

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：14301
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2015～2017
課題番号：15K00237
研究課題名(和文) 散乱現象を利用した物体計測手法の研究

研究課題名(英文) Shape Reconstruction by Using Scattering

研究代表者
飯山 将晃 (Iiyama, Masaaki)

京都大学・学術情報メディアセンター・准教授

研究者番号：70362415
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：3次元計測において、散乱媒体によって生じる光の散乱を用いた計測手法の確立に向け、レーザーを用いた計測手法と複数の点光源を用いた手法を開発した。レーザーを用いた手法ではカメラからは直接観測できない箇所の形状を計測する手法を開発し、また、複数の点光源を用いた手法では、散乱厚みを利用することにより従来よりも高精度で計測可能な手法を開発した。これらの技術の性能を水槽・照明・カメラからなる計測システムによって評価した。

研究成果の概要(英文)：We developed methods for measuring 3D shape by using scattering in participating media. Two different approaches were developed; 3D reconstruction with a spot laser and with multiple spot lights. Our method with a spot laser can measure occluded surfaces by using scattering of laser and reflected light. Our method with multiple spot lights improves the accuracy of measurement. We also constructed a measurement system with water tank, laser and cameras, and evaluated the effectiveness of our methods.

研究分野：コンピュータビジョン

キーワード：形状計測 散乱現象 照度差ステレオ

1. 研究開始当初の背景

物体の3次元形状と表面反射特性の計測はコンピュータビジョン分野の中心的テーマのひとつであり、計測精度の向上や計測可能な対象の範囲を広げる研究が国内外で行われている。市街地の3次元計測や文化財のデジタルアーカイブなどの応用のほか、水中のシーンを対象とした研究も進められている。

代表者は、水中での光の反射と散乱の様子を散乱モデルや表面反射モデルに基づいてモデル化し、反射光や散乱光と、物体形状や反射特性との関係を明らかにする研究を行ってきた。その過程で、水中での光の散乱光が、水中に存在する物体の形状や反射特性を計測する上で、有効な手がかりとなることが明らかとなっている。

一方、物体の3次元形状と表面反射特性の計測において技術的に困難となる状況とは、端的には物体表面での反射光がカメラで観測できない状況である。典型的なコンピュータビジョンによる計測では、計測対象にレーザー光を照射し、それが計測対象の表面に衝突して発せられる反射光をカメラで観測する。反射光の画像上での位置や強度を手がかりに、レーザー光の照射位置の座標や反射光の強度、すなわち物体形状と反射特性を推定する。従来手法は反射光がカメラで観測できることが前提となっている。この前提が成り立たない場合、例えば、反射光が限られた方向にしか放出されない鏡面や、表面が隠蔽されてカメラで観測できない面は従来手法では計測できない。

2. 研究の目的

研究の背景で挙げた問題点に対し、水中に存在する物体の形状の計測を光の散乱現象を利用して行うアプローチを提案する。物体の反射光を手がかりとしてきた従来研究と異なり、反射光が水中で散乱する状況をノイズとして除去するのではなく、逆にそれを手がかりとして計測を行う点に特色がある。

3. 研究の方法

(1) 計測システムの構築：

ロボットアームと2台の高感度カメラ、およびレーザー照射装置と水槽からなる計測システムを構築し、動的にレーザー照射位置を決定しながら反射光の散乱光を計測することが可能な撮影システムを構築する。

(2) 散乱現象に基づく隠蔽面の計測手法：

散乱現象を利用して、カメラから直接観測できない隠蔽面の計測を行う手法を開発する。

(3) 散乱現象に基づく奥行きエッジのあるシーンの計測：

散乱媒体を利用した3次元形状計測手法の開発として、散乱媒体下における照度差ステレオを用いた物体法線推定と、散乱厚みの計測によるデプスマップ推定との融合による、奥行きエッジが存在する物体の形状計測手法を開発する。

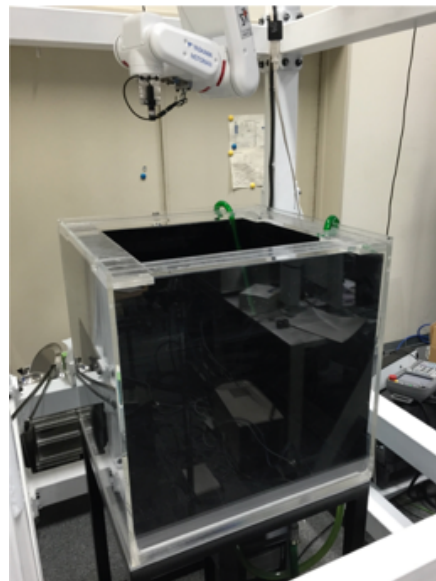
(4) 散乱現象下での物体の法線計測

散乱現象により輝度値が変化する環境下で、複数の点光源を用いて物体の法線を計測する手法を開発する。

4. 研究成果

(1) 計測システムの構築および、撮影位置自動決定手法の開発。

撮影後のデータの利用に必要な水槽やカメラの位置のキャリブレーション、および、カメラで撮影される画像の輝度値のキャリブレーションを行う手法を開発した。さらに、これを用いて、さまざまな物体に対してレーザー光を照射し、その物体表面での鏡面反射光や拡散反射光を観測したデータセットを取得した。また、鏡面反射光を用いた従来手法を volumetric に行えるよう手法を改良した手法を開発した。下図に開発した計測装置の外観を示す。



また、散乱光を用いた形状計測に対してできるだけ少ない照射回数で高精度の形状を得るためのロボットアームの制御方法についての研究を行った。本研究課題で我々が提案する手法は、隠蔽面など従来は計測できなかった物体形状を計測できるという利点があるが、その反面、1回のレーザー照射と画像撮影で物体表面上の1点しか計測できないという欠点があり、計測に要する時間が長くなるという問題があった。これに対し、与えられた目標精度をできるだけ少ない計測回数で実現できるようなレーザーの照射位置を

決定するアルゴリズムを開発した。

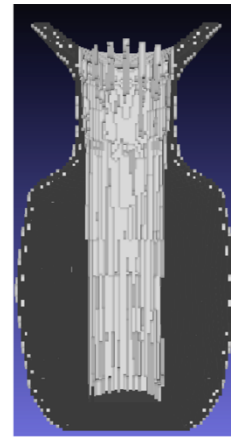
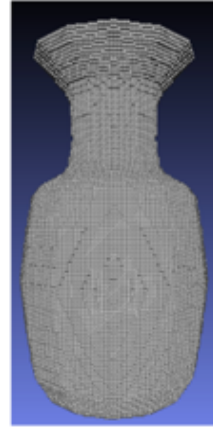
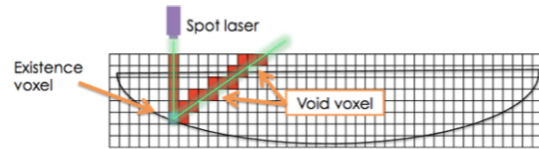
物体の形状を点群として計測する際、平面などの単純な形状の箇所は粗く、複雑な形状の箇所は細かく計測を行えば、目標精度をできるだけ少ない計測回数で実現できる。しかしながら、計測対象物体の形状は未知であるため、計測の粗密を判断するための形状に関する情報は計測を行うまでわからない。そこで、物体に関する普遍的な仮定として、次の二つの仮定を導入した。(1)物体は平面の集合で近似できる。(2)(1)より物体は三角形メッシュによって表現できるが、各三角形パッチについて面積が大きいほどそのパッチの形状近似の精度は低い。以上の仮定より、観測点群から三角形メッシュを生成して、パッチの近似領域に対応する物体領域の平面らしさと、面積に基づいて各パッチを評価し、どのパッチをレーザー照射対象とすべきかを決定する手法を提案した。

(2) 散乱現象に基づく隠蔽面の計測手法

画像中のどこに光の反射位置があるかを推定することができれば、ステレオ計測により物体形状が計測できる。従来の計測では、カメラがレーザー光の照射位置を観測できるようカメラを配置する必要があった。そのため、隠蔽が生じやすい物体に対処するためにカメラ間の距離(基線長)を短くするとステレオ計測の精度が低下してしまい、一方、基線長を長くすると隠蔽が生じやすくなるというトレードオフがある。

これに対して照射位置を直接観測するのではなく、照射位置で反射される拡散反射光や鏡面反射光の散乱光を利用することによりこのトレードオフの問題から脱却する。反射光の散乱光の強度は反射位置からの距離の二乗に反比例する性質を利用すれば、反射光が隠蔽されて観測できない場合でも、散乱光の強度分布から反射位置の推定が可能である。(1)で構築したシステムを用いて実験を行い、隠蔽面の形状を計測できることを確認した。

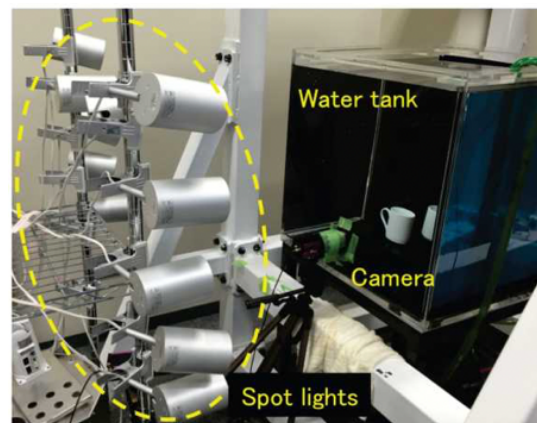
上の手法の問題点として、三次元形状の点群表現に基づく計測を行っており、物体の内外を区別することができないという問題がある。そこで、散乱媒体で満たされた空間中に計測物体を配置し、スポットレーザを物体へ照射する方法をとる。反射点推定法と異なり、本研究ではレーザが空間を通過する際、物体表面にある反射点を除いた経路中には物体が存在しないことを利用する。具体的には、スポットレーザの照射一回につき、反射点推定法によって画像中の入射光と反射光を特定し光路の三次元位置を求める(下図)。これを入力として物体が存在しない領域を計測し、最終的に計測で残った部分を物体の領域として出力することで、隠蔽面を含む物体の形状を計測できることが示された。



(3) 散乱現象に基づく奥行きエッジのあるシーンの計測:

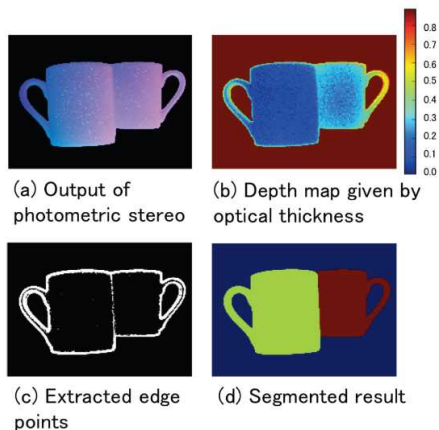
散乱による画像の劣化を考慮した照度差ステレオ法により、散乱媒体下でも物体表面の法線を計測することができる。また、照明位置を変化させて撮影した複数枚の画像に基づき物体の法線だけでなく散乱の度合い(散乱厚み)を計測することもでき、これによりカメラから被写体までのおおよその距離を計算することもできる。被写体の局所的な凹凸を照度差ステレオ法で、おおまかな形状を散乱厚みで計測し、それらの計測結果をエネルギー最小化によって統合することで3次元形状を計測する手法を提案した。

提案した手法の精度を、水槽とスポットライト、および高感度カメラを用いた計測システム(下図上段)を用いて検証し、一定の散乱媒体の濃度であれば十分な精度で計測が可能であることを示した。



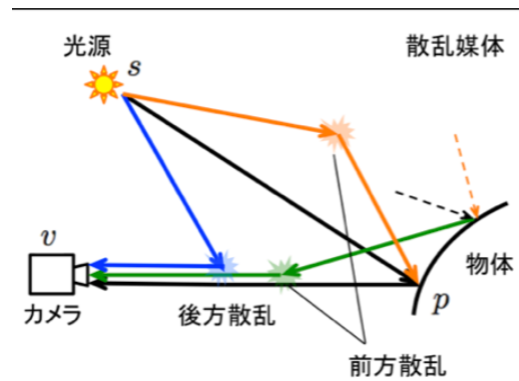
照度差ステレオでは、複数の光源を切り替えながら撮影した複数枚の画像を入力とし、画像間の輝度値の変化より各画素に対応する物体表面の法線を計算することができる。照度差ステレオは画素毎に詳細な形状が得られるという利点があるものの、計測可能なのは形状の微分である法線方向のみであり、奥行きエッジと呼ばれる奥行きが不連続に変化する被写体の形状を計測できないという問題があった。この問題に対し、均質媒体において、散乱の度合いによってカメラから被写体までの奥行きを散乱奥行きとして求めることができる。散乱奥行きの計測はノイズ等の影響を受け、多少の誤差は含むものの、照度差ステレオと異なりカメラから被写体までの絶対的距離を求めることができるという利点がある。

そこで、画像処理により奥行きエッジの発生箇所を検出し、その後、奥行きエッジで囲まれた閉空間内の相対的形狀を照度差ステレオで、奥行きエッジで分離された閉空間間の絶対的位置関係を散乱奥行きで計測することで、両者の欠点を補った形状計測が実現できることを示した。



(4) 散乱現象下での物体の法線計測

散乱媒体下における照度差ステレオ法として、水中での形状計測を念頭に置いて単純な後方散乱による画像劣化だけでなく、物体の形状によって散乱現象が変化する前方散乱も考慮した手法について検討を行った。従来の照度差ステレオ法は散乱による劣化を考慮しておらず、水中など散乱現象が回避で



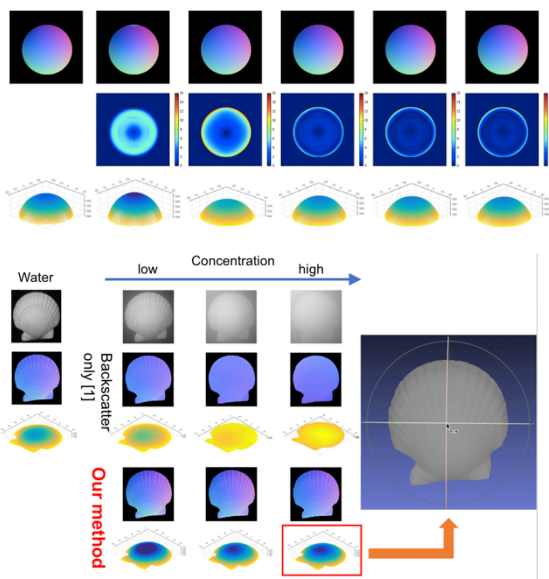
きない環境下では精度が低下することが知られている。これに対し、散乱現象による画像劣化をモデルに組み込んだ手法を開発した。散乱の度合いは散乱媒体の性質だけでなくカメラから物体までの距離により変化するが、提案手法ではその過程を散乱モデルとしてモデル化し、散乱の度合いと物体形状とを同時に推定することにより、散乱現象下でも正確な形状計測が可能となるような計測を実現した。

従来の古典的な照度差ステレオでは、物体表面での直接反射光（右図において黒線に相当）しか観測されないものとして計測を行っていた。しかしながら、水中のように散乱が生じる場合、直接反射光の他に後方散乱や前方散乱といった現象も同時に観測される。従来、そのうちの後方散乱についてはそれを考慮した照度差ステレオ法が提案されていたが、前方散乱、特に物体形状に依存する前方散乱については考慮されていなかった。

その理由として、形状を計測するためには、前方散乱の除去が必要であり、また、前方散乱を除去するためには対象の形状が必要であるというニワトリと卵の問題が挙げられる。提案手法では、物体をまず平面で近似したあとに、前方散乱を除去し、その結果を元に形状を一旦復元した後で、再度前方散乱を除去する、という繰り返しアルゴリズムを用いてこの問題に対処した。

また、これを実用的な時間で計算できるようにするため、前方散乱を予め計算し、2次元のルックアップテーブルで表現できるようにし、また、前方散乱に寄与する物体表面の範囲を限定することで、大規模行列演算を不要とする改良を加えた。

シミュレーションによる精度検証（下図上段）を行うとともに、前年度までに我々が構築した計測システムを用いて実データを取得し、実データによる性能評価（下図下段）も行った。これらの結果、従来よりも高い精度で計測が可能であることを示した。



5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- (1) A Variational Bayesian Approach to Multiframe Image Restoration, Motoharu Sonogashira, Takuya Funatomi, Masaaki Iiyama, Michihiko Minoh, IEEE Transactions on Image Processing, Vol.25, No.5, pp.2163-2178, 2017-05.
- (2) Shift-Variant Blind Deconvolution Using a Field of Kernels, Motoharu Sonogashira, Masaaki Iiyama, Michihiko Minoh, IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E100-D, No.9, pp.1971-1983, 2017-09.

[学会発表] (計 3 件)

- (1) 散乱光を用いた形状計測のためのレーザー照射位置決, 藤村 友貴, 飯山 将晃, 船富 卓哉, 橋本 敦史, 美濃 導彦, 2016 年電子情報通信学会総合大会
- (2) Shape reconstruction of objects in participating media by combining photometric stereo and optical thickness, Yuki Fujimura, Masaaki Iiyama, Atsushi Hashimoto, Michihiko Minoh, Computer Vision for Analysis of Underwater Imagery (CVAUI), pp. 49-54, 2016-12
- (3) 形状に依存する前方散乱を考慮した散乱媒体下での照度差ステレオ法, 藤村 友貴, 飯山 将晃, 橋本 敦史, 美濃 導彦, 情報処理学会 CVIM 研究会, 2017-CVIM-209, 2017

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://www.iiyama-lab.org/research-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

飯山将晃 (Masaaki Iiyama)
京都大学・学術情報メディアセンター・准教授
研究者番号: 70362415

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

菌頭元春 (Motoharu Sonogashira)
廣藤祐樹 (Yuki Hirofuji)
藤村有貴 (Yuki Fujimura)