

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K18075

研究課題名（和文）屋外大規模環境を対象とした映像生成のための光学特性推定法

研究課題名（英文）Reflectance Parameter Estimation in Large Outdoor Environments for Practical Graphics Production

研究代表者

谷田川 達也（Yatagawa, Tatsuya）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：50817484

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、屋外の大規模な環境を対象とし、多視点ステレオ法と光学特性推定法を組み合わせて、形状取得精度を向上させることを目指していた。この目的に関する研究でも、一定の成果が得られたものの、研究分野の急激な発展も相まって、上記の研究主題そのものよりは、それと関連する映像表現技術や、取得形状の補正に関する成果が多く得られた。特に、層状材質や自己発光する散乱媒質の映像生成技術では、これまでに難しかった物理的対象について、効率的な計算モデルの開発に成功した。また、形状の補正技術についても、従来、大量の学習データが必要であった深層学習に基づく手法を、ごく少数のデータで同等の性能を得られるまでに向上させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多視点ステレオと光学特性推定の組み合わせでは、一定の条件下で形状取得精度を向上させることが示唆された一方、深層学習器の訓練に用いるデータを適切に用意できない場合には、少数の訓練データに結果が大きく依存してしまい、未知の結果に対する測定精度が低下する、という機械学習に基づく手法に共通の問題も確認された。この知見は、深層学習に基づく多視点ステレオ法が、どのような指標に基づいて形状を与えるか、という点について、一定の示唆を与える一方、期待以上の結果が得られなかった点に残念さが残った。この知見と、その他の関連分野において得られた研究成果を元に、今後は、より広範な使用場面での精度向上を目指したい。

研究成果の概要（英文）：When the project started, we aimed to improve the accuracy of multi-view stereo methods for the 3D surface geometries of large-scale objects by jointly estimating surface reflection parameters. Due to the rapid change in research trends, we have achieved rather more results with respect to related research objectives, such as real-time rendering and shape restoration, although we were able to achieve certain results with respect to our initial goal. We have introduced efficient computation models for layered materials and self-illuminating participating media, which have been considered for processing in real-time. Furthermore, our learning-based shape restoration method using only a few training samples has achieved as high restoration performance as those using deep neural networks trained with a considerable amount of training samples.

研究分野：知覚情報処理

キーワード：逆レンダリング 多視点ステレオ法 双方反射分布関数 反射パラメータ 実時間レンダリング 形状データ補正

1. 研究開始当初の背景

研究提案時には、多視点ステレオ法と物体表面の光の反射特性推定法を組み合わせることで、屋外にある建造物や樹木の形状計測精度向上を目指していた。研究開始当初には、多視点ステレオ法に対する有力な深層学習法である MVSNet 法 [1]が台頭してきたこともあって、現在にいたるまで、MVSNet 法を拡張した研究が多数報告された [2, 3]。一方で、これらの方法において、ニューラルネットが何を基準に物体の形状(より具体的には深度画像)を与えているかは、ブラックボックスになっていたため、ニューラルネットが学習しているものが何か、という問いに対して一定の示唆を与えることが学術的に重要だと考えた。

2. 研究の目的

従来、多視点ステレオ法の精度向上には、物体の形状と光の当たり方により決まる陰影と、物体の反射色を表すアルベドを切り離すことが重要であると考えられており、MVSNet 法をはじめとするニューラルネットを用いた多視点ステレオ法でも、このような陰影とアルベドの分離が行われているか明らかにすることを目指した。また、仮にそのような分離が不十分であるなら、ニューラルネットに物体の形状と物体表面の反射特性を同時に担当されることで、多視点ステレオ法の精度を向上させることも目的の一つに掲げた。

また、屋内外を問わず、多様な光源環境や対象に手法を拡張する可能性を考慮し、上記の目標と並行する形で、いくつかの関連技術についても研究を実施した。特に、機械学習時に反射特性の妥当性を評価するために必要となる効率的な映像生成の手法や、多視点ステレオ法では不可避な形状の欠損やノイズを補正する手法について研究を実施した。

3. 研究の方法

① 深層学習による多視点ステレオ法に対する反射特性推定の応用

MVSNet 法では、ニューラルネットが与える特徴量を元に、複数の画像の間での対応点を定義し、その対応点を元に被写体の三次元形状を復元する。そこで、MVSNet 法の拡張である Cas-MVSNet 法 [3]をベースとして、特徴量を計算するニューラルネットに被写体の反射特性を推定する逆レンダリングのタスクを同時に解かせることで、形状復元の精度が向上させられないかを検討した。

② 効率的な映像生成のための計算モデル

一般に、画像に映り込む物体がどのような反射特性を持つかは未知であるため、機械学習により推定される反射パラメータの妥当性を計算機的に評価するには、現在推定されているパラメータを用いて画像を再構成し、その画像と入力画像がどのくらい近くなるのかを評価する必要がある。故に、学習にかかる時間の短縮には、様々な対象に対する映像生成の効率化が不可欠である。そこで、本研究課題開始当初に検討していた半透明材質に加え、工業製品の塗装面に現れる層状材質の見え方や自己発光する媒質などの対象について、効率的な映像生成方法を検討した。

③ 形状データにおける欠損やノイズの補正

多視点ステレオ法は、画像を入力として、画像に写り込んだ部分の形状、より具体的にはカメラからの距離を推定することで物体の形状を推定する手法であるため、影になったり、別の物体に遮られたりして画像に写っていない部分の形状を得ることはできない。そこで、多視点ステレオ法で得られる点群データから表面形状を得る過程や、何らかの方法で変換された表面形状の後処理において、得られた形状を補正するための研究も実施した。

(次ページに続く)

4. 研究成果

① 深層学習による多視点ステレオ法に対する反射特性推定の応用

正解形状との距離に基づく基準で、ベース手法である Cas-MVSNet 法 [3]と、それに反射特性推定を組み合わせた提案法を精度比較したところ、多視点ステレオ法の評価に広く使われる DTU データセットの評価用全 22 シーンに対して、従来法の平均 0.355mm を上回る 0.339mm の精度を実現した。また、図 1 に示した通り、定性的にも提案法によって入力画像から陰影の効果が除去された反射率画像と、陰影に影響する光源環境を正しく分離できており、反射特性を推定する逆レンダリング法が多視点ステレオ法の精度向上に寄与することが明らかとなった。反射特性推定が適切に行われていることは、例えば、画像中央のぬいぐるみの足元やブロックの前方側面にある陰影が適切に除去できていることから確認できる。

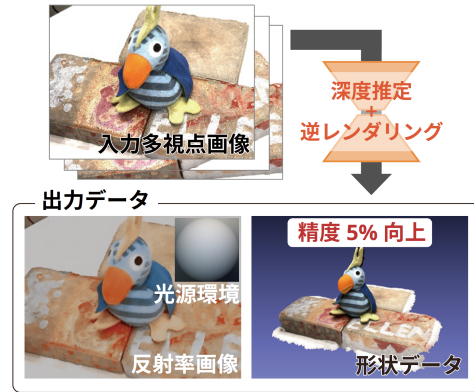


図 1: 反射特性推定の MVSNet 法への応用

② 効率的な映像生成のための計算モデル

本研究で得られた効率的な映像生成法における代表的な成果として、図 2 上に工業製品の塗装面などに現れる層状材質に対する、2 下に自己発光する媒質が床面を照らす様子に対する実時間映像生成手法の結果をそれぞれ示した。前者は「等方的」に光が反射するような材質が重なった場合にのみ使用可能な従来法 [4]を「非等方的」に光が反射する対象にも拡張したものであり、図 2 上の画像では、光が異方的に反射して、反射面に曲線状の摺り模様が現れる様子が正しく得られていることが分かる。後者は、特定の形状を持つ平面光源を効率的に取り扱う陰影計算法 [5]を自己発光する媒質に拡張したもので、具体的には自己発光媒質を平面光源の重なりであると考えて、そのような多重の平面光源の集まりを効率的に取り扱う計算法を新たに提案した。この手法においても図 2 下の各画像中央にある発光体が床面や側部のカーテンに反射の様子が写実的に表現されていることが分かる。

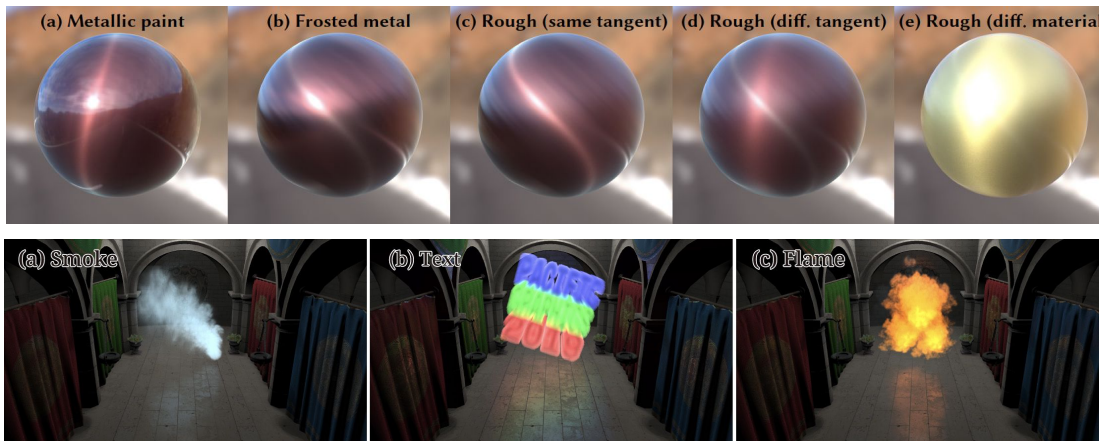


図 2: 層状材質 (上図)と自己発光する媒質 (下図)に対する実時間映像生成の結果

③ 形状データにおける欠損やノイズの補正

前述の通り、多視点ステレオ法は写真の上に見えている部分に対してしか形状を取得できないため、得られる形状には、ほぼ必ず欠損が生じてしまう。このような欠損を塞ぐための手法としては、旧来より Poisson Surface Reconstruction (PSR)法 [6]などの陰関数表現に基づく手法が広く用いられている。これらの手法では陰関数のゼロ等値面に対応する表面形状をマーチングキューブ (MC) 法 [7]により抽出するが、近年では、これをニューラルネットワークにより拡張した深層 MC 法が提案されている [8]。しかしながら、深層 MC 法に限らず、従来の MC 法は正方格子内に定義されたセルごとに表面抽出を行うため、格子内のセル数に得られる離散形状の品質が依存するという問題があった。

(次ページに続く)

この問題を解決するために行った研究では、ニューラルネットに基づく変形関数により、入力形状ごとの表面抽出に適した歪曲格子を定義することで、限られたセル数でも、より高解像度の離散形状データが得られる手法を提案した。図3には、PSR法、深層MC法(図中の従来法)、提案法を 32^3 の格子に適用した結果を示したが、提案法の結果が、本来得られるべき正解形状に最も近い形状を出力していることが分かる。

これに加え、得られた表面形状データを補正する手法についても研究を実施している。形状データは、写真等のメディアと比較して、その入手難易度が高いため、形状データの補正にあたっては、より少数のデータだけ

を用いて形状補正ができることが好ましい。近年、深層学習を用いたいくつかの形状補正法が提案されたが、その多くは大規模な形状データセットを用いるものであり、少数、特に単一のノイズあり入力形状を補正する手法については検討が進んでいなかった。

そこで、本研究では、教師なし学習の一種である自己教師付き学習を、単一のノイズ付き入力のみで実現する手法を新たに提案した。この結果、大量の教師データを用いる当時の最新手法(DNF-Net[9])と同等か、データによっては、より良いノイズ除去性能を実現することができた。図4に示した結果の比較からも分かる通り、提案法は、ノイズ付きの入力だけを用いているにも関わらず、DNF-Netと同等の結果が得られていることが分かる。

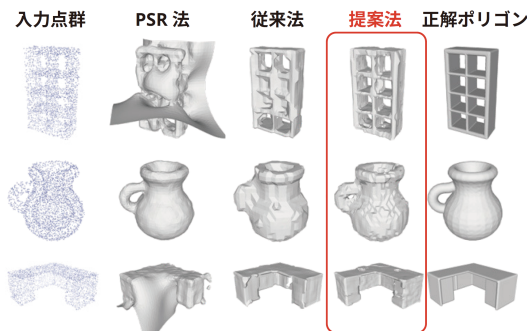


図3: 非線形変形グリッド上での物体表面抽出

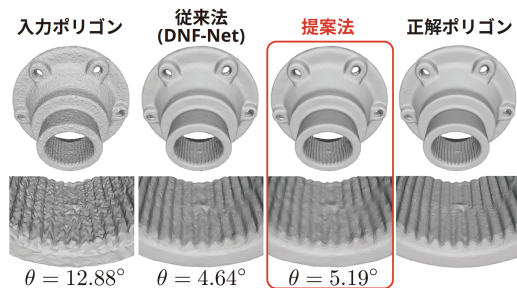


図4: 自己教師付き学習によるノイズ除去

以上の通り、本来の目標である多視点ステレオ法への反射特性推定の応用については、予想通りの結果を得ることが難しかった一方で、その関連分野において、多くの研究成果を上げることができた。今後は、これらの結果を元にして、多視点ステレオ法に限らない多様な形状測定のためのソフトウェア技術について、研究の範囲を広げていきたい。

参考文献

- [1] Yao et al., “MVSNet: Depth Inference for Unstructured Multi-view Stereo,” European Conference on Computer Vision, 2018.
- [2] Yao et al., “Recurrent MVSNet for High-resolution Multi-view Stereo Depth Inference,” Computer Vision and Pattern Recognition, 2019.
- [3] Gu et al., “Cascade Cost Volume for High-Resolution Multi-View Stereo and Stereo Matching,” Computer Vision and Pattern Recognition, 2020.
- [4] Belcour, “Efficient Rendering of Layered Materials using an Atomic Decomposition with Statistical Operators,” ACM Transactions on Graphics, 2018.
- [5] Heitz et al., “Real-Time Polygonal-Light Shading with Linearly Transformed Cosines,” ACM Transactions on Graphics, 2016.
- [6] Kazhdan et al., “Poisson surface reconstruction,” Eurographics Symposium on Geometry Processing, 2006.
- [7] Lorencen and Cline, “Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm,” ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1987.
- [8] Liao et al., “Deep Marching Cubes: Learning Explicit Surface Representations,” Computer Vision and Pattern Recognition, 2018.
- [9] Li et al., “DNF-Net: a Deep Normal Filtering Network for Mesh Denoising,” IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2020.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Tatsuya Yatagawa, Yasushi Yamaguchi, Shigeo Morishima	4. 巻 36
2. 論文標題 LinSSS: linear decomposition of heterogeneous subsurface scattering for real-time screen-space rendering	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Visual Computer	6. 最初と最後の頁 1979-1992
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00371-020-01915-4	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 -
1. 著者名 Yamaguchi Tomoya, Yatagawa Tatsuya, Tokuyoshi Yusuke, Morishima Shigeo	4. 巻 6
2. 論文標題 Real-time Rendering of Layered Materials with Anisotropic Normal Distributions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computational Visual Media	6. 最初と最後の頁 29-36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41095-019-0154-z	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 -
1. 著者名 Kuge Takahiro, Yatagawa Tatsuya, Morishima Shigeo	4. 巻 38
2. 論文標題 Real time Indirect Illumination of Emissive Inhomogeneous Volumes using Layered Polygonal Area Lights	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computer Graphics Forum	6. 最初と最後の頁 449 ~ 460
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/cgf.13851	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 -
1. 著者名 Takahiro Kuge, Tatsuya Yatagawa, Shigeo Morishima	4. 巻 11
2. 論文標題 Real-time Shading with Free-form Planar Area Lights using Linearly Transformed Cosines	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Computer Graphics Techniques	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 久家 隆宏, 谷田川 達也, 森島 繁生
2. 発表標題 ベジエ曲線を境界形状とする面光源のコサイン空間における実時間レンダリング法
3. 学会等名 Visual Computing 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻 雄太, 谷田川 達也, 森島 繁生
2. 発表標題 Neural Progressive Photon Mapping: 深層学習による適応的フォトン散布を用いたフォトンマッピング法
3. 学会等名 Visual Computing 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yamaguchi Tomoya, Yatagawa Tatsuya, Tokuyoshi Yusuke, Morishima Shigeo
2. 発表標題 Real-time Rendering of Layered Materials with Anisotropic Normal Distributions
3. 学会等名 SIGGRAPH Asia 2019, Technical Brief (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久家 隆宏, 谷田川 達也, 森島 繁生
2. 発表標題 光沢反射面に映りこむ炎と煙の新表現 -層化仮想面光源を用いた自己発光ボリュームの実時間大域照明法
3. 学会等名 Computer Entertainment Developers Conference (CEDEC2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久家 隆宏, 谷田川 達也, 森島 繁生
2. 発表標題 層状面光源を用いた自己発光ポリウムからの間接照明のリアルタイムレンダリング
3. 学会等名 Visual Computing 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷田川 達也, 山口 泰, 森島 繁生
2. 発表標題 分離型畳み込みカーネルを用いた非均一表面下散乱の効率的な計測と実時間レンダリング法
3. 学会等名 Visual Computing 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷田川 達也, 山口 泰, 森島 繁生
2. 発表標題 分離型畳み込みカーネルを用いた非均一表面下散乱の効率的推定法
3. 学会等名 第174回コンピュータグラフィクスとビジュアル情報学研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shota Hattori, Tatsuya Yatagawa, Yutaka Ohtake, Hiromasa Suzuki
2. 発表標題 Deep Mesh Prior: Unsupervised Mesh Restoration using Graph Convolutional Networks
3. 学会等名 CVPR Workshop on Learning to Generate 3D Shapes and Scenes (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kiichi Itoh, Tatsuya Yatagawa, Yutaka Ohtake, Hiromasa Suzuki
2. 発表標題 Extended Differentiable Marching Cubes by Manifold-Preserving Shape Inflation
3. 学会等名 British Machine Vision Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuta Tsuji, Tatsuya Yatagawa, Shigeo Morishima
2. 発表標題 Light Source Selection in Primary-Sample-Space Neural Photon Sampling
3. 学会等名 SIGGRAPH Asia 2021 Posters (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 服部 翔大, 谷田川 達也, 大竹 豊, 鈴木 宏正
2. 発表標題 グラフ畳み込みニューラルネットワークを用いた教師なし学習によるノイズ除去法
3. 学会等名 Visual Computing 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久家 隆宏, 谷田川 達也, 森島 繁生
2. 発表標題 自由曲線を境界形状とする平面光源の実時間レンダリング法
3. 学会等名 Visual Computing 2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 画像レンダリング方法、画像レンダリングシステム及びプログラム	発明者 久家 隆宏, 谷田川 達也, 森島 繁生	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-159051	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

非均質材質の実時間スクリーン空間レンダリングのための材質特性の線形分解法 (英語) https://tatsy.github.io/projects/linsss20/ 非等方法線分布関数を有する層状材質の実時間レンダリング (英語) https://tatsy.github.io/projects/anisolayer19/ 層状多面体面光源を用いた発光媒質からの実時間間接照明計算法 (英語) https://tatsy.github.io/projects/lpa119/ コサイン関数の線形変換によるBRDFの近似を用いた自由形状平面面光源の実時間レンダリング法 (英語) https://tatsy.github.io/projects/kuge2021bezlight グラフ畳み込みニューラルネットワークによる教師なしメッシュ補正法 (英語) https://tatsy.github.io/projects/hattori2021dmp 多様体保存型メッシュ変形による微分可能マーチングキューブ法の拡張 (英語) https://tatsy.github.io/projects/itoh2021ddmc 原始標本空間におけるニューラルネットワークを用いたフォトンサンプリングのための光源選択法 (英語) https://tatsy.github.io/projects/tsuji2021nppm

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
---------	---------