

令和 5 年 5 月 10 日現在

機関番号：14603

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K21317

研究課題名（和文）深層学習と物理モデルの融合によるシンプルな観測系での不均一散乱媒体の濃度分布推定

研究課題名（英文）Estimation of density distribution of inhomogeneous scattering media with deep learning and physics-based model

研究代表者

藤村 友貴（Fujimura, Yuki）

奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教

研究者番号：40908729

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題は、深層学習技術と物理ベースモデルを用いた不均一散乱媒体の濃度分布推定を目的とするものである。散乱媒体とは煙や霧といった空間中に微粒子が拡散した環境であり、入射した光が乱反射を繰り返すことで散乱光が生じる。本研究では、日常生活で用いるようなごく普通のカメラを用い、深層学習技術と融合することで散乱媒体の濃度分布を推定する手法を開発した。煙などの散乱媒体を複数のカメラで多視点から撮影した画像を入力とする。散乱媒体の濃度分布は畳み込みニューラルネットワークの出力として表現し、フォトンマッピングに基づく物理ベースレンダリングによって画像を再構成し最適化を行う。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では深層学習技術とフォトンマッピングを用いて散乱媒体濃度分布の推定を行った。CGでの画像生成に用いられるフォトンマッピングを最適化に用いるためには、画像を生成するすべての過程を微分可能な形で実装する必要がある。本研究は世界で初めてフォトンマッピングを微分可能な形で実装した。実世界の散乱媒体の濃度分布を推定することは、物理モデルの解析や写実的なCGの生成など社会的にも重要である。

研究成果の概要（英文）：This research aims to estimate the density distribution of inhomogeneous participating media with deep learning and a physics-based model. In participating media such as fog or smoke, incident light is scattered by suspended particles, which causes scattered light. In this research, we developed the method to estimate the density distribution of participating media only with commonly-used RGB cameras by exploiting deep-learning technology. The input of the developed method is multiple images captured from different views. A density volume is modeled as the output of a convolutional neural network, and the volume is optimized by reconstructing observed images with photon mapping, which is one of physics-based renderers.

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 散乱媒体 深層学習 フォトンマッピング

### 1. 研究開始当初の背景

コンピュータビジョンの分野では、カメラで撮影された画像やセンサで観測したデータから、複雑な物理現象を理解するための研究が行われている。複雑な物理現象の一つとして、霧や煙といった散乱媒体による光の散乱が挙げられる。散乱媒体に入射した光は、空間中の微粒子によって散乱させられ散乱光が生じる。このような散乱媒体を対象とした研究として、霧中で撮影された視認性の低下した画像の鮮明化などが挙げられる。しかしながら、これまで提案されてきた多くの手法では、推定パラメータの増大を回避するため、霧の濃度が均一であるという実世界にはそぐわない仮定が用いられてきた。これに対し、特殊なセンサを用いることで不均一な濃度分布を推定するという研究も存在するが、このような手法は観測系の特殊性からコントロールされた実験室環境でしか用いることができない。したがって、日常生活でもごく普通に用いられているカメラのみを用いて不均一な散乱媒体の濃度分布を推定することは、依然研究課題となっており、学術的・社会的ニーズも大きい。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、通常のカメラのみを用いて、煙や霧といった不均一な散乱媒体の濃度分布を推定することである。散乱媒体の濃度が均一であるといった仮定や特殊な実験室環境を想定することなく、不均一な濃度分布を推定できるかが学術的課題である。

### 3. 研究の方法

#### (1) 不均一な濃度分布のモデル化

不均一な濃度分布を最適化によって求める場合、空間中のすべての点において異なるパラメータを推定しなければならない。この推定パラメータの増大によって、多くの場合不良設定問題となってしまう。この問題に対し、本研究では濃度分布をニューラルネットワークの出力として表現する。ある程度の自由度を持った関数として表現することで自然な形で制約となり、効率よく最適化を行うことができる。

#### (2) 不均一な濃度分布から生じる散乱光のモデル化

均一かつそれほど濃度の高くない散乱媒体を考えた場合は、単一散乱のみが生じることを仮定することで、大気散乱モデルなどの大幅に簡略化されたモデルを用いることができる。これに対し、不均一かつ局所的に濃度が高い散乱媒体の場合、空間中で強度の異なる様々な散乱光が生じ、また散乱光がふたたび散乱する多重散乱も考慮する必要がある。本研究ではこのような複雑な物理現象を、CGにおける物理ベースレンダラーの一種であるフォトンマッピングを用いてモデル化する。また、このフォトンマッピングを微分可能な形で実装することで、濃度分布推定における最適化に用いることができる。

### 4. 研究成果

#### (1) ニューラルネットワークで表現されたシーンにおける高時間分解画像を用いた相互反射のモデル化

本研究課題ではまず最初に、散乱光と類似した環境光の一種である相互反射を対象とし、ニューラルネットワークで表現した物体密度上でのモデル化について研究を行った。相互反射は3次元物体上で生じる物理現象であり、多重散乱と類似しておりかつ比較的単純なモデルで表現できる。対象物体は散乱媒体への拡張を見据えて、物体密度(物体存在確率)として表現した。加えて、通常のカメラではなく時間分解能が高いSPADセンサから得られた高時間分解画像を対象とし、フォトンマッピングと同じようなアルゴリズムで高時間分解画像を再構成するアルゴリズムを実装し、最適化に用いた。

シミュレーションで図1(a)のようなシーンとそれを観測した高時間分解データを作成し、実装したアルゴリズムで相互反射とシーン解析が可能であるかを検証した。(b)に示すように、提案手法を用いて物体密度の推定に成功した。また、(c)に示すように、相互反射によりシーン中で光がどのような経路を辿ったのかが可視化することに成功した。

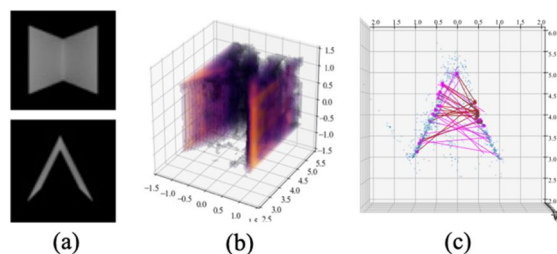


図1: (a) シミュレーションで作成したシーン、(b) 推定した物体密度、(c) 相互反射の可視化

#### (2) ニューラルネットワークで表現した濃度分布の多視点画像からの推定

次に、相互反射のモデル化で用いた手法の不均一散乱媒体への応用を行った。同時に、入力が高時間分解画像から多視点で撮影した複数枚のRGB画像に変更した。シーンを畳み込みニューラルネットワークが出力したボリュームとして表現し、各ボクセルがその位置における散乱媒体の濃度に相当する。このボリュームに微分可能フォトンマッピングを適用し、レンダリングし

た画像と観測した画像の差が最小となるようにニューラルネットワークの重みを最適化する。

ScalarFlow データセット [SIGGRAPH 2019] から煙の密度データを取得し実験を行った。図2(a)は最適化に用いた画像であり、(b)は推定した濃度分布から再構成した画像である。ほぼ同様の画像が得られており、最適化に成功していることがわかる。また、(c)は最適化に用いなかった視点からの画像であり、(d)は推定した濃度分布とこの視点から再構成した画像である。最適化に用いなかった画像でもほぼ同じような画像が得られていることから、不均一散乱媒体の濃度分布が推定できていることがわかる。

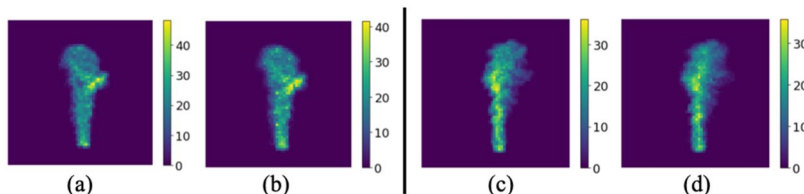


図2: (a, b) 最適化に用いた画像と、推定した濃度分布から生成した画像、(c, d) 最適化に用いなかった視点の画像と、推定した濃度分布から生成した画像。

### (3) 高時間分解画像を用いた非視線方向物体形状計測

本研究課題ではさらに、(1)の高時間分解データの解析手法で得られた技術の、非視線方向撮影への応用に試みた。非視線方向撮影とは図3(a)のようなセンサから見えないシーンを再構成する技術であり、学術的、社会的にインパクトの大きい研究分野である。(1)での高時間分解データの処理手法と、これまでの研究で得られたニューラルネットワークによるシーン表現を組みわせ、非視線方向シーンにおける物体の3次元形状計測手法を開発した。(b)がニューラル表現を用いない従来手法 [CVPR 2020]、(c)がニューラル表現を用いた提案手法の形状復元の結果であり、より高精度な3次元復元に成功した。この手法は現在最難関国際会議である ICCV に投稿中である。

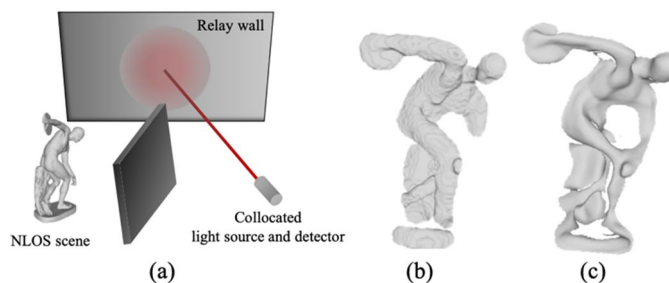


図3: (a) 非視線方向撮影、(b, c) ニューラル表現を用いない従来手法とニューラル表現による提案手法の3次元復元結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 藤村 友貴
2. 発表標題 Neural Density Field 上での光子追跡による高時間分解画像の解析手法
3. 学会等名 画像の認識・理解シンポジウム（MIRU）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 瀬戸口 諒
2. 発表標題 微分可能フォトンマッピングに基づく散乱媒体密度推定
3. 学会等名 コンピュータビジョンとイメージメディア（CVIM）
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
---------	---------