

令和 4 年 6 月 25 日現在

機関番号：14201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03263

研究課題名(和文)水中における劣悪環境下での形状計測手法の開発

研究課題名(英文)Objects measurements for degraded underwater scenes

研究代表者

飯山 将晃 (Iiyama, Masaaki)

滋賀大学・データサイエンス学部・教授

研究者番号：70362415

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,300,000円

研究成果の概要(和文)：濁った水中や霧が濃い環境など、視認が困難な程度まで劣化した環境でも物体の形状や被写体までの奥行きを計測することができる手法を研究した。計測手法として広く用いられている3つの手法(照度差ステレオ・ToF・多視点ステレオ)それぞれに対して、散乱現象を数理的にモデル化し、そのモデルに基づき散乱の度合いと物体の形状とを観測データから推定する方法を開発した。また、深層学習による計測手法についても開発を行いその有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、光の散乱によって肉眼ではよく分からない程度にまで劣化した環境でも被写体の形状や被写体までの距離を計測する技術を開発した。本プロジェクトで開発した技術は将来的には水中ロボットでの利用や災害時のレスキューロボットなどに応用できる技術であり、水中での安価かつ安定した計測技術の確立に向けて重要な一歩となった。

研究成果の概要(英文)：In our project, we developed methods for measuring 3D scene in highly-degraded scene due to light scattering, especially scenes that are hard to observe objects due to heavy scattering. We focused on three major methods for shape measurement (photometric stereo, ToF, multi-view stereo) and developed methods that estimate both scattering components and scene shape/depth. We also modeled light transport model under light scattering. We developed and evaluated a Deep-learning-based method for hazy scene and confirmed the effectiveness of our method.

研究分野：コンピュータビジョン

キーワード：散乱現象 形状計測 画像復元 深層学習

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

画像からの3次元計測はコンピュータービジョン分野における中心的テーマのひとつであり、建造物の計測から顕微鏡画像からの3次元計測まで、様々な研究が国内外で行われている。これに関連して、申請者らも散乱現象を手がかりとして通常環境では計測できない隠蔽面の形状や反射特性を計測する手法を研究してきた。しかしながら、これらの研究の多くは一定の観測環境もしくは計測対象を想定したものであり、いくつかの実応用では成功を収めているものの、依然として十分な精度で計測できない環境が多く残されている。その代表的な例として、水中における劣悪環境下での3次元計測に着目する。水中での計測手法として超音波ソナーを用いた方法が知られているが、装置が高価な点、計測に時間を要する点に課題があり、画像を用いた安価かつ高速な計測技術を開発することで水中計測の分野でブレイクスルーを起こす可能性がある。しかしながら、汚濁が頻繁に生じる水中環境下では、陸上の形状計測で用いられてきた計測手法をそのまま適用することは難しく、また、画像による水中計測を目指した従来の研究でも極度に劣化した環境下では満足な精度での計測が不可能であった。

このような劣悪環境下での物体形状計測を実現するためのアプローチとして、劣化の原因となる光の反射や散乱・吸収を物理モデルで表現し、劣化のない画像をこれらのモデルに基づいて復元し、その後形状を計測するアプローチが考えられる。しかしながら、実際に観測される劣化をこれらの物理モデルで完全に表現することは容易ではない。また、詳細なモデルを構築したとしても、光の反射や散乱を物理モデルに基づき計算するためには物体の形状が必要であり、形状を計測するための画像復元のために形状が必要になるという二ワトリと卵の問題が発生する。

この問題に対し、申請者らがこれまで取り組んできた事例画像を用いた学習型手法による解決を試みる。これまでの物理法則に基づく劣化モデルを洗練させることに加え、物理モデルでは近似されてカバーできない現象や物体の形状に対する尤度を大量の事例データから算出する。これにより、観測に対して最も尤度が高い物体形状を得ることができると期待される。

### 2. 研究の目的

散乱・吸収・多重反射などにより一見対象が視認できないほど劣悪な環境下でも物体の形状計測が可能となる技術の開発を目的とする。従来の単純な劣化モデルでカバーすることは難しく、また、計測に十分な観測もできない。これに対し、申請者らがこれまでに取り組んできた散乱光に基づく計測技術で得られた知見に加え、事例データによる情報補完と、申請者らが開発した確率的画像修復手法を組み合わせたアプローチを提案する。

### 3. 研究の方法

以上の目的を達成するために、散乱を生じさせることのできる計測装置を構築しつつ、以下のテーマに取り組む

- (1) 前方散乱モデルを用いた形状計測技術の開発
- (2) 最適化手法による形状計測技術の開発
- (3) 学習ベースの形状計測技術の開発

### 4. 研究成果

#### (1) 前方散乱を含む劣化画像からの形状計測技術の開発

水中で物体を観測した場合、水中に散乱を生じさせる媒体が存在すると光源から発せられた光が水中で散乱しその散乱光がカメラで観測される(図1(b))。カメラで観測される散乱光には、光源が散乱媒体中で散乱してそれが直接カメラへ到達するもの(backscatter:後方散乱)、被写体表面で反射した光が散乱媒体中で散乱してその光がカメラへ到達するもの(surface-camera forward scatter:前方散乱)が存在する。散乱媒体の濃度が高い場合、後者の影響を無視することができなくなる。

形状計測手法のひとつである照度差ステレオ法は、光の照射方向に対する物体の反射光の強度の変化を利用して計測を行う手法であるが、上述した散乱媒体が存在するシ-

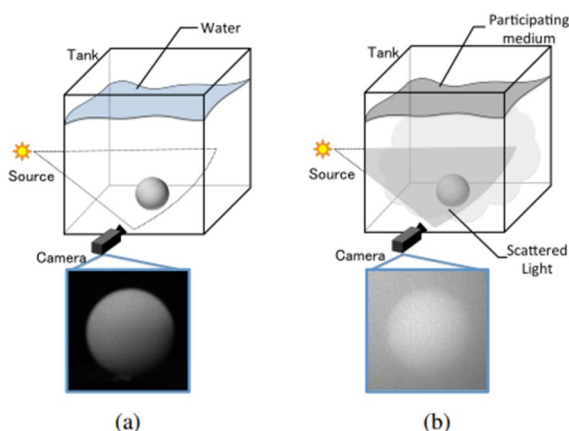


図 1

ンでは、物体の反射光以外にも散乱光（後方散乱・前方散乱）が観測されてしまうため計測性能が著しく劣化してしまう。この問題に対し、後方散乱・前方散乱を定式化した上で、それを現実的に推定可能なレベルまで近似した散乱モデルを考案した。

実験結果を図2に示す。図2(a)は散乱が生じないクリアな環境で計測された結果である。図2(b)上段は散乱を考慮せずに照度差ステレオを適用した結果、下段は提案手法による結果である。図2(b)右端の結果からも確認できるように、視認が困難になるレベルまで散乱による劣化が生じたシーンにおいても提案手法を用いて形状計測が可能であることが示された。

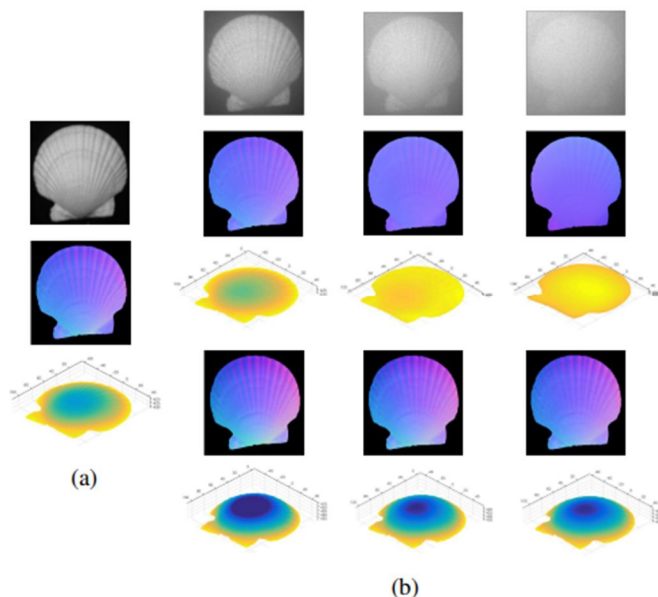


図 2

### (2) 散乱現象下における ToF カメラによる距離計測技術の開発

ToF (Time of Flight)カメラは、光の飛行時間からカメラから被写体までの距離を計測するセンサであり、3次元計測手法として広く用いられているものである。カメラから光を照射して被写体からの観測光を計測するという ToF カメラの原理上、光路上で外乱による影響を受けてしまうとその精度が低下することが知られている。

特に、光の散乱が生じている環境では、光が被写体に到達する前に後方散乱し ToF カメラに到達してしまうため著しく計測性能が低下してしまう。この問題に対し、提案手法では ToF カメラにおける散乱光の影響を物理的にモデル化し、一定の条件下ではカメラで観測される散乱光が単純な2次関数で定量化できること、また、カメラから十分に被写体が離れている箇所（背景領域）を検出することができればこの2次関数のパラメータが推定できることを示した。そして、最適化手法の一種である iteratively reweighted least squares の枠組みで、画像中の背景領域の推定と奥行き推定を同時に行う手法を開発した。

提案手法の結果を図3に示す。図3上段左が散乱が無い状態でのシーン、上段右が散乱が生じているシーンである。上段左のシーンを ToF カメラで計測した結果(下段左)と比較して、上段右のシーンを ToF カメラで計測した結果(下段中)が大きく異なっていることが確認できる。これに対し、上段右のシーンを提案手法で計測した結果(下段右)では散乱が生じて無い場合に近い計測結果が得られていることが確認できる。

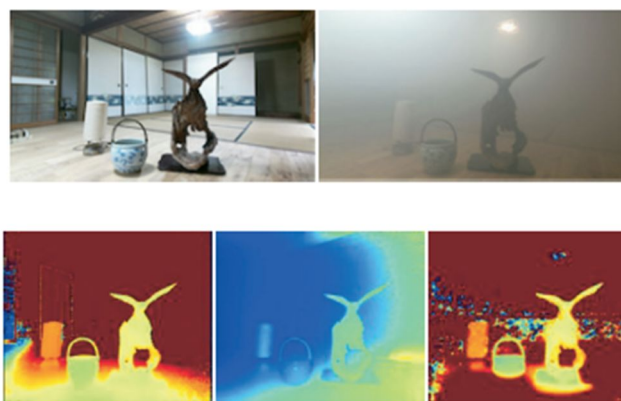


図 3

### (3) 散乱現象下でのステレオ計測技術の開発

多視点画像からの形状計測(ステレオ計測)は形状計測手法の中でもポピュラーな手法であり、様々な分野で応用されている。ステレオ計測では Photo Consistency に基づいて異なる視点で撮影された画像間で対応付けを行う必要があるが、散乱によって画像が劣化した環境では Photo Consistency を取るのが難しく画像間の対応付けが困難である。この問題に対し、一旦画像で生じている散乱成分を除去することができれば対応付けを取ることが可能であるが、散乱成分の除去のためにはカメラから被写体までの距離(形状)を知る必要があり、結局ニワトリと卵の問題に陥ってしまう。

近年,ステレオ計測において Cost Volume を用いた学習型の手法が提案されており,そこでは被写体までの奥行きの仮説に対して Photo Consistency がどの程度保たれているかを Cost とした Volumetric なコスト関数 (Cost Volume) を計算し, Cost Volume を入力とした畳み込みニューラルネットワークによって被写体までの奥行きを推定している. 提案手法ではこの Cost Volume を改良し, 散乱による劣化も考慮した

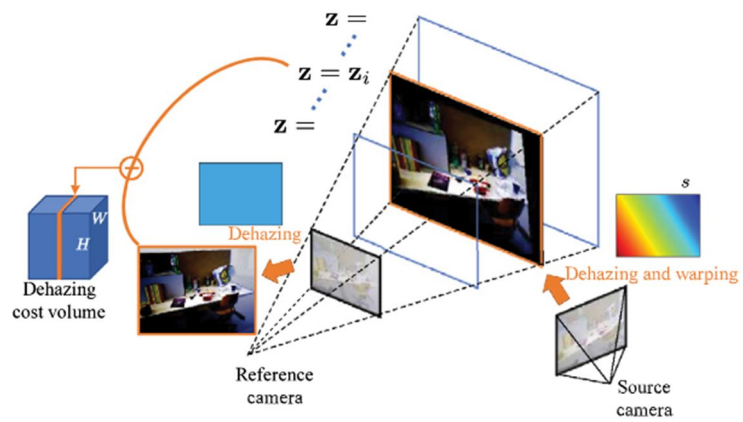


図 4

新たな Cost Volume (Dehazing Cost Volume) を提案した (図 4) .

提案手法による結果を図 5 に示す . 図 5 左のように散乱により劣化したシーンに対しても , シーンの大まかな奥行きを計測できていることが確認できる .

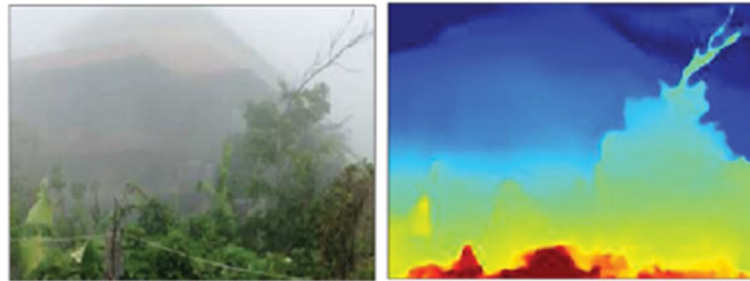


図 5

## 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 FUJIMURA Yuki、SONOGASHIRA Motoharu、IIYAMA Masaaki	4. 巻 E103.D
2. 論文標題 Simultaneous Estimation of Object Region and Depth in Participating Media Using a ToF Camera	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 660～673
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transinf.2019EDP7219	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 Fujimura Yuki、Iiyama Masaaki、Hashimoto Atsushi、Minoh Michihiko	4. 巻 42
2. 論文標題 Photometric Stereo in Participating Media Using an Analytical Solution for Shape-Dependent Forward Scatter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence	6. 最初と最後の頁 708～719
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TPAMI.2018.2889088	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 Yuki Fujimura, Masaaki, Iiyama, Atsushi Hashimoto, Michihiko Minoh	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Photometric Stereo in Participating Media Using an Analytical Solution for Shape-Dependent Forward Scatter	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TPAMI.2018.2889088	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 Yuki Fujimura, Motoharu Sonogashira, Masaaki Iiyama	4. 巻 211
2. 論文標題 Dehazing cost volume for deep multi-view stereo in scattering media with airlight and scattering coefficient estimation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computer Vision and Image Understanding	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cviu.2021.103253	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7件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Yuki Fujimura, Motoharu Sonogashira, Masaaki Iiyama
2. 発表標題 Dehazing Cost Volume for Deep Multi-view Stereo in Scattering Media
3. 学会等名 Asian Conference on Computer Vision (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤村 友貴, 園頭 元春, 飯山 将晃
2. 発表標題 未知散乱条件下での深層学習によるMulti-view Stereo
3. 学会等名 情報処理学会CVIM研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Fujimura, Motoharu Sonogashira, Masaaki Iiyama
2. 発表標題 Dehazing Cost Volume for Deep Multi-view Stereo in Scattering Media
3. 学会等名 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU)2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤村 友貴, 園頭 元春, 飯山 将晃
2. 発表標題 散乱媒体下でのMulti-view StereoのためのDehazing Cost Volumeの提案
3. 学会等名 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
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Yuki Fujimura, Motoharu Sonogashira, Masaaki Iiyama
2. 発表標題 Defogging Kinect: Simultaneous Estimation of Object Region and Depth in Foggy Scenes
3. 学会等名 画像の認識・理解シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 喜島 大揮, 藤村 友貴, 藺頭 元春, 飯山 将晃
2. 発表標題 近接光源下で撮影された画像からの散乱除去と深度推定
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Fujimura, Masaaki Iiyama, Atsushi Hashimoto, Michihiko Minoh
2. 発表標題 Photometric Stereo in Participating Media Considering Shape-Dependent Forward Scatter
3. 学会等名 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (国際学会)
4. 発表年 2018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
---------	---------