

令和元年 8月30日現在

機関番号：13102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13715

研究課題名（和文）ストリークカメラとスパース画像処理による極短時間の発光現象の多次元的可視化技術

研究課題名（英文）Multi-dimensional visualization of ultra-fast optical emission based on streak camera and sparse image processing

研究代表者

岩橋 政宏（Masahiro, Iwahashi）

長岡技術科学大学・工学研究科・教授

研究者番号：30251854

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）：超高速撮像技術の発展により、ピコ秒～ナノ秒時間の発光現象を伴う物理現象の観測が可能となった。従来の撮像技術では極短時間現象の空間的な観測が不可能であり、物理現象の解明が困難であった。本研究では、1台のストリークカメラで、極短時間スケールの発光現象を、空間＋時間の多次元情報として超高速に撮影できる技術を確立した。(1) 偏光技術を利用した光学観測装置の開発、(2) スパース画像処理アルゴリズムの最適化、(3) GPUを利用したハードウェア並列化の構造設計を行った。これにより、コンパクトなシステムで極短時間現象の時間変化の空間的な観測が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的な特色は、ストリークカメラ1台で、極短時間スケールの発光現象を空間＋時間の多次元情報として超高速に撮影できる点である。これまでに開発された高速度カメラには、空間次元や時間軸の制約があるため、空間情報を取得することが困難であった。本研究では、発光体の光特性を効果的に活用し、空間情報をストリークカメラのイメージ内に圧縮し、スパース画像処理を用いた解析により、極短時間の発光現象を多次元情報として可視化できる。これにより、極短時間の発光現象を1台のストリークカメラのシングルショットで観測できるようになった。

研究成果の概要（英文）：Recently, it became possible to observe the ultra-fast optical emission phenomenon. It has been difficult to observe spatial observation of the phenomenon with conventional approaches. This project makes it possible to observe the phenomenon as a multi-dimensional information with a compact equipment based on a streak camera. We developed 1) an observation equipment with the polarization optical devices, 2) sparse coding algorithm to reconstruct the multi-dimensional information, and 3) a compact system based on a parallel computing system.

研究分野：デジタル信号処理

キーワード：画像処理 短時間現象 圧縮

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ピコ秒～ナノ秒時間の撮像技術については、近年、ストリークカメラを用いた高速度フレーミング画像技術が検討されており、レーザープローブ光を用いた技術や、スパース画像を用いた技術が検討されていた。以前は高速な現象に対してフレーミングカメラを利用し2次元像を撮像し、更に別途ストリークカメラを用いて時間変化像を撮像する必要があった。これに対して文献では、ストリークカメラ1台だけで極短時間の発光現象の2次元画像とその時間変化像を取得できることが報告された。しかし、レーザーアブレーションやフォトルミネッセンスを利用した分析などには、空間情報を詳細に理解しながら物理現象を把握するための高次元化された観測手法が必要となっていた。一方、光学の分野では波長や強度だけではなく、発光体の偏光特性を効果的に活用した分析方法が開発されつつあり、情報を多次元化できる可能性が見い出されていた。

### 2. 研究の目的

超高速撮像技術の発展により、ピコ秒～ナノ秒時間の発光現象を伴う様々な物理現象の観測が可能となっている。従来の撮像技術では極短時間現象の空間的な観測が不可能であり、物理現象の解明が困難であった。本研究では、1台のストリークカメラで、極短時間スケールの発光現象を、空間+時間の多次元情報として、超高速に撮影できる技術を確立する。これにより、コンパクトなシステムで極短時間現象の時間変化を空間的に観測できるようになる。具体的には、(1) 偏光技術を利用した光学観測装置の開発、(2) スパース画像処理アルゴリズムの最適化、(3) GPUを利用したハードウェア並列化の構造設計を行うことを目的とする。これらを応用して、ピコ秒～ナノ秒の時間スケールを持つ物理現象を、多次元情報として可視化できる技術の構築を目指す。

### 3. 研究の方法

本研究では、偏光スプリッタを用いて観測情報を多次元化できると考え、これに適合するようにスパース画像処理を最適化し、専用の並列化ハードウェアを設計することで、上述の研究目的を達成する。具体的には、研究分担者らがこれまでに築いたストリークカメラによる短時間発光現象の観測装置を基盤として、偏光スプリッタ等の光学系を新規拡張する。撮像されたデジタル情報を、研究代表者らの画像処理技術を基礎として、スパース画像処理を用いたデノイズングと多次元化を行い、GPUとCUDAによる並列処理を最適設計して高速処理を実現する。具体的には、(1) 偏光技術を利用した高速度な多次元撮像の環境を主に研究分担者が構築し、(2) GPUによる並列化を考慮したスパース画像処理技術を主に研究代表者が構築した。その後、両者の成果を統合し、(3) ストリーク像のエンコード・デコード関係とフレーミングイメージの比較実験結果から、(4) システム全体をアライメントしてマンマシンインターフェースを開発し、1台のストリークカメラで極短時間スケールの発光現象を多次元情報として可視化できる技術を確立した。

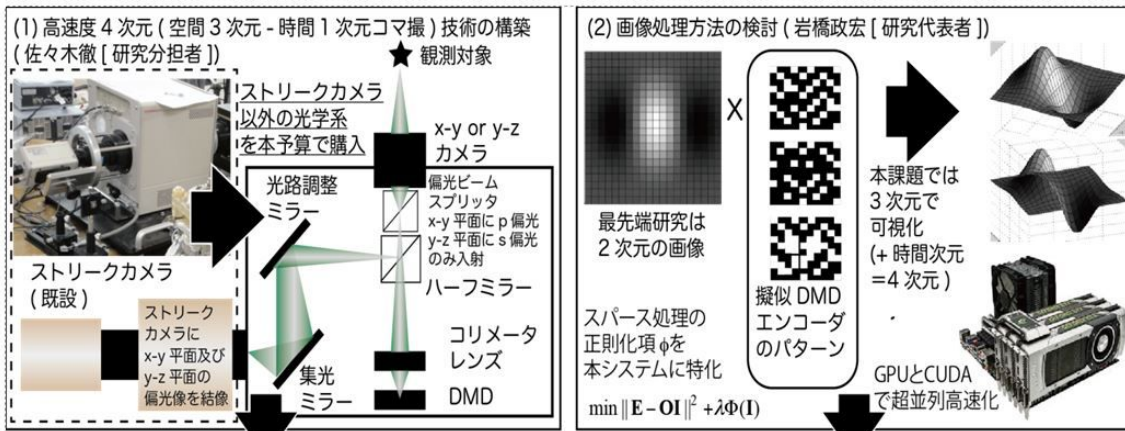
### 4. 研究成果

(1) 偏光技術を利用した高速度4次元撮像環境を主に研究分担者が構築し、(2) GPUによる並列化を考慮したスパース画像処理技術を主に研究代表者が構築した。その後、両者が密に協力して、(3) ストリーク像のエンコード・デコード関係とフレーミングイメージの比較実験を行い、その結果から、(4) システム全体をアライメントしてマンマシンインターフェースを開発した。これにより、1台のストリークカメラで極短時間スケールの発光現象を空間+時間の多次元として可視化できる技術を確立した。

以下、詳細を記述する。

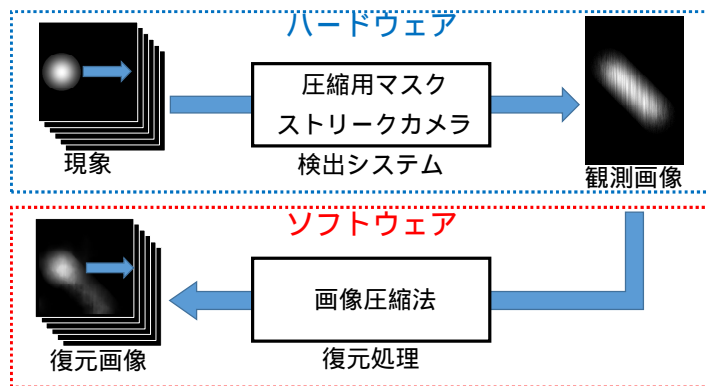
#### (1) 高速度な多次元撮像環境の構築

本研究が目的とするシステムに必須となるストリークカメラ及びフレーミングカメラについては、研究協力者が所有する長岡技術科学大学に設置された装置を用いた。本研究では、その高機能化で必須となる光学系デバイスを新たに設置し、デジタル・ミラーデバイス (Light Crafter, TI) を用いて高速撮像光学系に拡張した。同じ光軸画像を撮像するため、下図のような光学系をセットアップして画像を取得し、高速度フレーミング画像と通常のフレーミング画像を比較した。また、ピコ秒 (ps) ～ナノ秒 (ns) の現象には、nsレーザーを用いたアブレーションプラズマをサンプルとして用い、システムの動作特性を評価して設計条件に反映することで、高精度な測定環境を構築した。

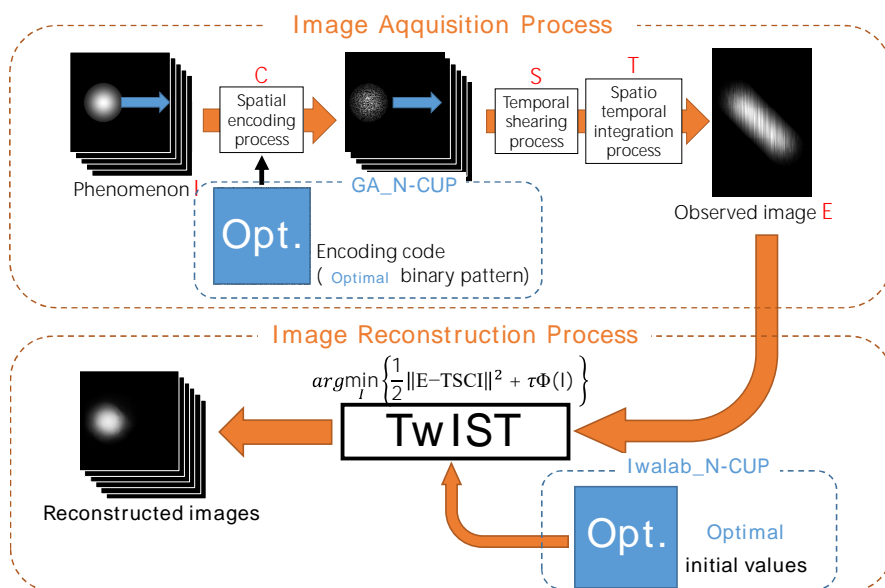


## (2) スパース画像処理技術の構築

DMD (digital micro-mirror device) を導入した撮像系によりシングルショットでの時間相関のシミュレーション画像を生成した。これにスパース画像処理 (CUP 法) を適用することで 2 次元像の時間変化情報を再構成できる信号処理アルゴリズムを TwIST に基づき構築し、その特性を多角的に評価した。

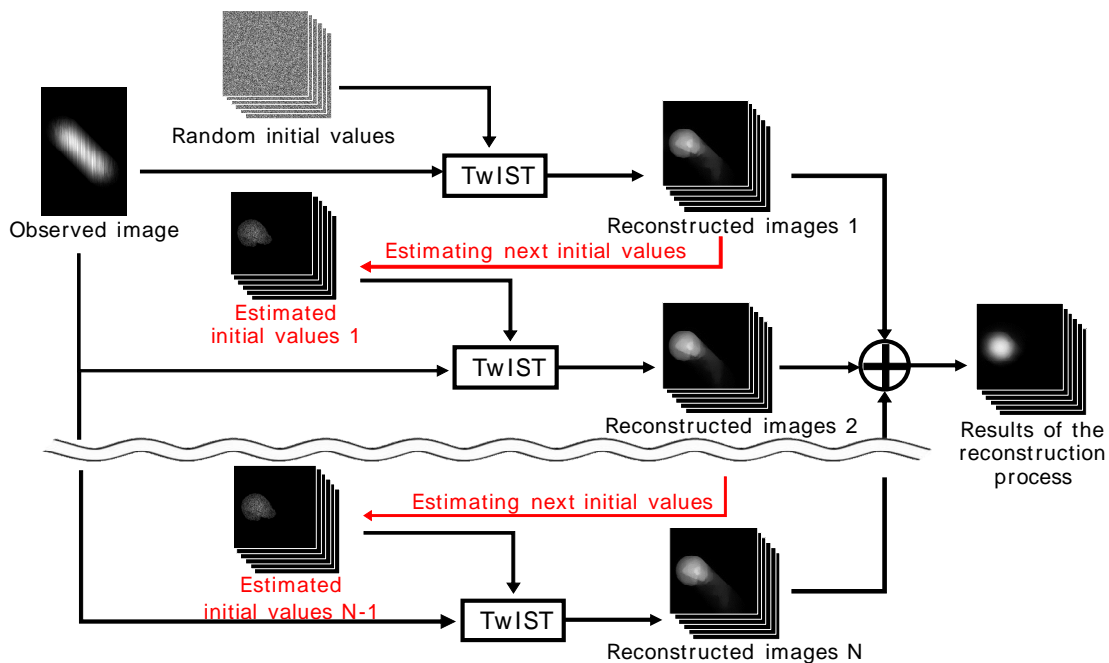


逐次最適化を用いるため膨大な時間がかかるが、GPU と CUDA を用いた並列処理アーキテクチャに基づき、超高速な専用の計算環境を構築した。



再構成実験を行った結果、CUP 法における初期値の生成に問題があることが分かった。このため、TwIST により繰り返し計算における初期画像を予め生成した上で、再度、画像再生を行

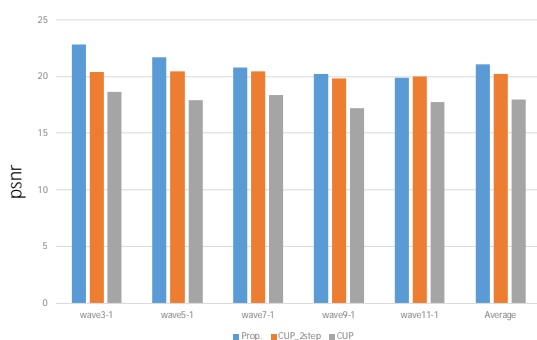
う 2 step CUP 法を提案し、その効果を確認した。また、step 法をマルチステップに拡張し(N-CUP 法) 更なる精度の向上を達成できた。



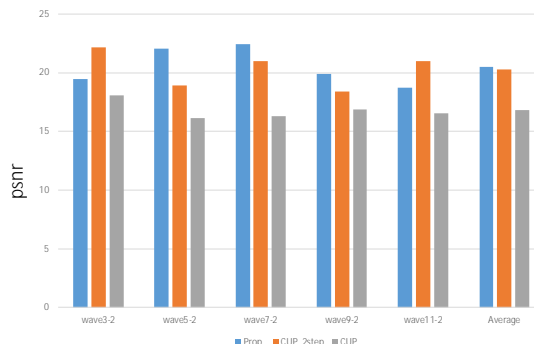
更には、初期画像の輪郭の外形を保持できるような画像処理をエッジベースの判別器として導入することで、再生画像の復元精度を向上させた。この際、動的輪郭法を用いることで、プラズマの発光現象のような観測対象の特性を活用することができた。

	理想画像(GT)	CUP法[1]	CUP_2step法[3]
球状の発光			
微細な発光			

微細な発光に対しての復元性能が不十分



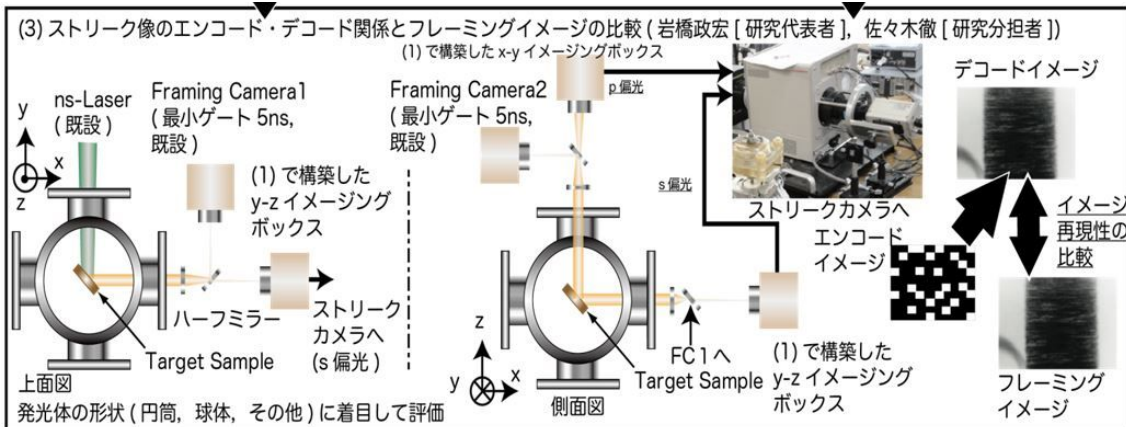
横方向の運動の結果



縦方向の運動の結果

### (3) ストリーク像のエンコード・デコード関係とフレーミングイメージの比較

デジタル・ミラーデバイスのカーネルを制御し、画像処理系との協調最適化を図った。レーザーアブレーションプラズマを利用して、ストリーク像のエンコード・デコード系とフレーミングイメージとの比較を行い、多次元超高速撮影技術の評価を行った。これにより、ストリークカメラ1台で生成される空間+時間の情報について、精度などの特性を明らかにした。



### (4) システム全体のアライメントとマンマシンインターフェースの開発

学術的観点から、スパース画像処理  $\min ||E-O||^2 + \lambda ||L||^1$  (1) における正則化項の本システムへの適合度を調べた。従来法ではスパース画像処理として TwIST を利用していた。本研究では、光学系に導入した DMD のパターンや観測者の所望情報を考慮して FISTA の技術を導入した。また、HDR カメラ撮像画像のコントラスト強調時におけるデノイジング技術の活用法を検討した。最後に、システム全体をアライメントし、ユーザによるパラメータ調整の履歴をベイズ統計処理して、知識蓄積型のユーザーインターフェースを開発した。以上により、極短時間スケールでの発光現象を、空間+時間の多次元の情報として可視化できる技術を確立した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 4 件)

佐々木徹, 永井信一郎, 北島天貴, 高橋一匡, 菊池崇志, 岩橋政宏, "ストリークカメラと画像圧縮法を用いた多方向同時検出システムの開発", 第 35 回 プラズマ・核融合学会年会, 2018.

永井信一郎, 佐々木徹, 岩橋政宏, 菊池崇志, 高橋一匡, 高橋佑介, 北島天喜, "多次元超高速圧縮画像撮影システムの構築に向けた基礎特性の検討", 電気学会新潟支所会, 2018.

Toru Sasaki, Takuma Komiyama, Shinichiro Nagai, Kazumasa Takahashi, Takashi Kikuchi, Taichi Yoshida, Masahiro Iwahashi, "Simulation of ultrafast multidimensional imaging using streak camera and compressed sensing with sparse representation", 10th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, 2017

Masahiro Tsumori, Ryosuke Harakawa, Toru Sasaki, Masahiro Iwahashi, "Restoration of Minute Light Emissions Observed by Streak Camera Based on N-CUP Method", the 11th annual conference organized by Asia-Pacific Signal and Information Processing Association (APSIPA), 2019.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：佐々木徹

ローマ字氏名：THORU SASAKI

所属研究機関名：長岡技術科学大学

部局名：工学研究科

職名：准教授

研究者番号（8桁）：90514018

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：吉田太一

ローマ字氏名：TAICHI YOSHIDA

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。