCGでよく用いられている反射モデルを仮定していたが、本計画ではより一般的な反射特性であるBRDF(双方向反射率分布関数)の獲得を目指す。BRDFは、物体表面上の点 x における入射方向 ω_i からの光強度 $L_i(\omega_i)$ に対する、反射方向 ω_r への光強度 $L_o(\omega_r)$ の比として定義される(図2)。本研究では、点 x へ入射方向 ω_i からレーザー光を照射したときの、反射光強度 $L_o(\omega_r)$ の空間分布(光線場)を散乱光観測画像から獲得する。

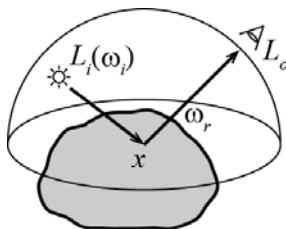


図2: BRDF(双方向反射率分布関数)

3. 研究の方法

BRDFを得るためには、物体を取り巻く媒

体中における、三次元空間中での反射光の光線場が必要である。しかし、カメラを使って観測される画像は、媒体中で散乱された光を二次元平面に射影し、積算したものとなる。そのため、観測画像から光線場を計算する逆問題を解かなければならない。この問題は、X線CTスキャンで断層像を獲得する問題と類似しており、様々な方向から大量に観測し、トモグラフィ法を適用することで獲得できると考えられる。しかし、本課題で扱う散乱光とX線では性質が異なるため、検討すべき事項がある。

X線の透過と異なり、光の散乱は一般に等方でなく、光の入射方向を基準とした角度によって異なる強度で光を散乱する。これは媒質に固有なもので、散乱位相関数と呼ばれる。また、散乱する光の割合は散乱媒体の濃度にも依存する。十分に薄い場合には単一散乱と呼ばれ濃度に比例するが、一定の濃度を超えると多重散乱が起こり、現象が複雑になってくる。散乱媒体として気体(煙)を使った場合、濃度が時間とともに変化するため、散乱の特性も変化する。一方、散乱媒体として液体(洗剤や牛乳を添加した水など)を用いた場合、濃度の時間変化は無視できるが、媒質の界面において屈折や反射が起こり、この影響を無視できない。また、液体を用いると、計測可能な物体が限定され、実用性に欠けるという問題もある。

そのため本研究では、まず液体を用いて光線場獲得の手法を確立し、その後で気体を用いても適用できるよう手法を拡張する。観測対象となる光線場は物体表面への入射光、反射点からの反射光のみであることを制約として利用し、光線場の推定精度を向上する。

具体的には以下の項目に取り組む。

- (1) 散乱媒体の散乱位相関数の計測ならびに単一散乱とみなせる濃度の特定
- (2) 主に液体を対象とした、界面において光路が変化する場合のトモグラフィ法の開発
- (3) 散乱異方性を考慮したトモグラフィ法によるBRDF推定

4. 研究成果

研究の主な成果:

- (1) 散乱媒体の散乱位相関数の計測ならびに単一散乱とみなせる濃度の特定

散乱光から散乱媒体中の光線場を推定するためには、まず散乱媒体の性質を求めておく必要がある。その中でも特に散乱位相関数は、媒体中の光線場とカメラで観測される光の強度との関係を記述する上で非常に重要となる。従来、散乱位相関数はHeney-Greenstein関数[文献2]によってモデル化されることが多かったが、実際の散乱をモデル化するには適していないという指摘も近年なされている[文献3]。そこで、散乱の様子をカメラによって観測し、その散乱位相関数をノンパラメトリックに取得する手法を開発した。具体的には、媒体中では単一散乱しか起こらないこと、

及び、前方に対する散乱が支配的であることを仮定し、媒体に入射したビームに正対した拡散板上で観測される光の強度分布と散乱位相関数との間の関係を定式化した(図3). 実際いくつかの媒体で散乱位相関数を推定し、実験を通して有効性を確認した.

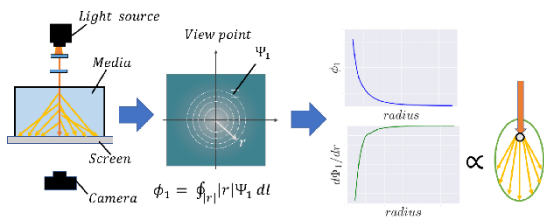


図 3: 散乱位相関数の計測

また、本課題だけでなく、散乱を利用した多くの研究では、単一散乱を仮定している。これは散乱が複数回起こるとその観測結果の解析が複雑になってしまうためであるが、単一散乱の仮定が成り立つためには、散乱体が一定以下の濃度でなければならない。十分に薄ければ単一散乱を仮定することができるが、薄すぎる場合には散乱光の強度が微弱になり、ノイズの影響を大きく受けてしまうことになる。そのため、単一散乱を仮定できる範囲で、できるだけ濃い散乱体で実験できることが理想的である(図4). 単一散乱が支配的であると仮定できる時には Lambert-Beer の法則が成り立つことが知られているため、さまざまな濃度での散乱光強度の変化を解析し、Lambert-Beer の法則が成り立つ範囲、つまり単一散乱が支配的であると仮定できる濃度の範囲を明らかにする手法を提案した。また実験を通して、いくつかの散乱媒体に対して単一散乱が仮定できる適切な濃度を明らかにした。

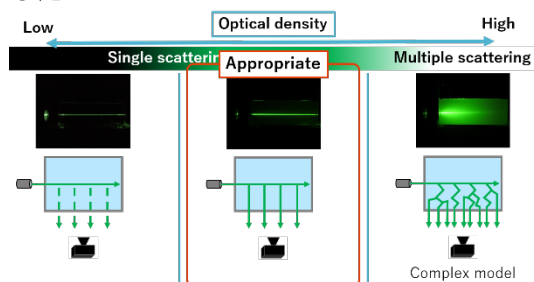


図 4: 単一散乱の観測に適した濃度

以上の取り組みを通して、光線場を計測するために必要となる散乱媒体の特性の計測を実現した。

(2) 主に液体を対象とした、界面において光路が変化する場合のトモグラフィ法の開発

洗剤や牛乳を添加した水など、液体を散乱媒体とした場合、煙などの気体に比べ、散乱の特性が時間的に安定していると考えられる。しかし、光源やカメラを媒体内ではなく空气中に設置した場合、液体と空気の間において、反射や屈折など、光路に変化が起きる。そのため、カメラ画像から媒体中の光線場を復元しようとした場合、この光路の変化を考慮しなければならない。このような光路の変

化を考慮したトモグラフィ法として、本研究では、媒体内での光路に基づいて光線を再配置し(図5: Light path alignment), 断層像を推定する手法を提案した。この手法は本研究で想定する屈折だけでなく、例えば物体表面付近では拡散するが、内部では直進性が仮定できるような物体を対象とした、内部構造推定などに利用できると考え、果実内部での近赤外光を用いた糖度分布推定への応用も検討した。

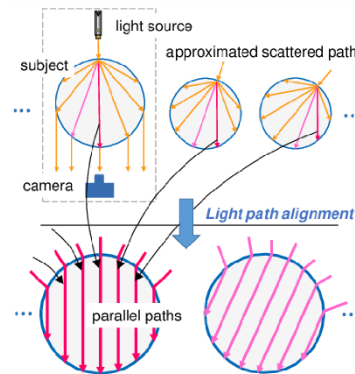


図 5: 光路の変化を考慮したトモグラフィ

(3) 散乱異方性を考慮したトモグラフィ法による BRDF 推定

一般に、X線CTにおいては、X線の透過強度の変化から吸光度を推定するが、この吸光度はX線を照射する方向に依らず一定であると想定される。これに対し本課題で扱う光線場推定では、散乱の異方性により、同じ強度の光線による散乱光であったとしても、観測する方向によってその強度が異なる。この変化は(1)で推定した散乱位相関数によって規定される。そのため、カメラによって観測される光の強度は、(2)で提案した Light path alignment によって求められる観測の方向と媒体中を飛び交う光線の向きで定まる角度から求まる散乱位相関数の値によって変化すると定式化される(図6).

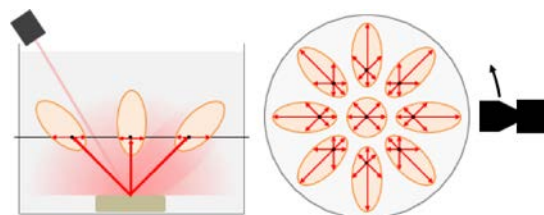


図 6: 散乱異方性を考慮した観測モデル

シミュレーションによって、散乱位相関数の違いによってカメラで観測される光の強度がどう変わるかを確認したものを図7に示す。等方性を仮定した上段が従来のトモグラフィ法に対応し、下段の異方性を仮定したものが本研究で対象とする散乱光に対応する。

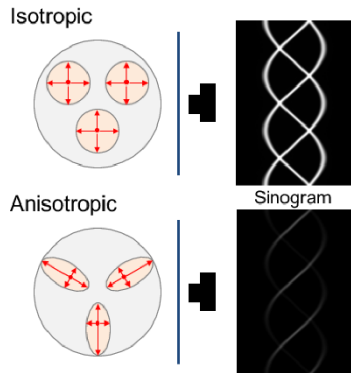
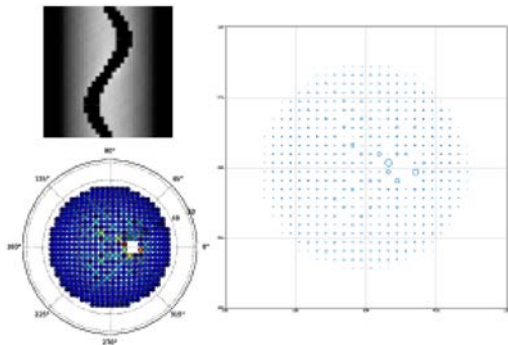


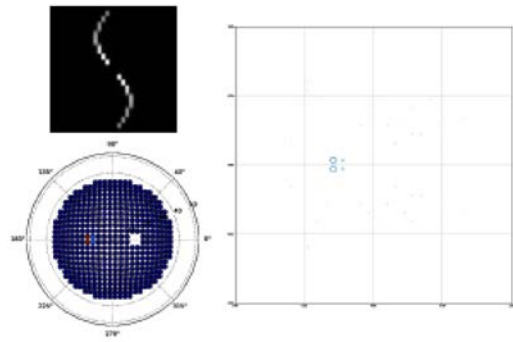
図 7: 散乱の異方性による観測画像の変化

従来のトモグラフィ法が 3 次元空間中の各点における吸光度を表す 3 変数関数を推定する問題であったのに対し、本研究では光線の方向も考慮に入れる必要があることから、光線が通過する 3 次元空間中の位置とその向きを表す、5 変数関数を推定する問題となる。そのため、従来通り、対象の周囲から観測した 2 次元画像列を入力としても制約が不足し、推定が不安定となる。仮に媒体中での光線強度の減衰が微弱であり無視できるとしても、4 変数関数にしかならず不十分である。この問題に対し、媒体中に入射するビームは 1 本であり、計測対象物体の表面 1 点で反射するのみで表面下散乱などが起こらない、と仮定することにより、媒体中には物体表面の反射点を中心とした放射状の光線場しか存在しないという制約を導入することができ、光線強度の減衰を考慮しても 3 変数関数となるため、安定して問題を解くことができるようになった。

また、一般的に入射光に比べて反射光はその強度が小さいことから、観測された光の強度から光線場を推定する際、入射光強度の推定誤差に強い影響を受け、反射光分布が適切に推定できないことがあることが分かった。これに対し、光線場を推定する際、入射光の散乱光に相当する部分の観測データを推定に用いないことで、反射光分布を適切に推定できることが分かった (図 8)。



(a) 完全拡散反射に対する推定結果



(b) 完全鏡面反射に対する推定結果

図 8: トモグラフィによる BRDF 推定

以上の手法によって BRDF が推定できるかどうかを検証するため、図 1 に示すような観測装置を構成し、散乱媒体として液体・気体のそれぞれを用いた実験を行った。液体を用いた場合には安定した散乱が観測できる一方、散乱光が界面で反射した光も観測に含まれ、BRDF の推定に大きな悪影響を与えることが分かった。気体については散乱媒体の濃度が時間の経過とともに希薄になる問題があった。これに対しては光線場推定のために観測を行うカメラに加え、散乱特性を定点観測する別のカメラを用いて散乱の減衰を同期して観測し、減衰の影響を補正した観測データを用いて BRDF を推定することとした。以上の対策により、BRDF に相当する光線場推定が可能であることが実験によって確認された (図 9)。

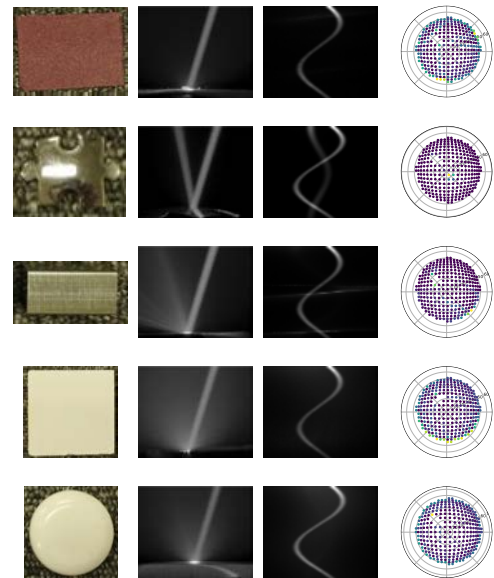


図 9: 実物体に対する観測 (一方向、サイノグラム) と BRDF の推定結果

以上は本研究課題に直接関わりのある成果を中心に記載したものであるが、これらから派生した関連技術についても取り組みを進めることができ、研究成果として英文論文誌 3 件、査読付き国際会議 10 件をはじめとする多くの発表を行うことができた。研究開始当初に比べ、世界的にも当該分野において散乱を

扱う研究が増加傾向にあり、その流れに遅れることなく成果を発表することができたと考えている。

本研究課題では BRDF 推定を中心として散乱解析や光線場処理の技術を開発してきたが、それと同時に、材料科学、生体計測分野の研究者とも交流し、共同研究の成果を上げることもできた。今後も散乱解析や光線場処理の技術を高めると同時に、他分野への展開も進めていきたいと考えている。

文献 1: DOI: 10.1109/3DV.2013.32, 2013.

文献 2: DOI: 10.1086/144246

文献 3: DOI: 10.1145/2516971.2516972

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① T. Iwaguchi, T. Funatomi, H. Kubo, Y. Mukaigawa, “Light Path Alignment for Computed Tomography of Scattering Material IPSJ Trans. on Computer Vision and Applications”, Vol. 8, No. 1, 査読有, doi:10.1186/s41074-016-0003-2, 2016.

[学会発表] (計 30 件)

- ① Y. Minetomo, H. Kubo, T. Funatomi, M. Shinya, Y. Mukaigawa, “Acquiring Non-parametric Scattering Phase Function from a Single Image”, ACM SIGGRAPH Asia 2017 Technical Brief, doi:10.1145/3145749.3149424, 2017.
- ② T. Ono, H. Kubo, T. Funatomi, Y. Mukaigawa, “BRDF Reconstruction from Real Object using Reconstructed Geometry of Multi-view Images”, ACM SIGGRAPH Asia 2017 Technical Brief, doi:10.1145/3145749.3149426, 2017.
- ③ 榎田貴弘, 船富卓哉, 久保尋之, 向川康博, “散乱を利用した物体反射特性推定における散乱異方性を考慮した観測のモデル化”, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会 (CVIM), vol. 2017-CVIM-209, no. 26, pp. 1-6, 2017.
- ④ K. Tsubota, T. Takatani, T. Aoto, K. Tanaka, H. Kubo, T. Funatomi, Y. Mukaigawa, “Examining Single Scattering Region in Concentration, Depth, and Wavelength on Diluted Media”, OSJ - OSA Joint Symposia on Nanophotonics and Digital Photonics, 2017.
- ⑤ 宮田明裕, 船富卓哉, 久保尋之, 向川康博, “X-Slit を用いた光線群サンプリングによる広域 BRDF 計測”, Visual Computing / グラフィクスと CAD 合同

シンポジウム 2017, 2017.

- ⑥ X. Zeng, T. Iwaguchi, H. Kubo, T. Funatomi, Y. Mukaigawa, “Estimating Parameters of Subsurface Scattering using Directional Dipole Model”, NICOGRAPH International 2017, 2017.
- ⑦ 榎田貴弘, 船富卓哉, 久保尋之, 向川康博, “実測に基づいた散乱位相関数モデルの検証”, 第 19 回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2016), PS2-67, 2016.
- ⑧ 藤村友貴, 飯山将晃, 船富卓哉, 橋本敦史, 美濃導彦, “散乱光を用いた形状計測のためのレーザー照射位置決定”, 電子情報通信学会 2016 年総合大会, D-12-53, 2016.
- ⑨ Y. Hirofuji, M. Iiyama, T. Funatomi, M. Minoh, “3D Reconstruction of Specular Objects with Occlusion: A Shape-from-Scattering Approach”, The 12th Asian Conference on Computer Vision (ACCV2014) 10.1007/978-3-319-16817-3_41, 2014.
- ⑩ M. Iiyama, S. Miki, T. Funatomi, M. Minoh, “3D Acquisition of Occluded Surfaces from Scattering in Participating Media”, International Conference on Pattern Recognition (ICPR2014), p. 2095-2100 10.1109/ICPR.2014.365, 2014.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ:

<http://omilab.naist.jp/~funatomi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

船富 卓哉 (FUNATOMI, Takuya)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号: 20452310