

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：14401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K21286

研究課題名（和文）多視点・多光源イメージングによる高精細な3次元形状復元

研究課題名（英文）High-fidelity 3D reconstruction based on geometric and photometric modeling

研究代表者

山藤 浩明（Santo, Hiroaki）

大阪大学・大学院情報科学研究科・助教

研究者番号：40830906

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：物体の3次元形状復元はコンピュータビジョン分野において基礎的な要素技術の一つである。本研究課題では、とくに高精細な3次元形状復元のために、光源環境を変化させながら観測した画像（多光源画像）から得られる陰影情報から形状を推定する照度差ステレオ法と、多視点から観測した画像（多視点画像）の幾何学的関係から形状を推定する多視点ステレオ法を組み合わせた多視点照度差ステレオ法を提案した。物体の微細形状の推定を得意とする照度差ステレオ法と、大域的な形状推定を得意とする多視点ステレオを組み合わせることで、対象物体の高精細な全周形状を高精度に推定可能な手法を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

3次元復元技術は、ロボットによる周辺環境認識や、製造ラインにおける外観検査、貴重な文化財などの形状をデジタルデータとして保存するデジタルアーカイブ化など様々なアプリケーションでの活用が期待される。令和4年に改正された博物館法では、資料のデジタルアーカイブ化が博物館の事業の一つとして位置づけられ、資料のデジタルデータとしての保存とインターネットを通じた活用を積極的に推進していく姿勢が示されており、彫刻や土器などの立体作品のデジタルアーカイブ化には、とくに高精細な3次元復元技術が不可欠である。本研究課題で提案した、簡便かつ高精度な3次元復元技術はこうしたアプリケーションでの活用が期待される。

研究成果の概要（英文）：3D reconstruction from images is a fundamental problem in computer vision. This research project focuses on high-fidelity 3D reconstruction by combining two distinct approaches: (1) photometric stereo, which observes a target scene from a fixed viewpoint under varying lighting conditions to estimate the scene shape based on shading information, and (2) multi-view stereo, which observes a target scene from different viewpoints and recovers the 3D shape through triangulation. Photometric stereo can estimate detailed shapes, while multi-view stereo excels in capturing global shapes. By integrating these approaches, the proposed method can achieve highly accurate and detailed shape estimation.

研究分野：コンピュータビジョン

キーワード：3次元復元 デジタルアーカイブ 照度差ステレオ法 多視点ステレオ法

## 1. 研究開始当初の背景

物体の3次元形状復元はコンピュータビジョン分野において基礎的な要素技術の1つである。3次元形状復元技術は、ロボットや自動運転車における周辺環境認識や、製造ラインにおける外観検査、貴重な文化財などの形状をデジタルデータとして保存するデジタルアーカイブ化など様々なアプリケーションでの活用が期待される。令和4年に改正された博物館法では、資料のデジタルアーカイブ化が博物館の事業の1つとして位置づけられ、資料のデジタルデータとしての保存とインターネットを通じた活用を積極的に推進していく姿勢が示されており、彫刻や土器などの立体作品のデジタルアーカイブ化には、とくに高精細な3次元復元技術が不可欠である。また近年では、リモートコミュニケーションの需要が高まったことで、画像を超える情報伝達手段の1つとして、物体の高精度で高精細な3次元形状を獲得し、遠隔地で仮想的に再現する技術への注目が高まっている。

本研究では、とくに高精細な3次元形状復元のために、照度差ステレオ法と呼ばれるアプローチに注目する。ここで、照度差ステレオ法とは、光源環境を変化させながら対象物体を観測し、陰影の変化情報から物体形状を推定する技術である。本研究では、光源環境を変化させながら獲得する多光源観測と、さらに物体を観測する視点を変化させながら観測する多視点観測を組み合わせることで、高精細で高精度な推定を実現する。

## 2. 研究の目的

本研究で注目する照度差ステレオ法は、固定視点から光源環境を変化させながら対象物体を観測し、陰影の変化情報から物体形状を推定する3次元復元技術であり、とくに対象物体の微細形状の推定を得意とする。一方で、多くの既存の照度差ステレオは、固定の1視点からの観測を用いて、その視点からの形状、すなわち2.5次元形状、を推定する。しかし、多くの実アプリケーションでは、対象物体を全周囲など多視点から観測し、完全な3次元形状を復元することが求められる。そこで、本研究では、多視点から撮影した多光源画像を入力として3次元復元を行う多視点照度差ステレオ法（図1）の提案を目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、多視点・多光源画像から得られる幾何的な制約と測光学的な制約を統合的に扱うための、3次元形状の表現手法について検討を行った。また、多視点・多光源画像の撮影は、一般に多視点画像を撮影する場合に比較して撮影コストが高く、撮影コストの低減は実用性の向上に重要である。そこで、本研究では多光源画像を撮影する光源環境に工夫を加えた手法も提案した。

## 4. 研究成果

本研究では前述の2つの観点から研究を推進し、次のような成果を得た。

(1) 多視点・多光源観測から得られる制約を統合的に扱うために、微分可能レンダリングを用いた誤差の最小化による形状最適化のフレームワークを採用し、最適化の対象とする形状を方向付き点群によって表現する手法を提案した。多視点観測を用いることで、画像間の同一点を表す対応点ごとに三角測量の原理によってその点までの距離を求めることができる。一方で対応が取れない点に対しては推定を行えないため、密な形状推定が困難である。一方で、多光源観測からは観測画像のピクセル単位で陰影の情報が獲得できるため、密な形状推定が可能である。一方で、陰影情報から得られる制約は物体表面の傾き（法線方向）に対するものであり、法線から形状を求めるためには積分の操作を行う必要であることから、誤差が蓄積しやすいという課題がある。

本研究では、多視点観測から得られる幾何的な制約と、多光源観測から得られる測光学的な制約を統合的に扱うために、微分可能レンダリングを用いたフレームワークを採用した。ここでレンダリングとは、画像を生成するためのパラメータ、具体的には形状、光源、材質に関する情報を入力として画像を生成する操作のことであり、微分可能レンダリングは出力画像が入力のパラメータに対して微分可能なものである。微分可能レンダリングを用いることで、レンダリング画像を入力画像間の差異（再構成誤差）を最小化することによって、形状を求めることができる。本研究では、最適化の対象となる形状の表現として、方向付き点群を用いる手法を提案した。3

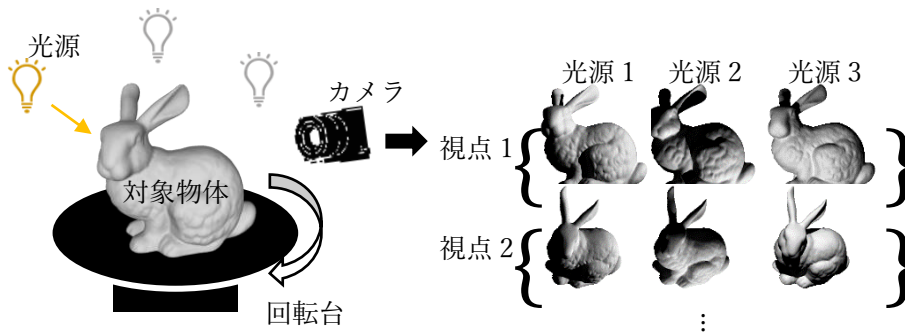


図 1 多視点照度差ステレオ法



図 2 対称光源による照度差ステレオ法

次元の点の集合である点群は、物体表面の 3 次元空間での位置を表し、その点の持つ方向は物体表面の法線方向を表す。方向付き点群は、ポアソン方程式を解くことによって、最終的にメッシュ表現の形状を復元できることが知られている。近年の研究では、この一連の操作を微分可能な形で実現する手法が提案されている。この手法を用いることによって、方向付き点群から微分可能な形でメッシュ形状を復元でき、さらにメッシュを微分可能レンダリングによって再構成誤差を計算することができる。一連の計算は入力である方向付き点群に対して微分可能であることから、再構成誤差を用いて点群の位置及び方向を最適化することで、形状を推定できる。既存の手法では、メッシュ表現を用いるものや、ニューラルネットワークによる形状表現、具体的には物体表面からの距離場を表す signed distance field (SDF) や物体の専有場を表す (Occupancy field) などが挙げられる。しかしながら、メッシュ表現を用いる手法には、物体のトポロジー変化を表現できないという欠点があり、表現できる形状が制限される、またはトポロジーの観点から正確な初期値が必要という欠点があった。一方でニューラルネットワークを用いる手法では、柔軟な形状表現が可能な一方で、初期値として任意の形状を用いることが困難であり、また最適化に時間がかかるという課題があった。これらの手法に対して、提案手法では、点群による表現を用いることで任意の形状を表現可能であり、かつ例えば多視点ステレオ法などで求めた形状を初期値として容易に利用可能である。さらに、点群数を徐々に増やしていくアプローチを採用することにより効率的な最適化が可能である。

(2) 一般に照度差ステレオ法では、カメラと周辺に固定された数十の光源を用いて画像を撮影する必要があり、さらに多くの手法において、事前に光源校正を実施する必要があることから、撮影コストが高い。さらに物体の全周を復元するために多視点から撮影する場合は、各視点で多光源画像を撮影する必要があることから、撮影コストを低減することは重要である。そこで、本研究では、光源配置に工夫を加え少数の光源で形状を推定できる、対称光源による照度差ステレオ法[1]を拡張し、多視点観測から形状を推定する手法を提案した。

ここで、対称光源による照度差ステレオ法とは、カメラを中心に上下左右対称に配置された 4 つの光源 (図 2) を用い、その対称性から物体表面の法線方向のうち方位角を推定する手法である。法線の仰角を推定することができないため、法線方向が一意に定まらないという欠点があるものの、4 つという少数の光源を用いて形状に関する一定の制約を推定でき、かつ光源の絶対位置の校正が不要であるため撮影コストの低い。

単視点から得られた方位角の情報のみから形状を復元することは不可能であり、物体表面の反

射率に関するクラスタリングなどを適用することで最終的な形状を推定する。本研究では、多視点観測を用いることでこの問題を解決する手法を提案した[2]。多視点から観測される場合、具体的には 3 つ以上の視点から法線の方位角が推定できる場合、法線方向が一意に拘束されることを示した。この条件を用いて、ニューラルネットワークによって表現される形状 (signed distance field: SDF) の法線方向を最適化することで形状を復元する。

多視点照度差ステレオ法と比較した場合、対称光源による照度差ステレオ法を用いることで撮影コストの大幅な低減を実現した。既存の対称光源による照度差ステレオ法と比べた場合、提案手法は多視点から観測した方位角の情報のみから一意に解を定めることができる。また、対称光源による照度差ステレオ法の他に、方位角は偏光情報からも獲得することができ、とくに偏光板を CCD センサ上に構造的に配置した偏光カメラを用いた場合、各視点で 1 枚の画像を撮影するのみで方位角を推定することができる。この場合一般的な多視点ステレオ法と同等の撮影コストで、提案手法を適用することができ、方位角に関する制約を用いることで少ない観測視点数で、より高精細な形状推定を実現した。

[1] Kazuma Minami, et al., “Symmetric-light Photometric Stereo”, WACV 2022.

[2] Xu Cao, et al., “Multi-View Azimuth Stereo via Tangent Space Consistency,” CVPR 2023.

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 2件）

1. 発表者名 Kazuma Minami; Hiroaki Santo; Fumio Okura; Yasuyuki Matsushita
2. 発表標題 Symmetric-light Photometric Stereo
3. 学会等名 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Xu Cao, Hiroaki Santo, Fumio Okura, Yasuyuki Matsushita
2. 発表標題 Multi-View Azimuth Stereo via Tangent Space Consistency
3. 学会等名 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (国際学会)
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
---------	---------