

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成30年6月20日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03989

研究課題名(和文) コンピュータショナル超高速複眼撮像素子の開発と距離画像計測・光加工への応用

研究課題名(英文) Development of computational ultra-fast compound-eye image sensor and its applications to range imaging and laser processing monitoring

研究代表者

香川 景一郎 (Kagawa, Keiichiro)

静岡大学・電子工学研究所・准教授

研究者番号：30335484

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：光学系・信号処理と協調することで超高速現象を1ナノ秒の時間分解能で動画記録する専用CMOSイメージセンサを開発した。マルチアパーチャ光学系を利用した超高速イメージセンサにより、透明物体の表面反射で生じるマルチパス光の分離、レーザー加工プラズマのシングルショット動画撮影に成功した。また、像面マルチアパーチャに基づく時間分解能1ナノ秒のCMOSイメージセンサを設計し、制御回路の動作を確認した。

研究成果の概要(英文)：A dedicated CMOS image sensor which films phenomena with a 1-ns time resolution in cooperation with optics and signal processing. With a multi-aperture-based ultra-fast image sensor, separation of surface reflection in time-of-flight range imaging and single-shot filming of a plasma generated in laser processing were demonstrated. A focal-plane-multi-aperture ultra-fast CMOS image sensor with a 1-ns time resolution was designed and fabricated. Operation of the timing generator was verified.

研究分野：情報光学

キーワード：超高速カメラ CMOSイメージセンサ コンピュータショナルイメージング レーザー加工 光飛行時間
距離画像計測

1. 研究開始当初の背景

半導体固体撮像素子は、世界において日本の技術力の高さが際立っているデバイスである。その中でも超高速撮像素子は、車の衝突試験や素材の破壊試験などのモノづくりから、生化学・物理における超高速科学現象の解明に必要不可欠である。また、半導体集積回路の特徴を活かし、小型で扱いやすく、広い適用性をもつ。今までに時間分解能 50ns が達成され、1ns を目指した開発が進められている。高速化のためには、消費電力増大による発熱、大電流によるエレクトロマイグレーションなどの課題を解決せねばならず、サブナノ秒以下の超高速撮像の実現には大きな困難が伴う。

特殊な時間分解撮像素子として、光の飛行時間(TOF: time of flight)を画像化する距離画像撮像素子がある。その計測原理には大別して直接法・間接法があるが、それぞれ一長一短がある。直接法は距離分解能が高く数 10m 以上の広い計測レンジをもつが、信号処理回路が複雑で、画素点数(空間解像度)を増やすことが難しい。間接法は処理が簡単で高画素化に向いているが、距離精度と測定レンジがトレードオフの関係にあり、両方を満たすことが難しい。

一方で、センシング(光学系、撮像デバイス)と後処理を融合した新しいイメージング技術としてコンピュータショナルイメージング(またはカメラ)が注目されている。圧縮センシングはその代表例で、被計測信号のスパース性を利用することで、少ないサンプリング点数から、より多くのデータ点数をもつ原信号を復元する。このような考え方を取り込んだ撮像素子が研究代表者を含め一部で開発され始めており、カメラシステムの性能や機能の向上が期待されている。撮像素子の画素微細化が回折限界に迫り、次の技術開発に行き詰まり感が漂う中、処理と調和し、なおかつ高い汎用性をもつ高機能撮像素子の開発の重要性が高まっていた。

2. 研究の目的

本研究では、処理とセンシングを融合した新しい概念に基づく超高速時間分解複眼撮像システムのための世界最高速の半導体撮像素子を開発する。本研究で開発する撮像素子は、要素撮像素子(個眼またはアパーチャ)の 2 次元アレイ(複眼またはマルチアパーチャ)であり、個眼毎に異なる時間符号化シャッタにより取得した複眼画像から逆問題を解き、時間分解連続画像を再構成する。個眼を独立・協調動作させることで、拡張性と時間分解能を兼ね備えた超高速複眼撮像素子アーキテクチャを確立し、デバイス試作により実証する。

また、本カメラの微弱光の繰返し蓄積計測を用いた圧縮光飛行時間距離画像計測(高精度とロングレンジを両立する距離画像センシング)、高輝度現象のシングルショット計

測(レーザー加工条件とプラズマの時間発展の関係性を調べる)への応用を通じて、科学における多様な超高速現象の解明と工学的応用に本カメラを適用する技術基盤を確立する。

3. 研究の方法

A. マルチアパーチャ超高速カメラ

図 1 に本研究の基盤となるマルチアパーチャ超高速カメラのアーキテクチャを示す。被写体像をレンズアレイにより複数コピーし、要素イメージセンサの画素内で時間的なランダム符号化シャッタとの内積を電荷領域でとる。これにより、従来の超高速イメージセンサでボトルネックとなっていた画素アレイ・オンチップフレームバッファ間のデータ転送を無くし、フレームレートを従来よりも 1 桁高めることに成功している。

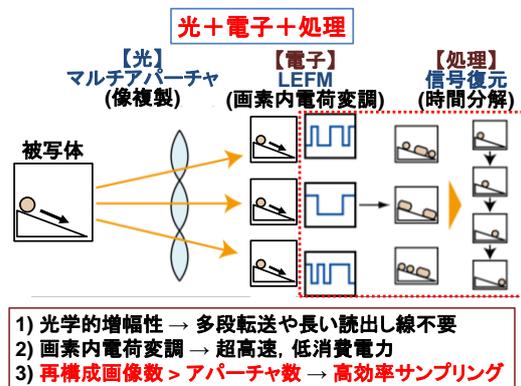


図 1) マルチアパーチャ超高速カメラの概念

A1. 位相シフト法

超高速イメージセンサの応用の 1 つとして、光の飛行時間に基づく距離画像計測がある。その 1 つの方法として位相シフト法があり、イメージセンサと光源を同期して、光源の光強度を正弦波状に変調し、4 つのタイミングで受信光強度を計測し、受信光信号の位相遅れから距離を求める。本研究では、マルチアパーチャ超高速カメラにこの方式を適用した。

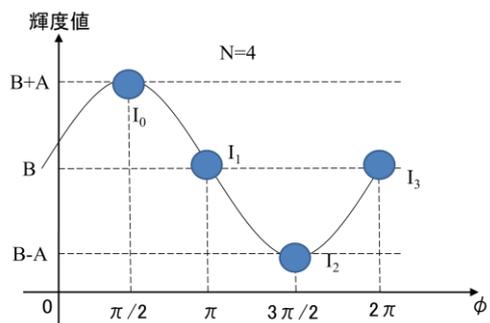


図 2) 位相シフト法に基づく距離計測

A2. 圧縮 TOF によるロングレンジ計測およびマルチパスの分離

TOF にはインパルス光を用いる方式がある。

TOF では、透明物体の表面における反射などにより、複数経路の光が混合することで計測距離に誤差が生じるマルチパスの問題がある。本研究では、TOF に圧縮センシングを適用することで反射光のヒストグラムを復元し、物体光と干渉光を分離することを試みた。(図 3)

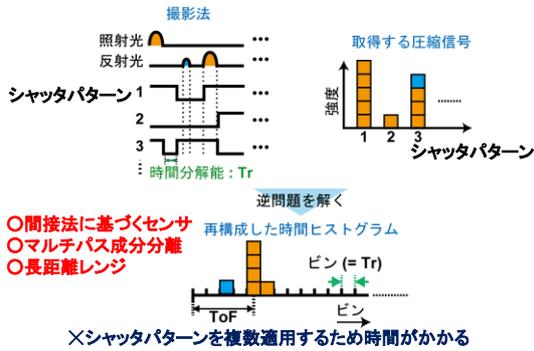


図 3) 圧縮センシングによるマルチパスの分離

B. レーザー加工時のプラズマ観察

レーザーを用いた光加工は現在広く使われているが、その際に生じるプラズマは加工条件と強く関連している。プラズマ発光は数 10 ナノ秒からマイクロ秒程度の高速な現象であり、レーザーパルス 1 発ごとに被加工材の表面状態が変わるため、シングルショットでの超高速撮像が要求される。本研究では、マルチアパーチャ超高速カメラにより、プラズマ発光に同期してカメラを動作させ、プラズマの時間変化を動画として捉えることを試みた。

C. 像面マルチアパーチャ方式 1Gfps イメージセンサの開発

マルチアパーチャ光学系は多くの可能性をもつが、従来のシングルアパーチャレンズとの互換性が低いため、利便性の点で課題がある。そこで、シングルアパーチャレンズを利用しながらマルチアパーチャの効果を得るために、複数の画素から成るブロックを配列し、ブロック内の画素ごとに異なる符号化シャッタを適用して撮影する像面マルチアパーチャ方式超高速 CMOS イメージセンサを開発した。(図 4)

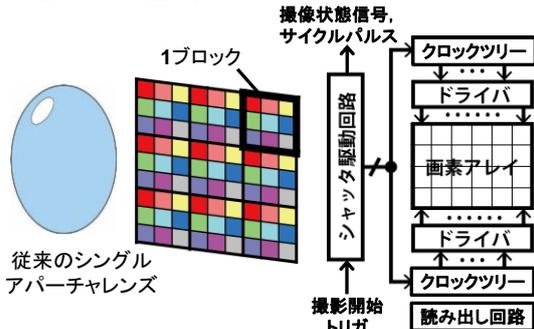


図 4) 像面マルチアパーチャ方式

4. 研究成果

A. マルチアパーチャ超高速カメラを用いた TOF

A1. 位相シフト法

波長 630nm の LED を 10MHz で強度を正弦波変調し、位相シフト法による反射光強度波形を計測した。実験では、マルチアパーチャに生じる視差を除去した後、108×63 画素の原画像 9 枚から逆問題を解くことで、128 枚の画像を再構成し、復元時の時間分解能 6 ナノ秒を達成した。

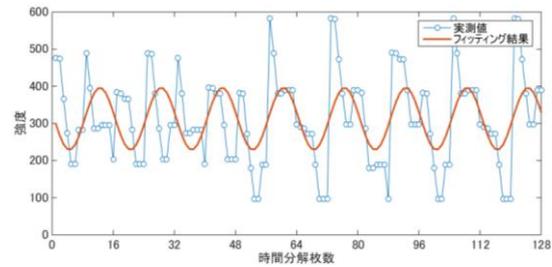


図 5) 再構成した位相シフト法における時系列信号

A2. 圧縮 TOF によるマルチパスの分離

波長 850nm, パルス幅 5ns の半導体レーザーを用い、圧縮センシングを適用して TOF 信号を取得した。15 個のアパーチャから 32 枚の時系列信号を再構成した。ミラー物体の手前に透明アクリル板を置き、その表面反射(干渉光)を物体光から分離することを試みた(図 6(a)). 図 6(b)に非圧縮で計測した結果と圧縮画像から再構成した画像を示す。透明アクリル板とミラー間隔が 1.3m 以上の時に分離に成功した。

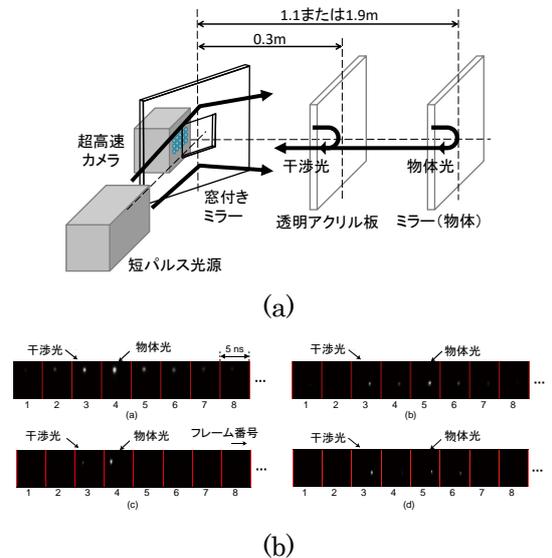


図 6) 圧縮 TOF (a) 計測計, (b) 実験結果

B. レーザー加工時のプラズマ観察

図7に示す系を用いて、金属のレーザー加工時に生じるプラズマのシングルショット動画撮影を行った。波長 1064nm, パルス幅 1.62 ナノ秒の加工用レーザーを対物レンズで被加工材上または近傍に集光した。プラズマ発光は一瞬であるので、トリガのかけかたが重要である。実験では超高速イメージセンサを連続撮影状態にし、高速フォトダイオードで捉えたプラズマ発光をトリガとして撮影を停止し、画像をセンサから読み出した。図8は銅板の加工時に発生したプラズマを捉えた結果である。プラズマ発光は 20 ナノ秒程度に渡って起こり、それを1コマ5ナノ秒の時間分解能で捉えることに成功した。

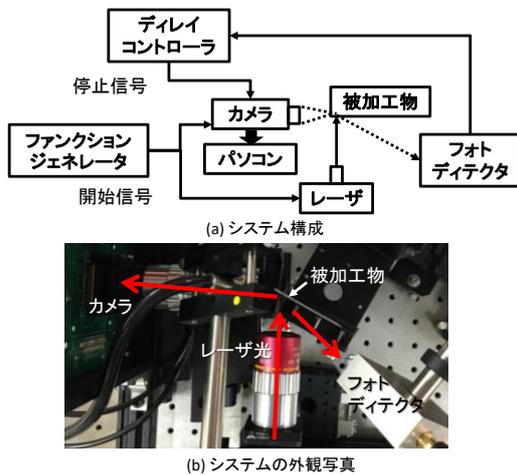


図7) レーザープラズマ計測系

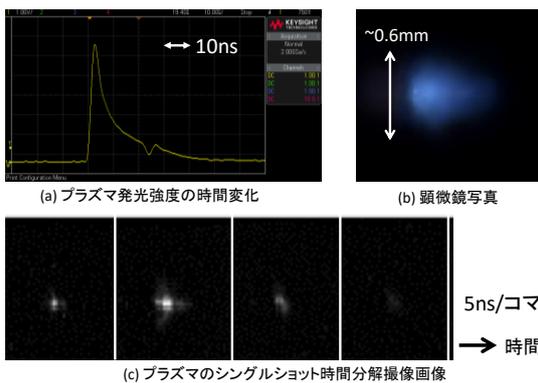


図8) 計測結果. 銅板の表面からレンズ側12mmの位置にレーザーを集光した。

C. 像面マルチアパーチャ方式 1Gfps イメージセンサの開発

C1. シミュレーションによる特性予測 像面マルチアパーチャ方式の性能を、シミュレーションにより検討した。

条件として、1画素当たりの電荷蓄積部の数、ブロック内の画素数、圧縮率を変化させ、センサのランダムノイズとフォトンショットノイズを加味して、3種類の高速度画像の再構成画像品質を評価した。その結果、4つの電荷蓄積部をもつ画素を利用し、ブロック内画素数を 2×2 とした場合に、良好な画像再構成が実現できることを明らかにした。(図9)

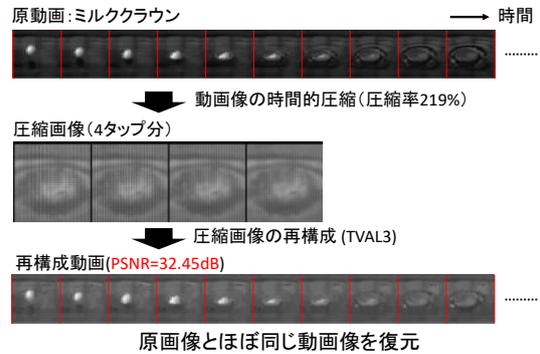


図9) 像面マルチアパーチャ方式のシミュレーション結果

C2. LSI 設計・試作・制御回路動作確認

前述のシミュレーション結果に基づき、最大 500MHz (フレームレートで5億枚毎秒)で動作する像面マルチアパーチャ方式超高速 CMOS イメージセンサを設計・試作した。図11に示すように、符号化シャッタを生成するコア回路が最大 500MHz で正しく動作することを確認した。このセンサは逆相クロックを併用することで、実効 10 億枚毎秒の超高速撮影を行うモードをもつ。

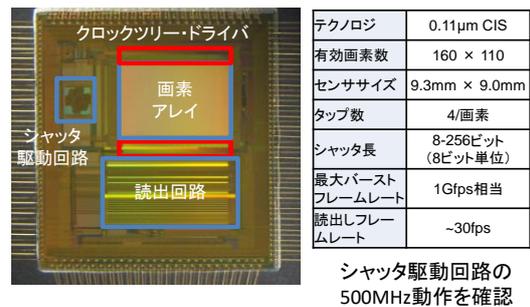


図10) 試作した像面マルチアパーチャ超高速 CMOS イメージセンサ

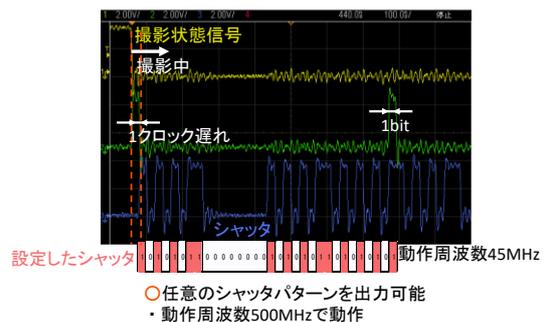


図11) 動作確認結果

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 4 件)

1) F. Mochizuki, K. Kagawa, R. Miyagi, M-W. Seo, B. Zhang, T. Takasawa, K. Yasutomi, and S. Kawahito, "Separation of multi-path components in sweep-less time-of-flight depth imaging with a temporally-compressive multi-aperture image sensor," ITE Trans. on MTA, Vol. 6, Issue 3 (to appear, 2018).

2) F. Mochizuki, K. Kagawa, S. Okihara, M. -W. Seo, B. Zhang, T. Takasawa, K. Yasutomi, and S. Kawahito, "Single-event transient imaging with an ultra-high-speed temporally compressive multi-aperture CMOS image sensor," Optics Express, Vol. 24, Issue 4, pp. 4155-4176 (2016), DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.24.004155>

3) K. Moriguchi, D. Miyazaki, T. Mukai, F. Mochizuoki, K. Kagawa, and S. Kawahito, "Time-of-flight range image sensor based on exposure coding with a multi-aperture imaging system," ITE Trans. on MTA, Vol. 4, No. 1, pp. 78-83 (2016), DOI: <https://doi.org/10.3169/mta.4.78>.

[学会発表] (計 21 件)

1) F. Mochizuki, K. Kagawa, S. Okihara, M-W. Seo, B. Zhang, T. Takasawa, K. Yasutomi, S. Kawahito, , "Single-shot/repetitive 200Mfps compressive CMOS image sensor," The 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics (31st ICHSIP), pp. 80-83 (2016).

2) K. Kagawa, F. Mochizuki, M. -W, Seo, K. Yasutomi, and S. Kawahito,

"Multi-aperture ultra-high-speed imaging with lateral electric field charge modulator," in Proc. of Photonics West 2016, Paper 9720-2 (2016).

3) 香川 景一郎, 望月 風太, 徐 珉雄, 安富 啓太, 川人 祥二, "光学系・イメージセンサ・処理を融合した超高速撮像", 高速度イメージングとフォトニクスに関する総合シンポジウム 2015 (2015).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

香川 景一郎 (KAGAWA, Keiichiro)
静岡大学・電子工学研究所・准教授
研究者番号 : 30335484

(2) 研究分担者

沖原 伸一郎 (OKIHARA, Shinichiro)
光産業創成大学院大学・光加工・プロセス分野・准教授
研究者番号 : 50410535

宮崎 大介 (MIYAZAKI, Daisuke)
大阪市立大学・工学研究科・准教授
研究者番号 : 60264800

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし