

様式VI

博士学位論文調査報告書

論文題目 3D Reconstruction in Scattering Media
(散乱媒体下での三次元復元)

申請者氏名 藤村友貴

最終学歴 平成30年3月
京都大学大学院情報学研究科知能情報学専攻修士課程 修了
令和3年3月
京都大学大学院情報学研究科知能情報学専攻博士後期課程
研究指導認定見込

学識確認 令和 年 月 日 (論文博士のみ)

論文調査委員 京都大学大学院情報学研究科
(調査委員長) 准教授 飯山将晃

論文調査委員 京都大学大学院情報学研究科
教授 西野恒

論文調査委員 京都大学大学院学術情報メディアセンター
教授 中村裕一

論文調査委員 京都大学
名誉教授 美濃導彦

京都大学	博士 (情報学)	氏名	藤村 友貴
論文題目	3D Reconstruction in Scattering Media (散乱媒体下における三次元復元)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>二次元画像から被写体の三次元形状を復元する三次元復元はコンピュータビジョンの分野における重要なタスクである. しかしながら, 霧や煙が充満した環境, あるいは濁った水中といった微粒子が拡散した環境では, これらの粒子によって引き起こされる光の散乱や吸収によって撮影された画像が劣化する. このような散乱媒体下では, 画像の劣化により従来の三次元復元手法を適用することが難しい. 本論文では, 散乱媒体下における光の散乱や吸収を物理的にモデル化し, 散乱媒体下での三次元復元を可能にする手法を提案している. 特に, 本論文は既存の三次元復元手法を, 三角測量に基づくdisparity ベースの手法, 輝度値の変化を形状復元の手がかりとする shading ベースの手法, 光の伝達時間を用いるTime-of-Flight (ToF) ベースの手法の3つに大別し, それぞれの実装方法について議論を行っている. 同時に, それぞれに関する統一的な枠組みとして, 被写体のスケールと散乱媒体の濃度を計測対象を特徴づけるパラメータとして, 各手法の適用範囲を実例とともに議論している.</p> <p>第2章では, 散乱媒体下における光の散乱と減衰を数式によって記述し, コンピュータビジョンの分野でよく用いられるsingle scatteringモデルとatmospheric scattering モデルについて述べている. 特に, 本論文ではsingle scattering モデルがatmospheric scattering モデルの一般化であり, 動的な光源を必要としないdisparity ベースの手法, あるいは動的な光源を必要とするshading ベースやToF ベースの手法のように, 物理モデルの選択は後段の三次元復元手法において動的な光源を必要とするかどうか依存することを指摘している. 同時に, これらのモデルを用いた従来の画像復元手法についても概説している.</p> <p>第3章では, disparity ベースの手法として, 深層学習ベースのMultiview Stereo (MVS) の散乱媒体下への適用方法について議論している. 特に, 散乱媒体での画像の劣化と多視点間の幾何拘束を同時にモデル化したdehazing cost volume を提案している. 深層学習ベースのMVS では多視点間の幾何拘束として, 空間を平面で走査した際の画像間の一致度を各平面のコストとして計算した, cost volume と呼ばれるものがネットワークの入力に用いられる. 本論文で提案しているdehazing cost volume は, 平面の走査と同時にatmospheric scattering モデルに基づいて画像復元を行うことで散乱媒体下においてより効率的にコストを計算することができる. Atmospheric scattering モデルを用いて画像復元を行うためには, 散乱媒体の濃度といった通常は未知である散乱パラメータが必要であるが, 本論文ではdehazing cost volume とStructure-from-Motion によって得られるシーンの疎な三次元点群を用いた散乱パラメータの推定方法も同一の枠組みとして提案している.</p> <p>第4章では, shading ベースの手法として, 照度差ステレオ法の散乱媒体下への適用方法について議論している. 前章のdisparity ベースの手法と異なり, 照度差ステレオ法では動的な光源が必要であるため, 画像の劣化はsingle scattering モデルによって記述することが適している. しかしながら, single scatteringモデルはatmospheric scattering モデルと異なりより複雑な計算を要する. 特に, 散乱媒体の濃度が高い場合に考慮すべき前方散乱成分は被写体の形状への依存度が高く, 対象の形状が未知であることを前提とする三次元復元の文脈では解析が困難である. 本論文ではこの問題に対して, 散乱成分の計算・除去と照度差ステレオ法を反復的に行うアルゴリズムを提案している. その中で, 散乱成分の計算をより効率的に行うために, ルックアップテーブルを用いた前方散乱成分の解析解, および大規模密行列で記述され</p>			

た前方散乱による画像の劣化を疎な行列に近似することにより，前方散乱除去を可能にする手法を提案している。

第5章では，ToF ベースの手法として，正弦波照射型ToF カメラを用いた散乱媒体下での深度計測手法について述べている．正弦波照射型ToF カメラでは，照射した光と受光した光の位相差および振幅を観測し，位相差から対象までの深度を計測する．したがって，動的な光源が存在するため散乱による劣化はsingle scattering モデルを用いるが，前章とは異なり振幅・位相の空間でモデル化される．本章では対象のシーンが物体と散乱成分のみが観測される背景に分けられると仮定し，物体領域における観測を外れ値としたロバスト推定による物体領域と散乱成分の同時推定を実現している。

第6章では本論文のまとめについて記述し，また主に本論文で考慮されていない多重散乱および不均一な散乱媒体について，今後の課題と展望を議論している。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

霧や煙が充満した環境，あるいは濁った水中といった，空間中の微粒子により光の散乱，減衰が引き起こされる散乱媒体下では，観測された画像や信号が劣化するため通常の三次元復元手法を適用することが困難である。

本論文では，既存の三次元復元手法をdisparityベース，shadingベース，ToF ベースの3つに大別し，散乱媒体下における光の物理モデルと組み合わせることで，それぞれについて散乱媒体下への適用方法を議論している．得られた成果は以下の通りである。

(1) 深層学習を用いたMVSに対して，多視点間の幾何拘束と画像の劣化を同時にモデル化する手法としてdehazing cost volume を考案した．また，そのdehazing cost volume を用いて散乱媒体の散乱パラメータをシーンの深度と同時推定する手法を提案し，実際の霧がかかったシーンで撮影された画像で実験を行い有効性を検証した．

(2) 照度差ステレオ法とsingle scattering モデルを組み合わせ，散乱除去と形状復元を反復的に行う手法を提案した．特に，複雑な計算を要する前方散乱成分に対して，ルックアップテーブルを用いた解析解を導出し，同時に前方散乱による画像の劣化をモデル化した大規模密行列を疎行列に近似して除去する手法を考案した．実験室環境において濁らせた水中下で撮影された画像を用いて実験を行い，有効性を検証した．

(3) 正弦波照射型ToF カメラを用いて，散乱媒体下で深度計測を行う手法を提案した．正弦波照射型ToF カメラの観測である光の位相と振幅について散乱媒体下でモデル化を行なった．また，物体領域における観測を外れ値としてロバスト推定により，シーンの物体領域と散乱成分を同時に推定する手法を提案した．スモークマシンによる室内実験によりその有効性を検証した．

(4) 提案した3つの手法について，実世界のスケールと散乱媒体の濃度の2軸でパラメータ化し，統一的な議論としてそれらの位置づけ，および適用可能性について議論を行なった．

以上本論文は，散乱媒体下における三次元復元に着目し，代表的な三次元復元手法について散乱媒体下における物理モデルと組み合わせ実現する手法をまとめ統一的な議論を行なったものである．また，実データを用いてそれぞれの手法の有効性を実証したものであり，学術上，実用上寄与するところが少なくない．よって，本論文は博士(情報学)の学位論文として価値あるものと認める．

また，令和3年2月19日論文内容とそれに関連した口頭試問を行なった結果合格と認めた．本論文のインターネットでの全文公表についても支障がないことを確認した．

要旨公開可能日： 年 月 日以降