

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14181

研究課題名(和文) フィードバックプロジェクションによる汎用的かつ高精度な三次元計測

研究課題名(英文) Feedback projection for 3D measurements under complex lighting conditions

研究代表者

荒井 翔悟 (ARAI, SHOGO)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80587874

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：プロジェクタ-カメラを用いたアクティブステレオ法は、環境光の変化にロバストで計測対象の表面模様の有無に関わらず三次元計測可能である。この方法では、事前に設計された複数のパタン光を照射し、反射光をカメラで撮像することで三次元計測を行う。しかし、材質の異なる対象が混在するシーンの計測や想定した光学特性からの変化に対してロバストに計測を行うことが難しい。この問題を解決するため、カメラの撮影画像をフィードバックし、プロジェクタによる照射パタン光を動的に計算するフィードバックプロジェクションによる三次元計測法を提案した。

研究成果の概要(英文)：Active stereo methods can measure an object no matter with or without textures on its surface robustly against changes of light environment. The active stereo methods perform 3D measurement by projecting multiple pre-designed pattern lights on the object with a projector and capturing the reflected light with a camera. However, it is difficult for the existing active stereo methods to measure the objects with different optical properties with high accuracy and to perform 3D measurement robustly against changes from assumed optical characteristics. To solve this problem, we have proposed a novel method of 3D measurement with feedback projection. The proposed method computes the pattern lights dynamically based on the feedbacked images captured by the camera.

研究分野：制御工学

キーワード：三次元計測 フィードバック

### 1. 研究開始当初の背景

高解像度・高フレームレートなカメラ，ならびにプロジェクタが低価格で入手可能になったことで，工業部品，人の体型，文化財・美術品など，さまざまな対象をプロジェクタ-カメラを用いて三次元計測するケースが増大している。

プロジェクタとカメラを用いたアクティブステレオ法では，プロジェクタから予め決められた複数のパターン光を照射し，計測対象表面の反射光をカメラによって撮像する(図1)．この照射パターン光の設計が三次元計測精度に大きく影響する．これまで，計測対象(金属製品，半透明物体など)表面の光学特性に応じて様々なパターン光が提案されてきた．しかし，たとえば一口に半透明物体と言っても対象によって光の透過率が異なるため，あらゆる透過率に対して高精度な計測を行うことはできない．さらに，このアプローチでは様々な材質が混在するシーンの高精度計測が難しい．

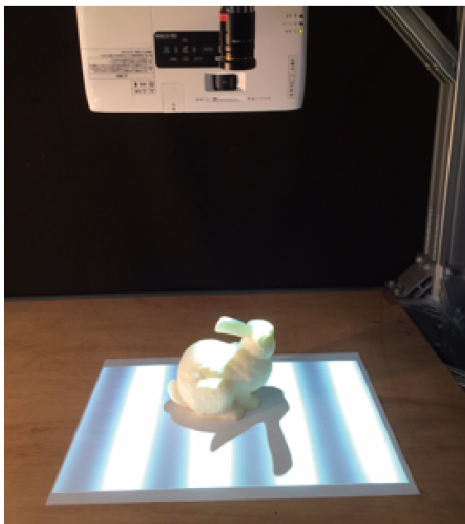


図1: プロジェクタ-カメラシステムを使ったアクティブ三次元計測システム

### 2. 研究の目的

この問題を解決するため，投影パターン光を事前設計するのではなく，動的にパターン生成と三次元復元計算を行う「フィードバックプロジェクションによる三次元計測」という概念を提案し，汎用的かつ高精度な三次元計測法を構築することを目的とする．

「フィードバックプロジェクションによる三次元計測」では，以下のプロセスで三次元計測を行う(図2)．A. 予め決められたパターン光を一度照射する．B. 対象からの反射光をカメラで計測する．C. Light Transport Matrix(次ページで説明)を推定する．D. 次の照射によって，推定の曖昧さが最低になるよ

うな最適な投影パターンを高速計算し，投影する．E. B~Dのプロセスを繰り返し，最終的に得られたLight Transport Matrix(LT行列)から三次元復元計算を行う．

したがって，本研究では，Light Transport Matrix(LT行列)の推定(項目C)と最適な投影パターン的高速計算(項目D)に必要なアルゴリズムを構築する．

※Light Transport Matrix: プロジェクタの照射輝度とカメラで観測される輝度の関係は， $c = Wp$  で表現できる( $c$ :カメラの各画素で観測される輝度を縦に並べたベクトル， $p$ :プロジェクタの照射輝度のベクトル)．行列  $W$  はLight Transport Matrix(LT行列)と呼ばれる「カメラとプロジェクタ間の画素の対応関係を表す行列」である．この対応関係が分かれば三角測量の原理で三次元復元が可能であるため， $W$  を求める必要がある．この関係式を変形(列展開)すると， $c = Pw$  という関係式を得る． $w$  は  $W$  の要素が並んだベクトル． $P$  はプロジェクタの照射輝度に依存する行列である．本研究では，この関係式を使って， $w$  を求めることを目的とする．

### 3. 研究の方法

「フィードバックプロジェクションによる三次元計測」では，以下のプロセスで三次元計測を行う(図2)．1. 予め決められたパターン光を一度照射する．2. 対象からの反射光をカメラで計測する．3. Light Transport Matrix(LT行列)を推定する．4. 次の照射によって，推定の曖昧さが最低になるような最適な投影パターンを高速計算し，投影する．5. 2~4のプロセスを繰り返し，最終的に得られたLight Transport Matrix から三次元復元計算を行う．以下，研究方法の詳細について記述する．

#### (1) プロジェクタ-カメラシステムの構築

プロジェクタ-カメラシステムを構築する．用いるカメラは Flea3 を予定している．Flea3 は，4K 解像度(4096×2160)で撮影が可能で，ビニング処理にも対応しているため，解像度変更の自由度が要求されるシステムに適している．プロジェクタは EB-1776W の使用を予定している．システム構築後，計測精度に大きな影響を与えるプロジェクタの光学特性(輝度階調特性，照度の空間的ばらつきなどの把握のために校正実験を行う．本研究では，プロジェクタ-カメラ間の光学的関係が LT 行列を介して線形になることを仮定する．この仮定を成立させるため，予め光学的関係を同定し，その結果を輝度変換テーブルに記録する．

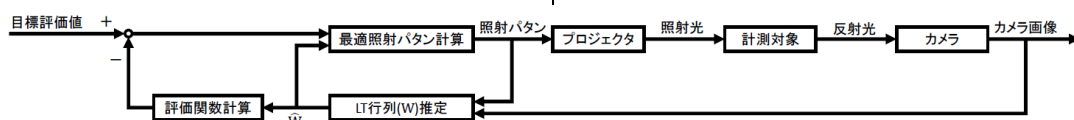


図2: フィードバックプロジェクションによる三次元計測システムのブロック線図

## (2) LT 行列推定アルゴリズムの構築

LT 行列の推定方法を提案する。数枚の照射画像とカメラ画像から LT 行列を求める問題は、不定である。そのため、まず、プロジェクタ-カメラを使ったアクティブ三次元計測についての考察を行い、LT 行列が満たすべき拘束条件を定式化する。拘束条件を考慮しても求めたい未知数の数 (LT 行列の要素数) よりも少ない観測データから解を求める必要があると予想される。この問題を解決するために、2000 年代から発展した圧縮センシングに関する理論的な成果を利用することで、LT 行列を推定するアルゴリズムの構築を行う。

## (3) 最適照射パターン計算アルゴリズムの構築

アクティブ三次元計測方では、どのような照射パターンを使用するかが三次元計測精度に大きな影響を与える。本研究では、照射パターンを事前に設計しておくのではなく、対象に応じて最適な照射パターンの計算を行うため、動的な照射パターン計算アルゴリズムが必要となる。少ない照射回数で LT 行列の推定誤差を最小化するためのアルゴリズムを構築する。

## 4. 研究成果

研究成果について、項目ごとに下記で説明する。

### (1) プロジェクタ-カメラシステムの構築

プロジェクタ-カメラシステムの構築を行った。ハードウェアの選定後、システムを構築し、計測精度に大きな影響を与えるプロジェクタの光学特性の把握のために校正実験を、およびプロジェクタ-カメラ間の相対位置姿勢計算のための校正試験を実施した。

### (2) 原理検証

4(1) で構築したプロジェクタ-カメラシステムを使って、LT 行列の推定結果に基づき、三次元計測結果が可能か確認するための原理検証実験を実施した。実験では、プロジェクタ-画素毎の照射、およびカメラでの撮像を行い、LT 行列を取得した。つぎに、取得された LT 行列から三次元復元計算を実施した。計測対象物体として不透明半球、金属半球、半透明半球を使用した。また、比較のため、ブロックマッチング法と位相シフト法による三次元復元計算をあわせて行った。結果を図 3 に示す。図 3 に示す通り、LT 行列が正確に推定できれば、他の三次元計測法では計測が難しい対象に対しても、正確な三次元復元計算が可能であることが分かる。

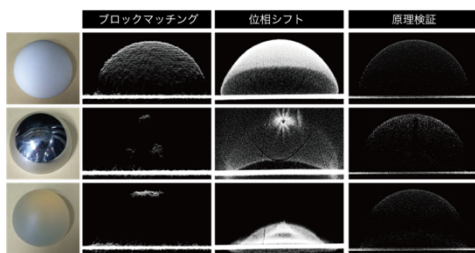


図 3: 提案した三次元計測法の原理検証

## (3) LT 行列推定アルゴリズムの構築

項目 3(2) に記載したとおり、LT 行列が満たすべき条件について考察を行った。各条件を定式化して、最適化問題の拘束条件に設定すると問題を解くのが困難であったため、LT 行列推定のための評価関数に各条件を緩和して導入した。以下、導入した各条件について説明する。

(条件 1: エピポーラ拘束): プロジェクタ-カメラ系では、図 4 に示すように、あるプロジェクタ画素に対応するカメラ画素は、カメラ撮像面内のエピポーラ線と呼ばれる直線上に必ず存在する。各プロジェクタ画素に対応するエピポーラ線は、項目 4(1) で求められたプロジェクタ-カメラ間の相対位置姿勢から計算できる。

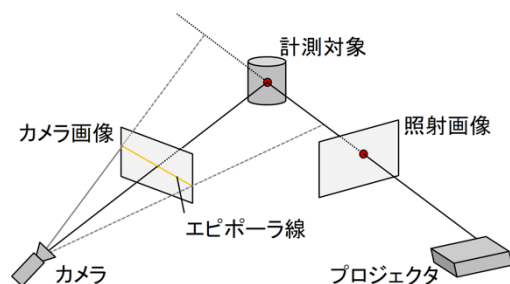


図 4: エピポーラ拘束条件。プロジェクタの各画素は、カメラ画像内の対応するエピポーラ線上の一点に対応する。事前キャリブレーション(プロジェクタ-カメラ間の相対位置姿勢を求める)によって、エピポーラ拘束条件を求めておくことができる。

(条件 2: エピポーラ線上の輝度の単峰性):

条件 1 では、各プロジェクタ画素に対応するカメラ画素がエピポーラ線上にあることを規定した。一般に、プロジェクタの画素から出た光は、いくつかのカメラ画素で観測される。この場合、図 5 右図に示す通り、対応するカメラの画素で最も高い輝度が観測され、その周囲の画素では、輝度が低くなる。つまり、観測される輝度値は、エピポーラ線上で単峰性を有する。

(条件 3: 画素照射に対する応答のカメラ画像内での連続的な広がり):

三次元計測対象物体の表面が空間的に滑らかな広がりを持っているケースを想定する。ある 1 画素から光を照射したとき、反射光を計測する複数のカメラ画素が画像平面に散らばっている (図 5 左) ことは光学的に可能性が低く、いくつかの傾

域を構成すると考えることができる(図5右).

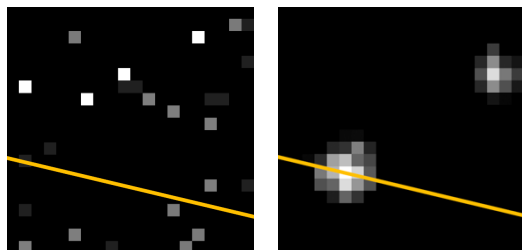


図5: プロジェクタのある一画素を照射した際の推定カメラ画像(=推定されたLT行列のある列を画像に戻したもの). 橙色は対応するエピポーラ線を表す. 左:画像全体に反射光が点在しており, 光学的にこのような状況は考えづらい. また, エピポーラ線上で反射光が観測されず, この推定画像は条件1を満たさない. 右: 反射光がカメラ画像内の2領域で観測されている.

(条件4): スパース性. プロジェクタの一画素から照射された光は, 対象表面で反射しカメラの複数の画素で計測されるが, このとき明るさが増えるカメラ画素数は全体の極一部に過ぎない. 言い換えるとLT行列は非常に疎(スパース)な行列である.

以上の条件1~4を評価関数に導入し, 照射パターンと撮影された画像から非線形最適化によってLT行列を推定し, 推定されたLT行列から三次元復元を行うアルゴリズムを構築した.

#### (4)最適照射パターン計算アルゴリズムの構築

推定されたLT行列から次時刻の照射パターンを計算するアルゴリズムを構築した. 推定されたLT行列を利用することで, 任意のパターン光を対象物体に照射した際のカメラから得られる撮像画像を予測が可能となる. この事実を利用して, 現時刻までにカメラで撮影された画像と最も異なる(※)画像が得られるような照射パターンを最適化計算によって計算する. この最適化問題をLMI (Linear Matrix Inequality: 線形行列不等式)を使って, 定式化した. これまでに数多くのLMIを解くソルバーが提供されており, 問題を線形行列不等式で表現できたことで, 高精度かつ高速な計算を行うことが期待できる.

※: 画像間の距離として, 輝度値を利用したSSD (Sum of Squared Difference)を採用した.

#### (5)検証

提案した一連のアルゴリズムを評価するための検証を行った.

まず, 4(3)で提案したLT行列推定アルゴリズムの検証を行った. この実験では, 4(4)で構築した最適照射パターンの計算は行わず, ランダムに照射パターン(ランダムドットパターン)を生成して, LT行列の推定誤差を評価した. 検証の結果, 照射回数が増えるにつれ, 推定誤

差が小さくなる傾向を確認した.

つぎに, LT行列推定アルゴリズムと4(4)で考案した最適照射パターン計算アルゴリズムの統合検証を行った. この検証では, 推定誤差が十分小さくなるまでに必要な照射回数を比較した. 比較は, A. 提案したLT行列推定アルゴリズムと最適照射パターン計算アルゴリズムの両者を用いた場合, B. 提案したLT行列推定アルゴリズムを用い, 照射パターンにランダムドットパターンを使用した場合, C. 項目4(3)の条件4のみを考慮した推定を行い, 照射パターンにランダムドットパターンを使用した場合, の3つのアルゴリズムを用いて行った. 図6に示す通り, 提案アルゴリズムAが最も少ない照射回数でLT行列を推定できることを確認した.

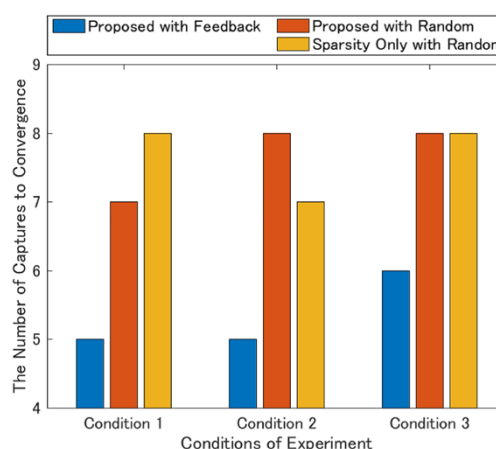


図6: LT行列の推定誤差が十分に小さくなるまでの照射回数の比較. いずれの条件でも提案法によって, 最も少ない照射回数でLT行列を推定できる

#### 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1件)

(1) Naoya Chiba, Shogo Arai, Koichi Hashimoto, Feedback projection for 3D measurements under complex lighting conditions, American Control Conference, pp.4649—4656, 2017. 査読有

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

荒井 翔悟 (ARAI, SHOGO)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号:80587874

##### (2)連携研究者

鏡 慎吾 (KAGAMI, SHINGO)  
東北大学・大学院情報科学研究科・准教授  
研究者番号:90361542