

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K19799

研究課題名（和文）動的光伝播の自律協調撮影によるシーンの深層要素の選択的可視化

研究課題名（英文）Controllable imaging system of invisible element components by autonomous cooperative acquisition of dynamic light transport

研究代表者

久保 尋之（KUBO, Hiroyuki）

千葉大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：90613951

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、イベント駆動センサを用いた光学計測システムおよび解析手法を開発を通じ、動的な光伝播に基づくシーンの深層要素の選択的可視化に取り組んだ。まず、イベント駆動カメラとプロジェクタを用いた幾何学的校正の手法を提案し、さらにライン照明を組み合わせ半透明なレイヤ状の被写体の深度を推定する方法を開発した。さらに、物理ベースレンダリングによるイベント映像の効率的な生成手法を構築した。これらの成果は、自動運転の車載ビジョンシステム、農業、創薬、考古学など広範な応用分野での利用が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

動的な光の伝播を計測・解析することは、シーンの隠された情報の可視化や計測のために非常に有用である。そのため本研究で使用したイベント駆動センサは新しいセンシング技術であり、その性質は多くの分野で注目を集めている。その中でも、本研究の成果はイベント駆動センサの理解を深めるための基盤となり、新たな研究領域を開拓する可能性を示したと言える。本研究の適用範囲は広く、自動運転車の安全性向上、農業の効率化、創薬研究や食品加工業のための非破壊調査など、多様な領域での応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：This study addressed the selective imaging system of invisible elements of a scene based on dynamic light transport by developing an optical system and analysis method using an event-based vision sensor. First, we proposed a method for geometric calibration using an event-driven camera and projector. Then, we developed a method for estimating the depth of transparent layered objects by combining line illumination. We also developed an efficient method for generating event video using physics-based rendering. These results are expected to be used in a wide range of applications, including in-vehicle vision systems for automated driving, agriculture, drug discovery and archaeology.

研究分野：コンピュータビジョン、コンピュータグラフィクス、コンピューショナルフォトグラフィ

キーワード：イベントカメラ 光伝播計測 物理ベースレンダリング キャリブレーション

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

コンピュータビジョン分野では、シーンに様々な方向から光を照射したときの反射光をカメラで捉えることによって得られるシーンの光伝播の計測や解析を通じて、医用画像分野や異物検査など様々な分野への応用が期待されている。一方で、従来システムは、光学的な制約から時間・空間・光度のうちいずれかの要素の分解能を高めるためにはいずれかの要素を犠牲にせざるを得ない、いわゆるトレードオフの関係があり、その全てを粒さに捉えるカメラシステムは未だに実現できていない。

### 2. 研究の目的

そこで、本研究では近年注目をあつめるイベント駆動センサの応用により、この現状の打破を試みる。シーンに対して照明で構造化光を照射し、そのときの応答をイベント駆動センサによって自律的に抽出し、このイベントにもとづいて高光感度ながら時間分解能の低い HDR カメラと、光感度は低いものの時間的な分解能に優れた高速度カメラとの協調的な制御に用いる。その後、時間分解能と光感度が部分的に高い動画データから、データ処理によって不足する時間と光感度を補完することで、時間・空間・光感度の全ての解像度に優れた光伝播の計測システムを実現する。

### 3. 研究の方法

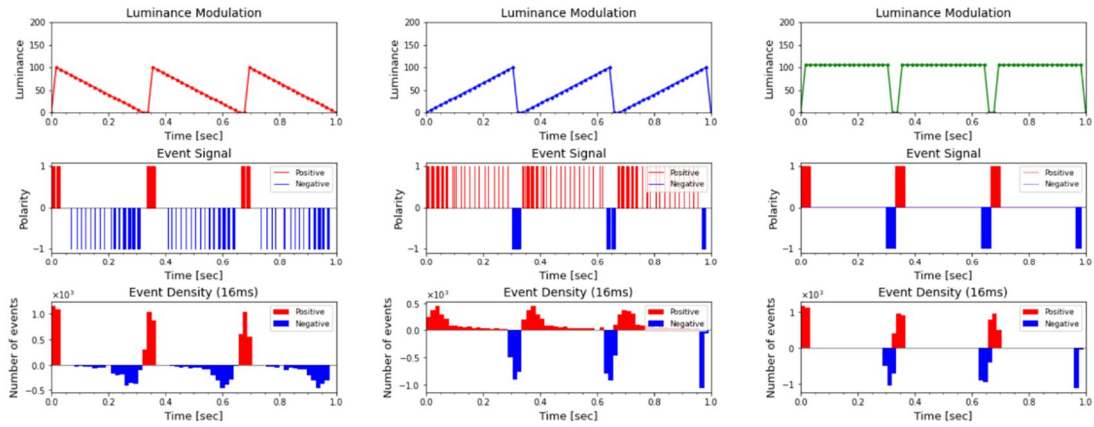
本研究では研究代表者の久保尋之がイベント駆動センサを用いたカメラシステムの開発を、研究分担者の谷田川達也がデータ補完および数理モデル技術の開発をそれぞれ担当する。イベントカメラは従来の RGB カメラではセンシングしにくいような条件に対しての応用が期待されている一方で、3D シーンから、物理ベースレンダリングを通じてイベント映像を作り出す効率的な技術はなく、これらの応用をシミュレーションを通じて検証することを難しくしている。そこでまず、イベント駆動センサを物理ベースレンダリングによって効率的にシミュレーションを可能にする技術を開発する。これにより、コンピュータビジョン等の分野において異常検知や物体検出を含む幅広い応用に繋げる。さらに、イベント駆動センサにアクティブ照明法を適用することで、シーンの光伝播を動的に観測し、従来のカラーカメラでは撮影が難しい透明度の高い被写体の深度情報を獲得する手法を開発する。

これにより、人の眼を越えた可視性によって安全性を確保する自動運転のための車載ビジョンシステム、その他にも農業や創薬、考古学など極めて広い分野に応用可能な技術基盤の実現を目指す。

### 4. 研究成果

#### 4.1 イベント駆動センサによる光学システムの幾何校正のための信号分離手法

まず、イベント駆動カメラとプロジェクタからなる光学システムの幾何学的な校正を行うことを目的として、イベントデータの極性情報を用いたパターン光を分離を行う手法を提案した。イベント駆動カメラとプロジェクターを校正するためには、平面の映像表示装置としてディスプレイを用いることが一般的であり、さらにプロジェクターとディスプレイの2種類のデバイス由来のパターン光が必要である。そこで、イベント駆動カメラのイベント極性がそれぞれ反対のイベントが高密度あるいは低密度に発生するように輝度値を時間変調させることで、密度差を利用して2つのパターン光がどちらのデバイス由来の光なのか区別する手法を実現した。これにより、従来では困難だった同期を行っていない2種類のデバイス由来のパターン光を利用したイベントカメラ・プロジェクターシステムの校正が可能となった。シミュレーションによる有効性を検証した結果を図1に示す。上から、輝度変調用信号、発生したイベント、単位時間あたりのイベント密度を表す。パターン光Aとパターン光Bを逆鋸波で照射し、さらにイベントの発生する極性と密度情報を利用することによって、(a)、(b)、(c)いずれの場合も正しくパターン光AとBとを分離することが可能となった。本研究成果は情報処理学会 CVIM 研究会にて発表した[1]。

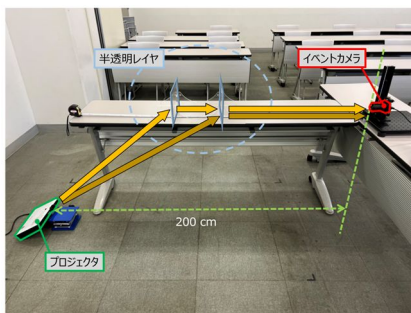


(a) パターン光 A が当たった画素 (b) パターン光 B が当たった画素 (c) パターン光 A とパターン光 B の合成波が当たった画素

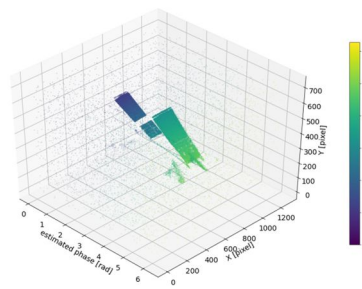
図 1. パターン光 A、B およびその合成波を照射したときの信号分離の結果

#### 4.2 イベント駆動センサによる半透明レイヤの深度復元手法

次に、イベントカメラとライン照明を用いて撮影したイベントの時間情報から、シーンに複数置かれた半透明なレイヤ状の被写体の深度を推定する方法を提案した。具体的には、カメラから被写体までの深度に応じて照明が当たる時刻が異なるように、ライン照明を高速に繰り返し動かしながらシーンに照射する。これを高い時間分解能で受光強度変化を記録可能なイベントカメラで観測することにより、イベントの発生時刻から照明座標系での照射位置を特定し、カメラ座標系での観測位置と対応付けることにより被写体の深度を推定する。このとき、カメラから見て深度の異なる複数のレイヤが同じ位置に重なっているような場合には、カメラの各画素では各レイヤからの反射によるイベントが混在して観測される。そこで照明の照射周期が既知であることを利用し、画素毎に観測された混合イベント列と照射周期に基づいて生成したテンプレート信号の相互相関関数から、各レイヤ由来の周期的なイベント列の位相をそれぞれ推定することで、各レイヤへの照明の照射時刻を特定し深度推定を実現する。実験により、異なる深度にある 2 つの半透明なレイヤそれぞれの深度が推定できていることを確かめた。図 2 には透明な複数レイヤを被写体として推定する様子(a)と推定された位相情報を可視化した結果(b)を示す。従来のカラーカメラではほとんど撮影不可能な半透明なレイヤ状の被写体が計測可能であることが示された。なお、本研究成果は情報処理学会 CVIM 研究会にて発表[2]し、奨励賞を受賞した。



(a) 撮影環境



(b) 推定結果

図 2. 透明な複数レイヤを被写体として推定する様子(a)と推定された位相情報を可視化した図(b)。

#### 4.3 イベント駆動センサの物理ベースレンダリング

イベント駆動センサは、生物の視覚特性を参考に輝度変化をイベントとして出力することができる。イベント駆動センサは従来型のイメージセンサーと比較して時間分解能が高く、また高いダイナミックレンジを持っており、従来の RGB カメラではセンシングしにくいような条件に対しての応用が期待されている。このような特性から、イベントカメラはコンピュータビジョン等の分野において異常検知や物体検出を含む幅広い応用が期待されている。その一方、3D シーンから、物理ベースレンダリングを通じてイベント映像を作り出す効率的な技術はなく、これらの応用をシミュレーションを通じて検証することを難しくしている。そこで本研究では、イベ

ントカメラの応用に向けて、3D シーン上でから、物理ベースレンダリングによって得られた少量のサンプルを用いて、イベント映像をレンダリングする手法を開発した。ある時間における輝度分布を少量の輝度サンプルと G-Buffer を用いて重み付き局所線形回帰でモデル化し、このモデルを別時間のサンプルに対して適用することで回帰モデルの変化から輝度変化を求め、イベントを推定する。これにより、シーンによっては 100 倍以上のサンプルから得られた輝度値の差分に基づくイベント推定と同等のイベント映像を得られた。

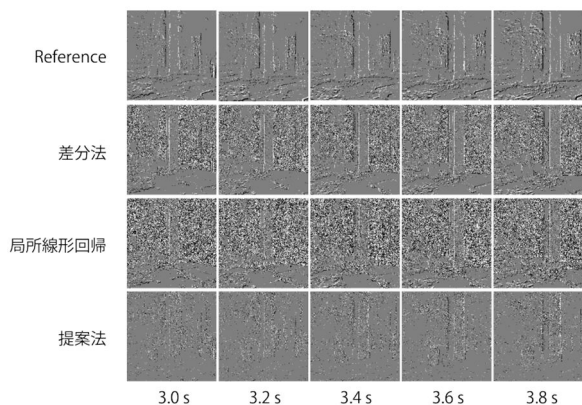


図 3 本手法により生成されたイベント駆動センサのシミュレーション結果。

本手法のベンチマークとして、San Miguel のシーン に対して得られたイベントデータを図 3 に示す。グレーが輝度変化なしの点で、黒が輝度減少イベントが発生した点、白が輝度増加イベントが発生した点である。Naïve な手法である差分法は画像空間における輝度ノイズの影響を受け、イベントにもノイズの影響が現れている一方、提案法では差分法や局所線形回帰法と比較して、ノイズを抑えられている。MSE による比較を行ったところ、提案法が最もよく正解のイベントを再現できていることがわかった。本研究成果は情報処理学会 CGVI 研究会で発表[3]し、優秀研究発表賞および学生発表賞を受賞した。

#### 参考文献

- [1] 戸田泰我, 杉本志織, 曾我部陽光, 久保尋之, "イベント極性を利用したパターン光分離によるイベントカメラ・プロジェクター校正", 情処研報 CVIM 233-59, 2023.3
- [2] 木淵 寛太, 杉本 志織, 曾我部 陽光, 久保 尋之, イベントカメラと動的ライン照明を用いた複数の半透明レイヤの深度推定, 情処研報 CVIM 228-21, 2022.1.
- [3] 辻 雄太, 谷田川 達也, 久保 尋之, 森島 繁生, ノイズを含むレンダリング動画に対する重み付き局所線形回帰によるイベント映像生成, 情処研報 2023-CG-189, 2023.2.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Chandran Sreenithy, Kubo Hiroyuki, Ueda Tomoki, Funatomi Takuya, Mukaigawa Yasuhiro, Jayasuriya Suren	4. 巻 8
2. 論文標題 Slope Disparity Gating: System and Applications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Computational Imaging	6. 最初と最後の頁 317 ~ 332
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TCI.2022.3162259	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 該当する

1. 著者名 Tsuji Mayuka, Kubo Hiroyuki, Jayasuriya Suren, Funatomi Takuya, Mukaigawa Yasuhiro	4. 巻 9
2. 論文標題 Touch Sensing for a Projected Screen Using Slope Disparity Gating	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 106005 ~ 106013
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2021.3099901	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 該当する

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 1件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 戸田 泰我、杉本 志織、曾我部 陽光、久保 尋之
2. 発表標題 イベント極性を利用したパターン光分離によるイベントカメラ・プロジェクター校正
3. 学会等名 情報処理学会CVIM研究会（第233回）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 辻 雄太、谷田川 達也、久保 尋之、森島 繁生
2. 発表標題 ノイズを含むレンダリング動画に対する重み付き局所線形回帰によるイベント映像生成
3. 学会等名 情報処理学会CGVI研究会（第189回）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩口堯史, 久保尋之, 川崎洋
2. 発表標題 微分可能レンダリングを用いたすりガラス越しの鏡面反射物体形状復元"
3. 学会等名 第25回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤輝, 久保尋之
2. 発表標題 複数波長を用いた皮下血管のリアルタイムプロジェクション
3. 学会等名 Visual Computing 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroyuki Kubo
2. 発表標題 Our Recent Works: Computational Imaging and Others
3. 学会等名 ACM SIGGRAPH 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Yamagiwa, H. Kubo
2. 発表標題 A parallel guaranteed projector-camera system for dual videography
3. 学会等名 ACM SIGGRAPH 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Ogiwara, H. Kubo
2. 発表標題 Visibility Enhancement for Transmissive Image using Synchronized Side-by-side Projector-Camera System
3. 学会等名 ACM SIGGRAPH 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木淵 寛太, 杉本 志織, 曾我部 陽光, 久保 尋之
2. 発表標題 イベントカメラと動的ライン照明を用いた複数の半透明レイヤの深度推定
3. 学会等名 情報処理学会CVIM研究会 第194回
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 白川海舟, 久保尋之
2. 発表標題 分散を考慮した高信頼度領域を用いた表面粗さのインバースレンダリング
3. 学会等名 映像表現・芸術科学フォーラム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松田美由紀, 田中賢一郎, 船富卓哉, 向川康博, 久保尋之
2. 発表標題 熱合成開口イメージングを用いた画像中の遮蔽物除去と温度補正
3. 学会等名 映像表現・芸術科学フォーラム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久保尋之
2. 発表標題 見えないものが見えてくる, 時間同期式プロジェクタ - カメラシステムによるコンピューショナルイメージング
3. 学会等名 日本色彩学会 視覚情報基礎研究会 第42回研究発表会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩口堯史, 久保尋之, 川崎洋
2. 発表標題 微分可能レンダリングによるコースティクス画像からの鏡面反射物体の形状復元
3. 学会等名 情報処理学会CVIM研究会 第195回
4. 発表年 2022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	谷田川 達也  (YATAGAWA Tatsuya)  (50817484)	一橋大学・大学院ソーシャル・データサイエンス研究科・准教授    (12613)	

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