

令和 3 年 5 月 13 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03309

研究課題名(和文)スケール復元可能なStructure from Motion

研究課題名(英文)Scale-reconstructible Structure from Motion

研究代表者

山下 淳(Yamashita, Atsushi)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：30334957

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、光の屈折現象を利用することにより、スケール復元可能な Structure from Motion (以下、SfM) を新規に構築することである。SfMは1台のカメラを移動させながら取得した画像のみを用いて、3次元計測を行う手法である。従来のSfMは、計測対象の3次元座標と同時に、カメラの移動情報、すなわちカメラの回転と並進移動の方向を推定する。一方で、カメラの並進移動の大きさ(スケール)を算出することはできない。そこで本研究では、レンズの前面に透明板を設置したカメラを移動させることのみで、2次元画像とシーンの3次元情報を同時に取得する方法を新規に構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

カメラの登場により、3次元空間を撮影することによって、撮影対象を2次元の画像として保存することが可能となった。本研究では、カメラの前に透明な平板を設置するのみで、3次元の撮影対象を色付きの3次元のデータとして保存することが可能である。カメラを用いた本質的な3次元計測原理を新規に開拓した点が、本研究の学術的・社会的意義である。

研究成果の概要(英文)：Structure from motion is a three-dimensional (3D) reconstruction method that uses one camera. However, the absolute scale of objects cannot be reconstructed by the conventional structure from motion method. In this research, we proposed a scale reconstructible structure from motion method by using refraction. In our measurement system, a refractive plate is fixed in front of a camera and images are captured through this plate.

In this study, to robustly apply this method to an actual measurement with real images, we introduced a novel bundle adjustment method based on the refraction effect. This optimization technique can reduce the 3D reconstruction errors caused by measurement noise in actual scenes. To evaluate the effectiveness of the proposed method, experiments using both simulations and real images were conducted. Simulation and experiment results show the effectiveness of the proposed method.

研究分野：ロボット工学

キーワード：Structure from Motion スケール復元 3次元復元 コンピュータビジョン 光の屈折

1. 研究開始当初の背景

3次元計測手法の1つである Structure from Motion は、1台のカメラを移動させながら取得した複数画像を用いて計測対象の3次元計測を行う技術であり、ドローンによる航空測量から地上移動ロボットによる位置推定・ナビゲーションに至るまで幅広く活用されている。

Structure from Motion では、計測対象の3次元座標と同時に、カメラの移動情報、すなわちカメラの回転と並進移動の方向を推定する。一方で、カメラの並進移動の大きさ(スケール)を算出することができず、従って計測対象の大きさを求めることができない。これは、カメラによる画像撮影では、近くの小さい物体を撮影したのか、遠くの大きい物体を撮影したのか、画像のみからは区別できないことに起因する。図1に示すように、初期位置から少し移動したカメラ位置Aから小さな計測対象Aを撮影した画像と、大きく移動したカメラ位置Bから大きな計測対象Bを撮影した画像は完全に同一である。よって、1台のカメラを移動させて撮影する状況、つまり計測対象の3次元位置だけでなくカメラの移動量も未知な状況で計測を行う Structure from Motion では不定性が残る。以上の理由により、Structure from Motion によりスケールを復元することは原理的に不可能である。

その一方で、測量や環境地図生成では、スケールの情報が必要不可欠である。また、障害物にぶつからないように移動ロボットのナビゲーションを行うためには、ロボットと障害物間の絶対距離の情報が必要不可欠である。そこで Structure from Motion をベースとして用いた従来の地図生成やナビゲーションでは、例えばGPSや加速度計など別のセンサを併用してカメラの移動量の推定している。つまり、従来の Structure from Motion では画像以外の情報からスケール情報を獲得している。

シーンの3次元計測は、2次元情報から3次元情報を復元する逆写像を求めることに相当し、様々な仮定や前知識となる画像以外の情報(例えば他のセンサから得られる情報)を用いないと、一般的には解くことができない問題である。本研究課題の核心をなす学術的な問いは、2次元画像のみから3次元シーンを復元できないか?である。

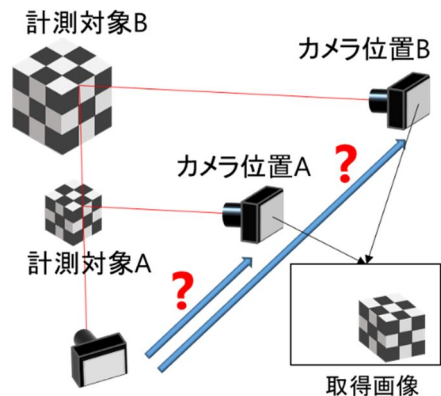


図1 Structure from Motion におけるスケール不定性

2. 研究の目的

本研究では、光の屈折現象を利用することにより、スケール復元可能な Structure from Motion を新規に構築することを目的とする。具体的には、レンズの手前に透明板を設置したカメラを用いるのみで、つまりカメラのレンズ部分を透明な保護ケースで覆うだけで3次元シーン復元を可能とする全く新しい手法を構築することを目指す。

これまでカメラは2次元画像のみを保存する装置であった。本研究は、カメラ部分を透明な保護ケースで覆うだけで、スマートフォンに代表される身近な機器を、撮影対象の3次元情報そのものを保存する装置に変えることができる提案である。

理論的には多くの新規な内容を多く含む一方で、これまでのカメラ撮影からの変更点が唯一かつ単純であることこそが、本研究の独自性と創造性を表す大きな特徴である。本研究における見かけ上の唯一の工夫は、カメラの前に透明な板を配置して画像を取得することである(図2)。これにより屈折が発生しカメラに入射する光線が変化する。薄い透明平板を使用した場合、平板への入射光の方向は平板内部では変化するものの、平板から出た後は入射光と同一の方向となる。従って、透明平板を通して撮影した画像は、透明平板を通さないで撮影した画像と比較しても、形状が大きく変化して見えるような歪みは発生せず、通常の画像に見える。一方で、屈折による光の位置のシフト量は、光が入射した場所、言い換えると撮影対象の場所によって異なる。このシフト量を、ステレオカメラにおける視差(左カメラと右カメラでの見え方の違い)のように利用して用いることで、スケール情報を復元することが本研究のアイデアである。

本研究の特色は、通常のカメラの前に透明な平板を設置するだけで、計測対象の精密な3次元計測ができる点である。人間が観察する分には通常のカメラで撮影した画像と同じように見える歪みのない画像が得られると同時に、これまで誰も気にしなかったような微小な屈折量を積極的に利用することで、これまででは不可能であった3次元情報を取得可能である点が特徴であり、同時に、高い実用性と幅広い応用範囲を兼ね備える。

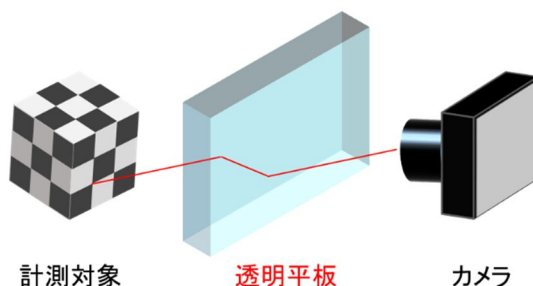


図2 透明平板を通した撮影

3. 研究の方法

(1) スケール復元可能な Structure from Motion 手法の基本原理の確立

カメラの前に透明な平板を配置して画像を取得することを考える。これにより、屈折が発生しカメラに入射する光線が変化する。屈折の効果は、カメラと計測対象の位置によって異なるため、前述の大きさの不定性が解消され、計測対象のスケールも算出可能となる。本原理の定式化を行い、計測の基本原理の確立を図る。

(2) 2 視点画像を用いた 3 次元計測

(1)で構築した原理を用いて、カメラの初期位置で取得した画像、および初期位置から別の位置に移動させて撮影したときの画像の 2 視点からの画像を用いて計測対象の 3 次元計測を行う手法を新規に構築する。具体的には、カメラの移動量が未知な条件において、カメラとカメラの前に設置した透明な平板を一緒に移動させるのみで、カメラの位置・姿勢の移動量と計測対象の 3 次元形状・3 次元位置・3 次元姿勢を同時に計測する手法を提案する。ここでは、屈折環境における多視点計算幾何学を新規に構築し、Structure from Motion でのスケール復元を実現する。

(3) 複数視点画像を用いた 3 次元計測

(2)の手法を発展させ、カメラと透明な平板を移動させながら複数視点で画像を取得し、取得した画像群のみを用いて、カメラの位置・姿勢の移動量(軌跡)と計測対象の 3 次元形状・3 次元位置・3 次元姿勢を精密に計測する手法を新規に構築する(図 3)。2 視点間のみで計測した結果を単純に繋げていくと、計測誤差が累積して、全体の計測結果が大きく歪むことが多い。全体の整合性がとれる最適化計算を用いることにより、この問題を解決する。

更に Structure from Motion で用いられているバンドル調整と呼ばれる手法の理論を新規に屈折環境に拡張し、屈折環境におけるバンドル調整を新規に構築する。これにより、画像処理時に発生する誤差(対応点検出の間違い)と微小な屈折率を区別し、誤差に対してロバストな計測を確立し、実画像を用いた計測を実現する理論構築を行う。

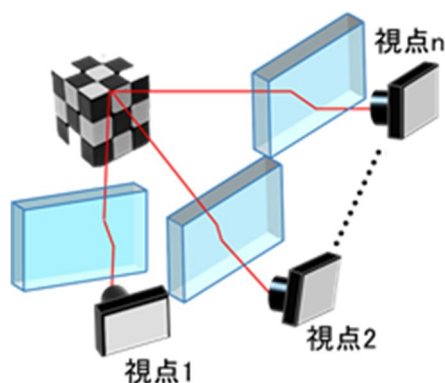


図 3 透明平板を通した多視点撮影

4. 研究成果

シミュレーション実験および実機実験により提案手法の有効性の検証を行った。実機実験結果の一例を以下に示す。Canon 製のデジタル一眼レフカメラ EOS 5Ds R の前に厚さ 50.6mm のアクリル板(屈折率 1.49)を設置して、複数地点から計測対象を撮影した(図 4)。計測結果(図 5)より、スケールを含めて計測対象の 3 次元形状が復元されていることが確認された。

以上、本研究では、レンズの手前に透明板を設置したカメラを用いるのみで、3 次元シーンを復元を可能とする、スケール復元可能な Structure from Motion を新規に構築した。

カメラの登場により、3 次元空間を撮影することによって、撮影対象を 2 次元の画像として保存することが可能となった。本研究は、カメラの前に透明な平板を設置するのみで、3 次元の撮影対象を色付きの 3 次元のデータとして保存することを可能とする手法である。よって本研究は、カメラを用いた本質的な 3 次元計測原理を新規に開拓することに相当し、学術的な意義が極めて大きい。

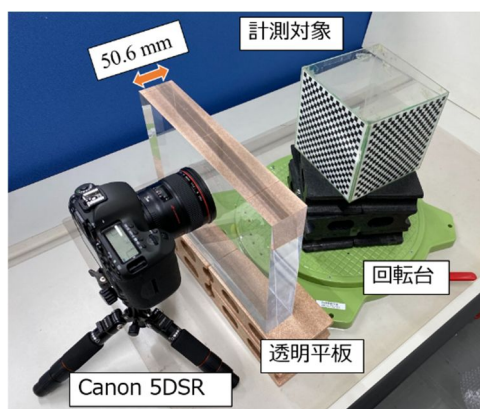


図 4 実機計測実験の様子

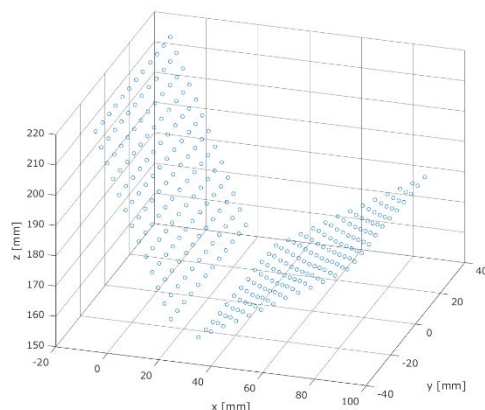


図 5 3 次元計測結果

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 0件）

1. 著者名 Akira Shibata, Yukari Okumura, Hiromitsu Fujii, Atsushi Yamashita and Hajime Asama	4. 巻 Vol. 30, No. 4
2. 論文標題 Refraction-based Bundle Adjustment for Scale Reconstructible Structure from Motion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 660-670
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2018.p0660	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 Xiaorui Qiao, Yonghoon Ji, Atsushi Yamashita and Hajime Asama	4. 巻 Vol. 52, No. 22
2. 論文標題 Structure from Motion of Underwater Scenes Considering Image Degradation and Refraction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IFAC PaperOnLine	6. 最初と最後の頁 78-82
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ifacol.2019.11.051	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 Xiaorui Qiao, Atsushi Yamashita and Hajime Asama	4. 巻 Vol. 31, No. 4
2. 論文標題 Underwater Structure from Motion for Cameras under Refractive Surfaces.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 603-611
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2019.p0603	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 後田 啓太郎, 樋口 寛, 山下 淳, 浅間 一	4. 巻 Vol. 87, No.3
2. 論文標題 屈折の大きさを考慮したスケール復元可能なStructure from Motion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 精密工学会誌	6. 最初と最後の頁 301-306
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2493/jjspe.87.301	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 奥村 有加里, 藤井 浩光, 山下 淳, 浅間 一
2. 発表標題 屈折を用いたスケール復元可能なStructure from Motionの誤対応点への頑健化
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'18 (ROBOMECH2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 後田 啓太郎, 樋口 寛, 山下 淳, 浅間 一
2. 発表標題 屈折を利用したスケール復元が可能なStructure from Motionによる屈折量が小さい状況下におけるスケール復元の精度向上
3. 学会等名 ビジョン技術の実利用ワークショップ (ViEW2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xiaorui Qiao, Atsushi Yamashita and Hajime Asama
2. 発表標題 3D Reconstruction for Underwater Investigation at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Using Refractive Structure from Motion
3. 学会等名 International Topical Workshop on Fukushima Decommissioning Research (FDR2019)
4. 発表年 2019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
研究分担者	浅間 一 (Asama Hajime) (50184156)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授 (12601)	

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
---------	---------