

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：14603

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K19849

研究課題名（和文）イベントカメラと波紋運動パターンを用いた屋内外で利用可能なアクティブステレオ

研究課題名（英文）Active stereo for indoor and outdoor use with event camera and ripple motion patterning

研究代表者

藤本 雄一郎 (Fujimoto, Yuichiro)

奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教

研究者番号：30755971

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、光量の微小時間中の変化の有無（および方向）のみを観測できるイベントカメラを明所で動作するアクティブステレオに応用するための技術提案および開発を行った。まず、プロジェクタとカメラの各画素の対応関係を取得するために、行、列ごと周波数の異なるパターンを投影する方法を構築した。さらに、それを用いて、両者の相対的3次元位置姿勢を算出する方法を提案した。それを基に、3次元形状計測を行うアクティブステレオを構築した。一般的なフレームカメラを用いたプロジェクタカメラとの比較実験を行い、非常に明るい環境（2500lux程度の投影面）でも3次元形状計測が安定して行えることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでのプロジェクタカメラを用いたアクティブステレオは暗所の方がロバストに動作し、明所で動作させるためには、パターンの輝度やカメラによる検出時の微細なパラメータ調整が必要であった。それに対し、そのような調整の必要なく、明所でも暗所でも安定して動作するアクティブステレオを開発したことに学術的意義がある。また、この技術は明所での（例えば屋内での）プロジェクションマッピングなどに直接転用可能である。

研究成果の概要（英文）：This research proposed and developed a technology to apply an event camera, which can observe only the presence (and direction) of changes in light intensity during a small period of time, for an active stereo system operating in bright locations. First, in order to obtain the correspondence between each pixel of the projector and the camera, a new projecting patterns with different frequencies for each row and column was proposed. Using this pattern, I also proposed a method to calculate the relative 3D positions and postures of the two projectors and cameras. Based on this method, an active stereo system for 3D shape measurement was developed. Comparison experiments with a projector camera using a normal frame camera showed that the 3D shape measurement is stable even in a very bright environment (projection surface of about 2500 lux).

研究分野：拡張現実感

キーワード：イベントカメラ 3次元形状計測 アクティブステレオ プロジェクタ プロジェクションマッピング

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

光源からあらかじめ決めたパタン光を対象物や環境に投影し、それをカメラ等で観測することで安定した3次元形状計測を行うアクティブステレオはコンピュータビジョン (CV) 等の分野で古くから研究されている。近年 Microsoft の Kinect 等の優れたアクティブステレオセンサの登場により、実時間で3次元形状計測が行えるようになった。しかし依然として残る最も大きな問題の一つが、屋外での使用が困難な点である。これは屋内の明るさ (最大 1,000 lx) と屋外の明るさ (最大 100,000 lx) が全く異なり、従来のカメラのもつダイナミックレンジでは、特に屋外にてパタン光が観測できないことに起因する。そのため、屋外での車の自動運転や拡張現実感システムに適用可能な、アクティブステレオ手法は存在しない。一方、近年、CV 等の分野で利用されつつあるイベントカメラは、従来の可視光カメラのようにセンサへの入力光量の絶対値を計測する代わりに、微小時間での光量変化の有無とその方向を観測する。そのため、人の目に近い大きなダイナミックレンジと、高い時間分解能 (数千 fps) をもつ。その特性を活かし、カメラや対象物の移動を高速検知するような、物体追跡、自己位置推定等への応用が進んでいる。しかし、これらはパッシブな画像からの情報抽出を目的としたものがほとんどであり、他光源と組み合わせた計測に関する研究は未だほぼない。これは、イベントカメラ自体の光学系が非常に複雑であり、パッシブな状態でも、観測情報から意味のある情報を取り出すのが困難な点に起因すると考えられる。そこで本研究は、「能動光源の局所輝度変化により、空間に対し一意性をもたせた情報を埋め込み、またそれを取り出すことが可能か」という学術的「問い」に着眼する。

### 2. 研究の目的

上記の問いを鑑み、具体的には、イベントカメラの対象物の運動検知に強い点に着目し時空間的に連続する運動を行う新たなパタン光を提案する。この「イベントカメラの特性を活かした運動パタン光を用い、環境光が強い状況でも実用的な空間解像度をもつアクティブステレオ技術を構築すること」を本研究の目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究は以下の手順で進める。

#### (1) 能動制御投影光に対するイベントカメラの観測情報のモデル化

① 現状のイベントカメラは、回路ノイズの影響が強く、通常のカメラのように簡単な閾値処理でのパタン検出が困難である。この問題に関して、制御投影光に対するイベントカメラの観測情報の性質は未だ整理されていない。そこでまず、本研究では、様々な光源 (ポイント・ラインレーザ、プロジェクタ (DLP, LCOS 方式)) とその時系列変化に対するイベントカメラの出力を取得し、そのモデル化を行う。具体的には、イベントカメラと通常のカメラの同軸系を構築し、光源を変えて、二つのカメラの観測情報ペアを得ることで実現する。このモデル化によりノイズを低減し、続く研究項目 (2)、(3) との課題の分離を図る。

② さらに研究後期において、複数のイベントカメラにこれを実施し、一般化が可能なノイズと各カメラ固有のノイズを切り分け、モデルの体系化を試みる。

(2) プロジェクタ・イベントカメラ間の幾何学的キャリブレーション手法構築および体系化  
アクティブステレオの実現に必要な、イベントカメラに特化したプロジェクタとの幾何学的キャリブレーション手法を構築する。これは、下記 A, B の二つのプロセスに分けられる。

#### ① プロジェクタの各画素とカメラの各画素の対応関係の算出

通常のカメラでは、プロジェクタで粗密の異なる白黒のストライプパタン (以下、グレーコードパタン) を投影し、それをカメラで観測することで、画素ごとの対応関係を求めるのが一般的である。一方、現状のイベントカメラには、項目 (1) で述べたノイズの問題に加え、帯域が極めて小さく、グレーコードパタンのような画像全域が時間変化するパタンを転送できないという問題があるため、全く異なる手法が必要であると予想される。ここで、プロジェクタ-カメラの相対的位置姿勢は不変、かつ処理時間を考慮しないと、最も単純なのはプロジェクタ側で1点のみを点滅させ、カメラ側でそれを観測する処理を、画像全体で繰り返す方式である。令和2年度前-中期にて、まずこの最も単純な手法を試し、その評価を行う。

② 既知大きさ・形状の対象物を用いたプロジェクタ-カメラ間の3次元位置姿勢の算出  
最も単純なのは、箱型基準物体の表面に複数の点光源を埋め込み、それをイベントカメラ間で観測する方法と予想されるため、令和2年度中期にて、まずこれを実現し、評価する。

③ 令和3年度後期にて、上記方法に加え、(3)の提案手法も含め、計測に利用可能な時間と精度、計測安定性の観点で、イベントカメラに特化して、一連の手法を整理・体系化する。

### (3)異なるパタン提案による実時間計測

(1), (2)までで、プロジェクタとイベントカメラ間のキャリブレーションが完了した前提の元、より高速なパタンを投影およびその検出方法を提案し、3次元計測の処理速度向上を図る。

## 4. 研究成果

(1), (2)の結果を示す[1]. 図1は、行と列ごとに異なる周波数を埋め込んだパタンをイベントカメラにより計測した結果である(プロジェクタ 60Hz). なお、研究タイトルにあるような波紋パターンは、検討の段階で、安定した検出が非常に難しいことが明らかとなったため、全く異なるパターンを代わりに提案したことに留意されたい. 左図の各色が周波数を示している. 右図横軸が投影された周波数, 縦軸が推定された周波数であり, 非常に高い精度で推定できることが示された. なお使用可能な周波数はより速い更新周期のプロジェクタを使用すれば, 増やすことが可能であり, さらに高精度化が可能である.

When using 8 frequencies

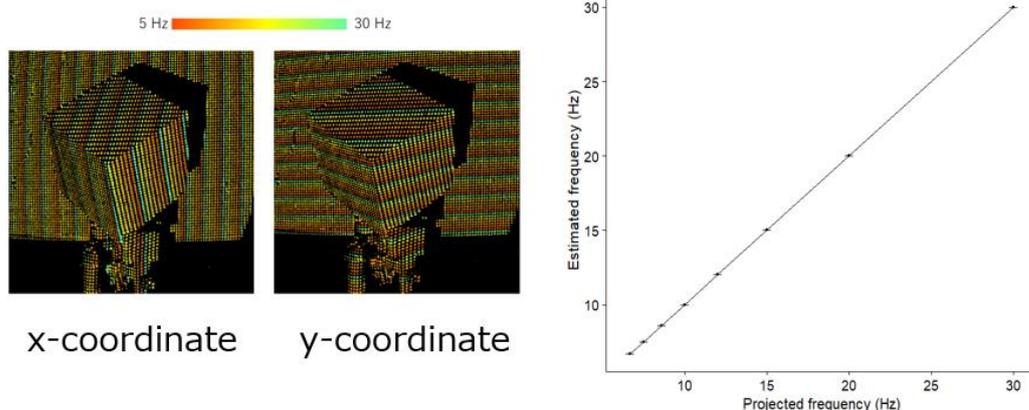


図1 行/列ごとに異なる周波数を埋め込んだパタンのイベントカメラによる計測結果

図2は、暗所と明所で、投影を行った際に、カメラとの関係性が正しく計算できたピクセルを白で、計算できなかったピクセルを黒で示した結果である. 2列目が一般的なフレームカメラとグレーコードパターンを使用したプロジェクタカメラ系であり、3列目が提案した、イベントカメラと周波数パターンを使用したプロジェクタイベントカメラ系の結果である. 暗所では、どちらもほとんどの領域で正しい計算が行われている一方、明所では、通常のプロジェクタカメラ系において多くの欠損が発生している. それに対し、提案手法では、一様に全領域に対して、計算が行えていることが示された.

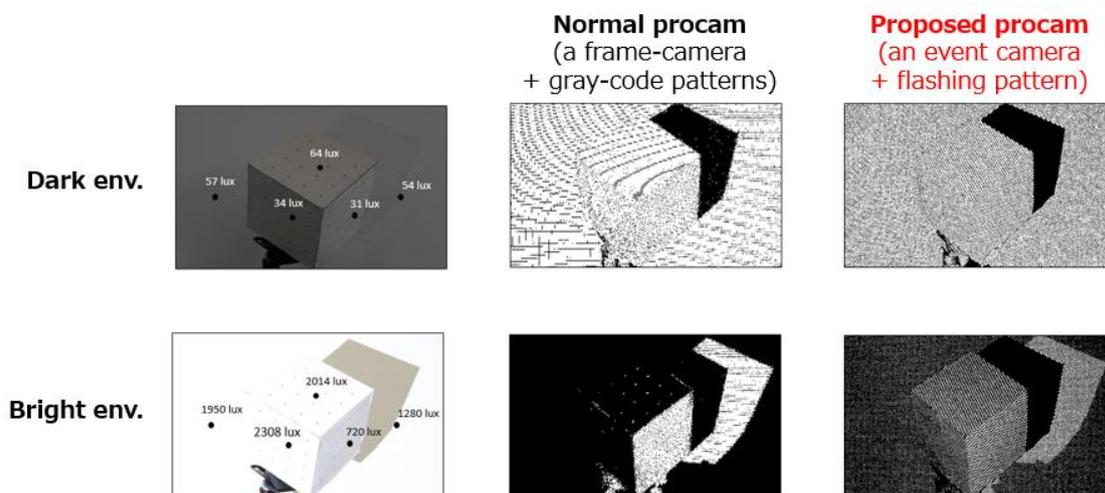


図2 暗所と明所におけるプロジェクタカメラのピクセル対応関係計算結果 (2,3 列目 白いピクセル: 計算成功, 黒いピクセル: 計算失敗)

図3に3次元形状計測の結果を示す。図2と同様に、一般的なプロジェクタカメラ系では、明所において、ほとんどの領域の計測に失敗しているのに対し、提案手法では、より多くの領域の計測に成功している。

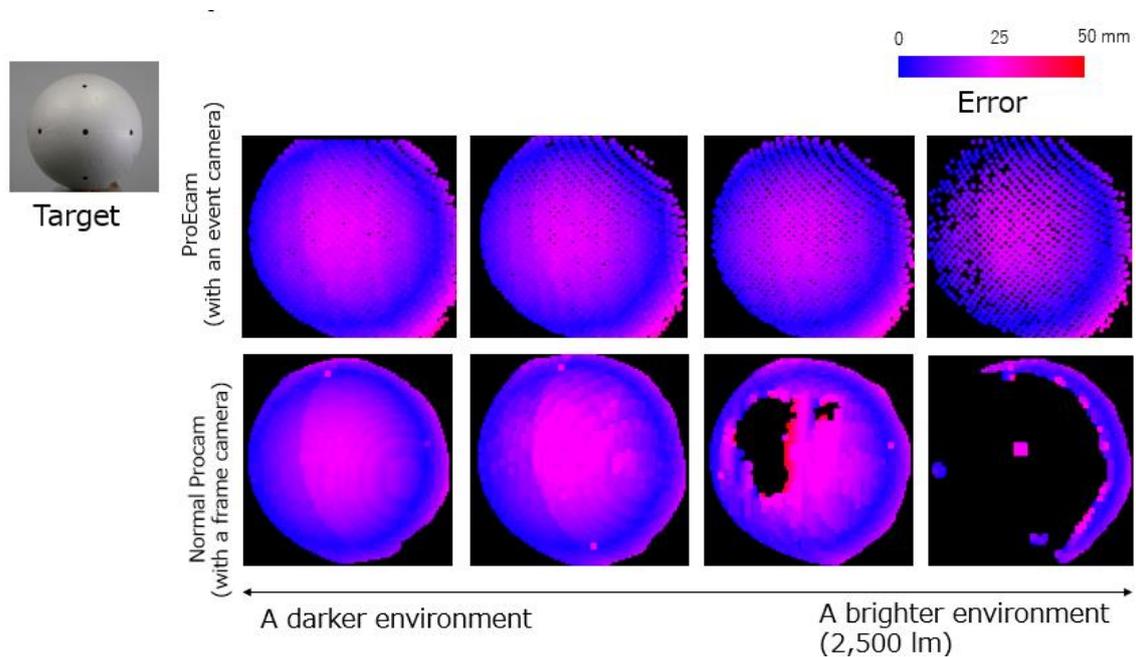


図3 暗所と明所における3次元形状計測の結果

また、(3)については、まだ对外発表を行った成果はないものの、異なるパターンを提案し、シミュレーション環境で 10fps 程度の計測に成功した。今後は高速プロジェクタと組み合わせてさらなる高速化と、複雑な対象の計測への適用可能性を検証していく予定である。

[1]Yuichiro Fujimoto, Taishi Sawabe, Masayuki Kanbara, Hirokazu Kato, “Structured Light of Flickering Patterns Having Different Frequencies for a Projector-Event-Camera System,” The IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (IEEE VR), Mar. 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yuichiro Fujimoto, Taishi Sawabe, Masayuki Kanbara, Hirokazu Kato
2. 発表標題 Structured Light of Flickering Patterns Having Different Frequencies for a Projector-Event-Camera System
3. 学会等名 The IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (IEEE VR 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤本 雄一郎
2. 発表標題 AR/MR研究シーズ・ショーケース, イベントカメラを用いたプロジェクタカメラ
3. 学会等名 第26回バーチャルリアリティ学会大会 予稿集, 日本バーチャルリアリティ学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤本 雄一郎
2. 発表標題 明所で動作するプロジェクションマッピング
3. 学会等名 メディアエクスペリエンス・バーチャル環境基礎研究会 (MVE)
4. 発表年 2021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
---------	---------