

令和元年6月7日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H01732

研究課題名(和文) 光を用いた高精細3次元イメージングの実世界応用に向けた展開

研究課題名(英文) High-fidelity Photometric 3D Imaging and its Applications

研究代表者

松下 康之 (Matsushita, Yasuyuki)

大阪大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：30756507

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,200,000円

研究成果の概要(和文)：カメラを用いた実世界物体の3次元形状推定はコンピュータビジョンの重要な基盤技術であると共に、ロボットの制御、計算機による物体認識、車の自動走行、製品の品質検査など、幅広い応用が期待されている。3次元形状推定においては、光を利用する光学的アプローチによって高品質な形状推定が可能になることが明らかになっている。本研究では、光学的3次元イメージング技術の高度化に取り組み、特に(a)多様な対象物体を扱えるようにする、(b)簡便なセットアップで使いやすくする、ことを目的に研究を行った。結果として、新しい3次元イメージング技術を開発し、これらの目標を達成することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究成果の学術的意義は大きく2点ある。一つは、これまで必須と考えられてきた光源強度のキャリブレーションが不要であることを理論的に示し、新たな照度差ステレオ技術を提案した(semi-calibrated photometric stereo)。この結果により、実際のアプリケーションにおいてもキャリブレーションの手間が緩和できることがわかった。二つ目は、機械学習と光学的3次元イメージングの方向性を打ち出したことである。具体的には深層学習を用いてこれまで困難であった反射特性のモデリングをバイパスし、見えと形状のマッピング関数を学習させるというアプローチ世界に先駆けて提案した。

研究成果の概要(英文)：3D imaging of real-world objects using a camera is a central problem in computer vision due to its wide application areas such as robot control, object recognition by machines, autonomous driving, and product inspection. It has been understood that 3D imaging with photometric information enables high-fidelity acquisition of 3D shape. In this work, we advance the photometric 3D imaging technology with an emphasis on enabling (a) 3D measurement of surfaces with diverse reflectances, and (b) an easy-to-use imaging setup. As a result, we have developed a thread of new photometric 3D imaging technologies and achieved the intended goals.

研究分野：コンピュータビジョン

キーワード：コンピュータビジョン 3次元形状推定

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

カメラを用いた実世界物体の3次元形状推定はコンピュータビジョンの重要な基盤技術であると共に、ロボットの制御、計算機による物体認識、車の自動走行、製品の品質検査など、幅広い応用が期待されている。これまで3次元形状推定は主に**光学的アプローチ**と**幾何学的アプローチ**の2つのアプローチに基づき研究されてきた。この中で、光学的情報を利用することで品質の高い3次元形状推定が可能となることが明らかになっている。既存の光学的3次元形状推定手法は、以下に述べる課題が残り広く使われにくいという問題点があった。

(a)単純な反射モデルに起因する推定誤差 ... 過去の多くの手法では、物体表面の反射は線形なランバート反射モデルを仮定して形状を推定するが、現実には線形反射モデルに忠実に従う素材は存在せず、精度に課題があった。

(b)煩雑な光源キャリブレーション: 先行研究では、光源の位置・輝度の両方を正確に知っておく必要があり、そのキャリブレーションに手間がかかるという課題があった。

(c)狭い適用範囲: これまでの光学的3次元形状推定は、通常のカメラを用いて日常物体を対象として研究開発されてきた経緯があり、他分野の研究や産業応用への適用可能性が積極的に示されてこなかった。

2. 研究の目的

本研究課題では、上述の背景を踏まえて限定的な条件を取り除くべく理論構築と実証実験を行い、開発した技術の適用可能な範囲を明らかにする。具体的には、**実環境において有効な高精細3次元イメージング技術の開発**を目的とする。特に、線形反射モデルや既知の並行光源といった実際の環境にとって不適当な限定的な仮定を、個別にではなく総合的に取り除くことで、現実的な環境でも有効な高精細3次元イメージング技術を確立する。さらに簡便な光源のキャリブレーション技術を開発する。また、**科学と産業を意識した3次元イメージングの展開**し、光学的3次元イメージング技術を科学・産業の分野においてインパクトのあるセッティングに適用することで、その有効性を示すと共に広い応用性を示す。同時に、本研究で開発する先進的な最適化アルゴリズムとその実装であるソフトウェアの整備とガイドラインの作成を進め、広く利用される技術としての土台を作る。

3. 研究の方法

本研究課題では、(A) 実環境において有効な高精細3次元イメージング技術の開発、(B) 科学と産業を意識した3次元イメージングの展開、(C) そのアルゴリズム、ソフトウェア実装の拡充を行った。3年間の研究期間のうち、初年度は光源・撮影システムの試作と実験環境の整備、実環境下における照度差ステレオ法の定式化を行い、研究の土台を固めた。2年目に、1年目の知見をもとにアルゴリズム開発と検証を行い、項目(A)、(B)の達成を目指す。3年目には、すべての技術を統合して総合的な検証・評価を行い、項目(A)、(B)の最終的な改善と、その結果の実用化に向けて項目(C)とアプリケーション開発を進めた。

4. 研究成果

(A) 「実環境において有効な高精細3次元イメージング技術の開発」において、大きくは3つの成果があった。

1. Semi-calibrated photometric stereo ... 既存の照度差ステレオ法では、3次元形状を推定するために、光源の方向と輝度の両方を既知として定式化されていた。本研究において、このうち光源の輝度に関する情報は未知であっても、ユニークな3次元形状の推定が可能であることが明らかになった。この進展により、これまで必要であった輝度のキャリブレーションが不要となり、セットアップの手間が大幅に簡略化できるようになった。また、開発した手法を用いることでカメラの露光時間に関する知識も不要となることが明らかになった。これにより、任意(かつ未知の)露光時間で撮影された画像からの3次元形状推定も可能となった。

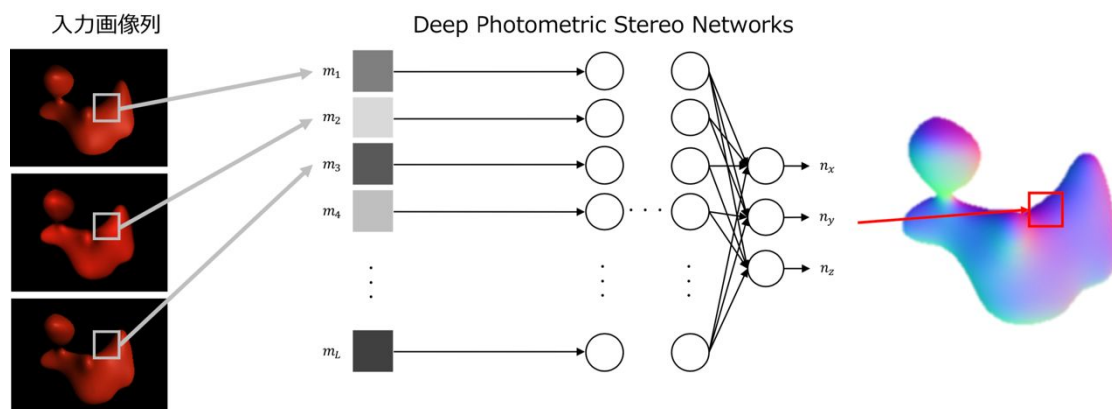


図 1 深層学習を用いた照度差ステレオ技術

2. 深層学習を用いた照度差ステレオ(図1) ... 照度差ステレオ法では物体表面の反射特性を仮定して3次元形状を推定する。既存手法の多くは単純なランバート拡散反射モデルを仮定するが、実世界の多くの物体はこのモデルには沿わない反射特性を持っている。一方で、より複雑なモデルを用いて多様な反射特性をモデル化しても3次元形状を推定する際の計算が複雑になるという問題があった。そこで本研究では深層学習を用いて物体の見えと形状のマッピング関数を直接的に学習することで、多様な反射特性を持つ物体に対応する照度差ステレオ法を開発した。その結果として、Deep Photometric Stereo Networks という枠組みを提案し、国際会議 International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)において最優秀論文賞を受賞した。この成果は内外に大きな影響をもたらし、複数の研究グループにおいてこれを拡張する研究が進められている。

3. 光源位置・方向のキャリブレーション ... 光学的な3次元イメージングでは光の位置あるいは方向を正確にキャリブレーションすることは、高精度な3次元形状推定のために重要である。本研究では、Structure from Motionの技術を発展させ、簡易なキャリブレーションターゲットから精度よく光源位置・方向を推定する手法を開発した。具体的には、ARマーカーを付した平面上の任意の位置にピンを刺し(以下、これをキャリブレーションターゲット(図2)と呼ぶ)、このキャリブレーションターゲットを光源下で動かしながらカメラで撮影する。この画像列からピンヘッドが落とす影を観察することにより、ピンヘッドの位置と光源位置もしくは光源方向を同時に推定する技術である。この技術により、光源位置・方向のキャリブレーションが容易になり、また簡易なキャリブレーションターゲットのデザインにより産業応用が期待できる技術となった。

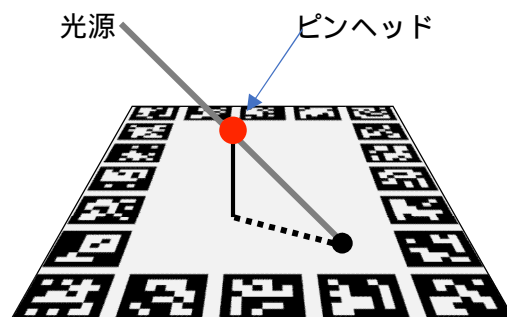


図2 光源位置・方向推定のキャリブレーションターゲット

(B) 「科学と産業を意識した3次元イメージングの展開」として、2つの実用的なセットアップを提案した。一つは顕微鏡に取り付け可能な照度差ステレオ用LED光源を開発し、マイクロスケール物体の3次元形状推定が可能となった(図3)。また、2眼ステレオと照度差ステレオ用光源からなる、日用品スケールの物体を対象とした3次元イメージングデバイスを開発した。これらのセットアップを用いて、コイン表面のキズの復元や胸像の3次元形状復元などの応用を示した。

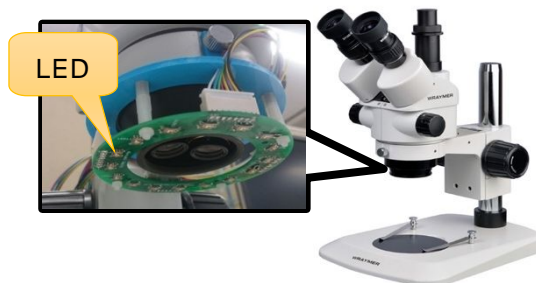


図3 顕微鏡照度差ステレオデバイス

(C) アルゴリズム、ソフトウェア実装の拡充に関して、基本的な照度差ステレオアルゴリズムとより先進的なロバスト推定に基づく照度差ステレオアルゴリズムの開発及び、そのソフトウェア実装を行った。具体的には、L1ノルム最小化やSparse Bayesian Learningに基づくスパース回帰を利用した、ロバストな照度差ステレオアルゴリズムである。また、前述のSemi-calibrated photometric stereo に関してアルゴリズムのソフトウェア実装を行った。これらの実装は以下[1,2]のGitHubページにて広く一般に公開している。

[1] <https://github.com/yasumat/RobustPhotometricStereo>

[2] <https://github.com/yasumat/SemiCalibratedPS>

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

Donghyeon Cho, Yasuyuki Matsushita, Yu-Wing Tai, In-So Kweon: Semi-calibrated Photometric Stereo, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), DOI: 10.1109/TPAMI.2018.2873295. (査読有)

Hiroaki Santo, Masaki Samejima, Yasuyuki Matsushita: Numerical shape-from-shading revisited, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, Vol. 10, No. 8, pp. 1-8, 2018. (査読有)

Jaesik Park, Sudipta N. Sinha, Yasuyuki Matsushita, Yu-Wing Tai, In So Kweon: Robust Multiview Photometric Stereo Using Planar Mesh Parameterization, IEEE

Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), Vol. 39, No. 8, pp. 1591-1604, 2017. (査読有)

[学会発表](計5件)

Hiroaki Santo, Michael Waechter, Masaki Samejima, Yusuke Sugano, Yasuyuki Matsushita: Light Structure from Pin Motion - Simple and Accurate Point Light Calibration for Physics-Based Modeling, Proceedings of European Conference on Computer Vision (ECCV), pp. 3-19, 2018. (査読有)

Zhipeng Mo, Boxin Shi, Feng Lu, Sai-Kit Yeung, Yasuyuki Matsushita: Uncalibrated Photometric Stereo under Natural Illumination, Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2018. (査読有)

Hiroaki Santo, Masaki Samejima, Yusuke Sugano, Boxin Shi, Yasuyuki Matsushita: Deep Photometric Stereo Network, Proceedings of International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW), pp. 501-509, 2017 (査読有)

Masaki Samejima, Yasuyuki Matsushita: Fast General Norm Approximation via Iteratively Reweighted Least Squares, Proceedings of Asian Conference on Computer Vision Workshops (ACCVW), pp. 207-221, 2016. (査読有)

Donghyeon Cho, Yasuyuki Matsushita, Yu-Wing Tai, In-So Kweon: Photometric Stereo Under Non-uniform Light Intensities and Exposures, Proceedings of European Conference on Computer Vision (ECCV), pp. 170-186, 2016. (査読有)

[その他]

ホームページ等: <http://www-infobiz.ist.osaka-u.ac.jp/>

ソースコード等:

[1] <https://github.com/yasumat/RobustPhotometricStereo>

[2] <https://github.com/yasumat/SemiCalibratedPS>

論文等: <http://www-infobiz.ist.osaka-u.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1)研究協力者

研究協力者氏名: 田川 聖一、八木康史、池内克史

ローマ字氏名: TAGAWA SEIICHI、YAGI YASUSHI、IKEUCHI KATSUSHI

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、研究者個人に帰属されます。