

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：34315  
研究種目：基盤研究(B)（一般）  
研究期間：2018～2022  
課題番号：18H03265  
研究課題名（和文）時間相関ビジョン ナノ秒時間相関画像を用いたコンピュータビジョン技術の新展開  
  
研究課題名（英文）Time-correlated vision: computer vision technologies using nanosecond time-correlated images  
  
研究代表者  
田中 賢一郎（Tanaka, Kenichiro）  
  
立命館大学・情報理工学部・准教授  
  
研究者番号：60803244  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、カメラを用いてシーンを理解するコンピュータビジョン研究の新たな展開として、ナノ秒時間相関画像を用いた新しいコンピュータビジョンの枠組みである「時間相関ビジョン」の確立を目指し、研究を実施した。実際に動作可能な時空間変調計測システムを構築し、その性能を評価するとともに、これまで難しかった対象の3次元形状計測や材質分類、画像の鮮明化などの問題へ応用し、時間相関画像を用いた新しいコンピュータビジョンが良い性能を出すことを示し、その可能性を確認することができた。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

従来のコンピュータビジョンの研究は、定常的な2次元画像を入力とすることを前提として進化してきた。しかしながら、定常的な画像は、カメラという計測デバイスの制約によるものにすぎず、シーンの認識・理解に最適なわけではない。本研究では、光の軌跡さえ可視化可能なナノ秒単位の超高速な光の過渡応答に基づく画像理解である「時間相関ビジョン」を提案した。光の過渡応答は、物体の物性や形状、内部状態などの情報と密接に関連しているため、シーン理解の強力な手助けになる。光の時間的な応答をもとに問題を解決しようという、従来のシーン理解とは異なる角度からのアプローチであり、新しいコンピュータビジョンの潮流を開拓できた。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to develop a scheme of time-resolved computer vision research, where nano-second time correlated observations are used for various computer vision problems. We have developed a time-resolved measurement system and evaluated its applications such as recovering 3D shape of various scenes, estimating materials, visualizing invisible scenes, and so on. We have confirmed that time-resolved computer vision is powerful and has a lot of future directions of research.

研究分野：コンピューテーショナルフォトグラフィ

キーワード：コンピューテーショナルフォトグラフィ

## 1. 研究開始当初の背景

近年の AI 技術の発展は著しく、種々の問題に AI 技術を適用した結果、飛躍的な性能向上がもたらされてきた。これにより、機械学習の問題として表現可能な問題に関しては、学習データの質と量だけが問題解決の要素であるという共通認識も広がってきている。そのため、光の定常状態を仮定したコンピュータビジョン分野においても、2次元の画像をいかに大量に収集するかといった点に興味集中してしまっている。ところが、シーン理解のスタート地点は、必ずしも2次元の縮退した情報である必要はなく、よりリッチな情報を持つ入力を与えることでシーン理解の精度がさらに向上するのではないかと、といった本質的な問いに関して取り組まれることはなく、未解決のままであった。

一方で、近年、カメラの撮像過程に特殊な光学系や計算機を導入することで、カメラの撮影性能を飛躍的に向上させたり、シーン中に埋もれてしまった情報を復元し可視化したりするコンピュータショナルフォトグラフィ (CP) と呼ばれる新しい研究分野が盛んになっている。研究代表者も、これまで CP に関する研究に従事してきており、半透明物体内部の可視化、透明物体の形状計測など様々な CP 手法の提案を行ってきた。特に、ナノ秒単位の光伝播の可視化やナノ秒単位の光の過渡応答を利用した材質推定では、光の時間的な過渡応答がコンピュータビジョンの問題解決にあたり非常に有用であることが示唆された。今後、光の過渡応答に基づくシーン理解が、これまでのコンピュータビジョン技術と融合し、様々な手法や応用の広がりが加速していくのは必然であった。

## 2. 研究の目的

本研究では、ナノ秒レベルの超高速な光の過渡応答が記録された「時間相関画像」を用いた新しいコンピュータビジョンの枠組みである「時間相関ビジョン」を提案し、その有効性を実験的に示すことを目的としている。時間相関ビジョンは、従来のカメラによって制約されていた2次元の縮退情報という枠を取り払い、光の時空間伝播全体からシーン全体を体系的に理解する枠組みである。入力に光の時間応答が加わることにより、シーン中の光伝播を縮退させずに計測でき、あらゆるビジョンの問題をより安定に解くことができる。具体的な応用例として、これまでのビジョンでは扱いの難しかった、物体の材質や質感、濡れ具合など様々な物性を推定し、時間相関ビジョンの有用性を示すことが目的である。

## 3. 研究の方法

時間相関ビジョンの枠組みを確立するにあたり、具体的には、以下4つのサブテーマに取り組んだ。これら4項目は互いに密接に関連しており、協調して実施することで、円滑に研究を進めた。

### a. 時間相関ビジョンのための計測システム

レーザーなどのオプティクスを工夫して光の過渡応答を直接撮影することは簡便ではなく、微振動に極めて脆弱なため実用に向かない。そのため、本研究では、計算機による演算を前提とした CP アプローチで間接的に光の過渡応答が計測できるシステムを構築する。演算を前提とした計測は、電子回路の設計による計測システム構築と親和性が非常に高く、光学・撮像系に高い柔軟性と拡張性を持たせることができる。例えば、Time-of-Flight カメラと電子回路を組み合わせることで、強度変調を自由自在にコントロールできる計測デバイスが構築可能である。

### b. 時間相関ビジョンのための基本技術

現在までに提案されている連続波形型・パルス型等の様々な投光パターンにおける測光を考える一般化時間相関イメージングモデルを提案する。また、時間相関画像に対応したキャリブレーションや、時間相関画像に特有の新しい画像特徴量を提案する。キャリブレーションなどの基本技術の一部は、計測システムのソフト側実装であり、a. とともに協調開発を行いつつ、シミュレーション環境を活用し、開発を加速させる。

### c. 対象物体の物性と時間相関画像の関係のモデル化

物体の材質や質感、濡れ具合や温度といった、様々なスケールの物性が、どのような時間応答を示すのかを明らかにする。そのために、a. で開発した計測システムを用いて様々な物体を計測し、時間相関画像との関係性をモデル化する。また、より高度に情報を取得可能とするために、最先端技術の応用を積極的に行う。

### d. 時間相関カメラからの物性の推定

c. で明らかにしたモデルに基づき、時間相関画像から、対象物体の物性を推定するシーン理解の手法を明らかにする。本サブテーマは、c. 計測のモデル化や、b. における時間相関画像に適

した特徴量設計などと密接に関連しており、計測モデル・画像特徴量・アルゴリズムを協調設計する。また、計測・推定された物性情報と、従来のコンピュータビジョン技術を融合し、新たなアプリケーションを開発する。

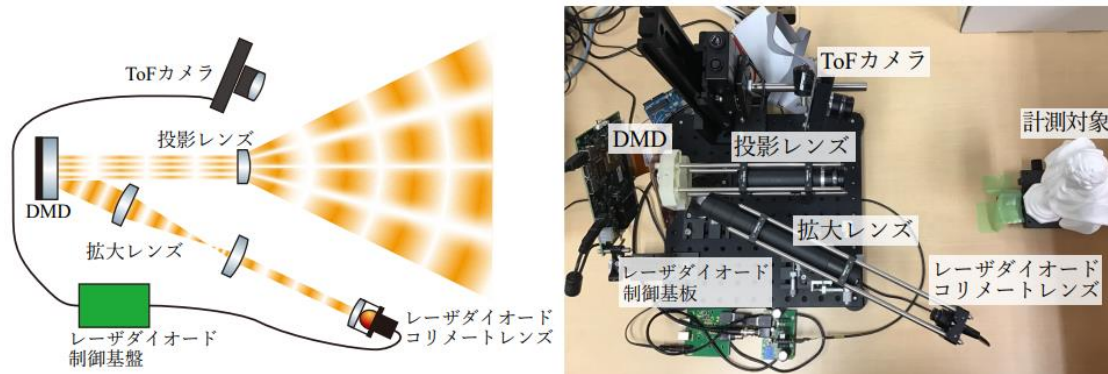
#### 4. 研究成果

本研究において、最高峰国際会議 ICCP を含む 19 件の発表を行うことができた。それら達成した成果のうち、代表的な 2 つのテーマを以下に記す。

##### ● 時空間変調計測装置の開発

Time-of-Flight (ToF) カメラや位相シフト法による距離計測手法では、位相のラッピングにより距離の曖昧性が生じる問題がある。低周波パターンを用いることでラッピングを解消することはできるが、距離の計測精度が落ちてしまう。また、複数の周波数を組み合わせる手法では計測数が増加してしまう。そこで本研究では、時間領域と空間領域のそれぞれで得られる距離と位相の関係が異なることに着目し、時間領域と空間領域の位相を組み合わせることで距離計測を行う。実験により、提案手法を用いることで従来の計測手法と比べ精度を落とすことなく曖昧性を解消できることを確認した。

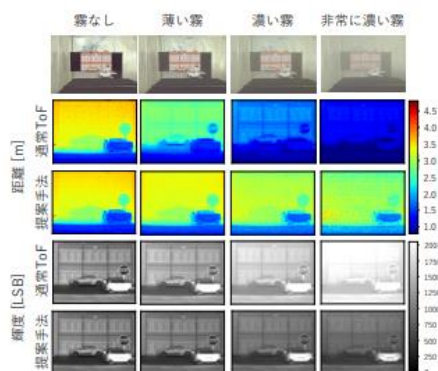
計測システムは、ToF カメラ (Texas Instruments OPT8241-CDK-EVM) を元に制作した。空間パターンを生成するために、カメラの光源を波長 830nm のレーザダイオード (Hamamatsu Photonics L9277-42) と DMD で構成したプロジェクタシステムに取り替えた。レーザダイオードは ToF カメラと同期しており、時間変調パターンを生成できる。レーザダイオードの光をコリメートレンズによって平行化し、レンズペアにより拡大し、DMD (Texas Instruments DLP6500, 1920 × 1080) へと入力する。DMD により空間パターンを生成し、投影レンズを通してシーンへと投影する。計測システムを下図に示す



##### ● 霧中画像の鮮明化

Time-of-Flight カメラは、シーンの距離画像と輝度画像を同時に取得するカメラであり、車の自動運転などへの応用が期待されている。しかし、霧が生じた環境下では、光の散乱の影響で距離も輝度も正しく計測できない。本研究では、霧中における光の伝播を単一散乱を考慮してモデル化し、それに基づいた 3 タップの露光により、霧の影響を除去した距離と輝度を計測する手法を提案する。実環境実験により本手法の有効性を確認した。

本実験では ToF カメラの前方に道路を模したシーンを設置し、霧の濃度を変えながら撮影を行った。通常設定の ToF 計測 (以降、通常 ToF と呼ぶ) および提案手法を用いて距離と輝度を計測した結果を右図に示す。距離の計測結果霧がないときの通常 ToF の距離画像は真値と見なすことができる。図を見ると、通常 ToF は霧が生じたシーンでは距離を大きく手前に間違える一方で、提案手法は霧の有無にかかわらず比較的精度よく距離を計測することができた。



## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Kijima Daiki, Kushida Takahiro, Kitajima Hiromu, Tanaka Kenichiro, Kubo Hiroyuki, Funatomi Takuya, Mukaigawa Yasuhiro	4. 巻 29
2. 論文標題 Time-of-flight imaging in fog using multiple time-gated exposures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 6453 ~ 6453
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.416365	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kushida Takahiro, Tanaka Kenichiro, Aoto Takahito, Funatomi Takuya, Mukaigawa Yasuhiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Phase disambiguation using spatio-temporally modulated illumination in depth sensing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IP SJ Transactions on Computer Vision and Applications	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s41074-020-00063-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 M. Kaga, T. Kushida, T. Takatani, K. Tanaka, T. Funatomi, Y. Mukaigawa	4. 巻 11
2. 論文標題 Thermal Non-Line-of-Sight Imaging from Specular and Diffuse Reflections	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IP SJ Trans. on Computer Vision and Applications	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s41074-019-0060-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 T. Muraji, K. Tanaka, T. Funatomi, Y. Mukaigawa	4. 巻 27
2. 論文標題 Depth from Phasor Distortions in Fog	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 OSA Optics Express	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.018858	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tanaka Kenichiro, Ikeya Nobuhiro, Takatani Tsuyoshi, Kubo Hiroyuki, Funatomi Takuya, Ravi Vijay, Kadambi Achuta, Mukaigawa Yasuhiro	4. 巻 43
2. 論文標題 Time-resolved Far Infrared Light Transport Decomposition for Thermal Photometric Stereo	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence	6. 最初と最後の頁 2075-2085
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPAMI.2019.2959304	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tanaka Kenichiro, Mukaigawa Yasuhiro, Funatomi Takuya, Kubo Hiroyuki, Matsushita Yasuyuki, Yagi Yasushi	4. 巻 41
2. 論文標題 Material Classification from Time-of-Flight Distortions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence	6. 最初と最後の頁 2906 ~ 2918
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPAMI.2018.2869885	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 知念響紀, 青山尚正, 榑田貴弘, 田中賢一郎, 船富卓哉, 向川康博
2. 発表標題 空間座標を時間軸に埋め込んだ高時間分解計測による鏡面物体の形状推定
3. 学会等名 画像の認識・理解シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 生坂優太, 榑田貴弘, 田中賢一郎, 船富卓哉, 向川康博
2. 発表標題 時間分解ラジオシティを用いた反射率と形状の整合性評価
3. 学会等名 画像の認識・理解シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中賢一郎
2. 発表標題 壁の反射光からその先を見る
3. 学会等名 映像情報メディア学会情報センシング研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 喜島大揮, 北島大夢, 榎田貴弘, 田中賢一郎, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博
2. 発表標題 3タップ短パルス変調Time-of-Flight計測における単一散乱モデルに基づく霧の影響除去
3. 学会等名 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石川武典, 北島大夢, 榎田貴弘, 田中賢一郎, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博
2. 発表標題 Time-of-Flight計測における複数の変調周波数を用いた2層構造物体の距離推定
3. 学会等名 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Tanaka, Y. Mukaigawa, A. Kadambi
2. 発表標題 Polarized Non-Line-of-Sight Imaging (CVPR2020)
3. 学会等名 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU)（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Tanaka, Y. Mukaigawa, A. Kadambi
2. 発表標題 Polarized Non-Line-of-Sight Imaging
3. 学会等名 Proc. The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Kushida, K. Tanaka, T. Aoto, T. Funatomi, Y. Mukaigawa
2. 発表標題 Spatio-temporal Phase Disambiguation in Depth Sensing
3. 学会等名 The IEEE International Conference on Computational Photography (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榑田貴弘, 田中賢一郎, 青砥隆仁, 船富卓哉, 向川康博
2. 発表標題 変調照明を用いた距離計測における時間領域と空間領域の位相の組み合わせによる曖昧性の解消
3. 学会等名 情処研報 CVIM 220
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北島大夢, 北野和哉, 榑田貴弘, 田中賢一郎, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博
2. 発表標題 単一光子検出器を用いた光の高時間分解能計測による材質の分類
3. 学会等名 情処研報 CVIM 219
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 中條博則 他17名	4. 発行年 2019年
2. 出版社 JOHOKIKO	5. 総ページ数 188
3. 書名 自動運転拡大に求められるセンシング技術 ~ センサ・部材設計開発 / データ処理技術 / 実用化に向けた 各社動向 ~	

〔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	青砥 隆仁  (Aoto Takahito)  (00785462)	筑波大学・システム情報系・助教   (12102)	

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