

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686046

研究課題名(和文) 処理・センシング融合型時間多重複眼撮像システム

研究課題名(英文) Multi-aperture image acquisition systems based on a fusion of processing and sensing

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) 11,700,000円

研究成果の概要(和文)：シリコンイメージセンサとして世界最速となる2億枚毎秒のフレームレートを実現する超高速イメージセンサおよびカメラシステムを開発した。これは、光(マルチアパーチャ)・電子(超高速時間分解画素)・処理(圧縮センシング)を融合した新しい概念に基づいている。符号化シャッタを用いた多重露光と撮影後の信号復元処理により、従来のシリコン超高速イメージセンサにおけるボトルネックを解消し、撮像速度を向上した。さらに、撮影した枚数よりも多い画像を復元でき、従来の超高速カメラよりも撮影効率が高いことが特徴である。

研究成果の概要(英文)：We have developed an ultra-high-speed camera performing 200M frames per second, which is based on a fusion of optics (multi-aperture optics), electronics (ultra-high-speed time-resolving charge modulation pixel), and processing (compressive sampling). Our scheme has solved the bottleneck of the ultra-high-speed image sensors and achieved the highest frame rate among the silicon image sensors by utilizing coded shutters, multiple exposure, and signal reproduction. Furthermore, higher capturing efficiency that more frames are reproduced than the captured frames is realized than that of the conventional ultra-high-speed cameras.

研究分野：情報光学

キーワード：超高速カメラ 圧縮サンプリング マルチアパーチャ CMOSイメージセンサ 時間分解 レンズアレイ
電荷変調

1. 研究開始当初の背景

固体撮像素子は、世界における日本の貢献が大きい分野であり、超高速撮像素子もその一つである。100万枚毎秒以上のフレームレートをもつ撮像素子が、近畿大学や東北大学で開発されており、最近では2,000万枚毎秒のフレームレート(時間分解能50ナノ秒に対応)が達成されている。超高速撮像素子の多くは、連続撮影可能なフレーム数分の電荷または電圧信号記憶部を素子上にもち、撮影後に順次読み出す。このような方式では、フレームレートと画質がトレードオフの関係にあるため、時間分解能をサブナノ秒まで高めることには大きな困難が伴う。一方、静岡大学ではDOM(Doraining Only Modulation)方式の超高速電荷制御技術が研究されている。既にナノ秒オーダの時間分解能が報告され、さらなる高分解能化が研究されている。しかし、これは繰り返し現象の計測を前提としており、素子上にフレームメモリをもたないため、単発現象の高速連続撮影には適用できない。サブナノ秒分解能の超高速撮影は、細胞内生化学反応や、フェムト秒レーザー加工におけるプラズマ発光の解析における重要性が日々高まっている。

申請者は、大阪大学の研究者らとともに、レンズアレイに単一の撮像素子を組み合わせた小型複眼カメラを研究しており、被写界深度拡張と、反復法を用いた超解像を適用した高機能立体内視鏡の研究において成果を上げている。複眼カメラは、最近欧米を中心に活発に研究されているCOSI(Computational Optical Sensing and Imaging)という分野に分類される。これは、光の領域で変調や符号化を行い、一見それ自身は被写体を正しく写していないように見える(ぼやけるなどした)画像を撮影し、後処理(逆フィルタ処理など)により原信号を回復する。この方式を用いることで、従来の撮像システムでは得られなかったような、高い波長分解能をもつマルチスペクトル撮像システムや、3次元顕微鏡などが研究されている。このような劣化や多重化された計測信号から原信号を推定する信号処理技術として、圧縮サンプリング(compressive sampling)が近年注目されている。前述の大阪大学の研究者らにより、圧縮サンプリング技術を複眼系に適用した多次元情報取得法が提案されている。

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の超高速撮像システム、およびその基本素子である時間多重複眼撮像素子の研究を行う。サブナノ秒時間分解能の高解像度超高速撮像を目指し、撮像素子の試作を通じた実証を行うことを目的とする。また、プラズマ発光、細胞の生化学反応、蛍光発光・消光過程など、単発の高速現象の解明に貢献する。

3. 研究の方法

本研究では、デバイスのみではなく、光・電子デバイス・処理の3つを融合することで超高速撮像を実現することを狙った。そのために、図1に示すように、マルチアパーチャカメラ、ラテラル電界変調画素、圧縮センシングを用いた。マルチアパーチャカメラとは、レンズとイメージセンサの組み合わせを複数用いたカメラであり、3次元カメラなどへの応用が活発に研究されている。また、ラテラル電界変調画素は、静岡大学川人らにより提案されたナノ秒以下の電荷制御を可能とするCMOSイメージセンサの画素技術であり、蛍光寿命イメージングや光飛行時間を用いた距離画像計測への応用が研究されている。これを用いることで、電子シャッタを画素レベルで高速に自由に関閉めしながら電荷を蓄積できる。

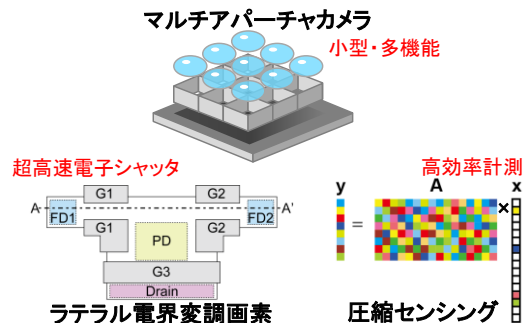


図1 光・電子デバイス・処理を融合による超高速カメラの実現

圧縮サンプリングは、原信号のスパース性を利用することで、少ない測定回数で原信号を圧縮して計測し、逆問題を解くことで原信号を復元する、最近注目されている新しいサンプリング手法である。本研究では、図2に示すように、アパーチャ毎に異なる時間的にランダムに変化させたシャッタパターンを適用して時間的多重像をレンズ数だけ撮影し、計算機上で逆問題を解くことで一連の時間分解画像を得る。これにより、シングルイベントの計測が可能である。

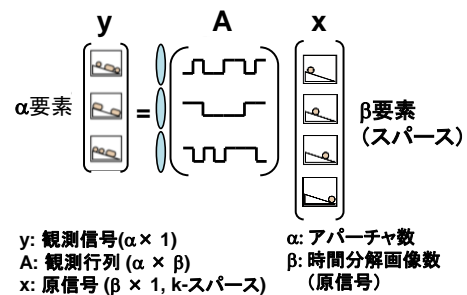


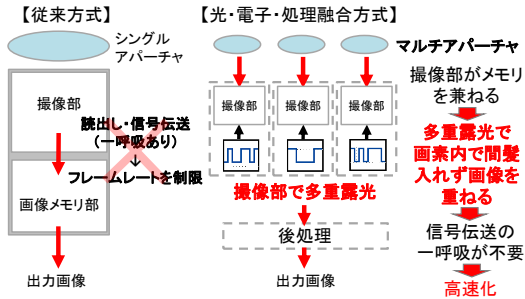
図2 圧縮センシングのマルチアパーチャカメラへの適用

従来の超高速イメージセンサと提案方式の比較を図3に示す。本提案方式において最も重要なことは、撮影中に画像を読み出さな

いことである。撮影中は、時間的に変化するシャッタパターンにより変調して、画素内に電荷を蓄積するだけである。そのため、理想的には電荷転送速度のみがフレームレートを決定し、高速化が可能となる。

これに対し、従来の超高速イメージセンサでは、1フレーム分画素で電荷を蓄積するごとに、全画素の画素値を読み出し、センサ上のフレームメモリへ信号（または電荷）転送する必要がある。CCDとCMOS方式共に、これがフレームレート向上を難しいものにしてきた。

また、提案方式におけるアパーチャの数は、従来方式におけるセンサ上のフレームメモリ数（=連続撮影可能枚数）に対応する。圧縮サンプリングの利用により、アパーチャ数よりも多くの画像を復元することができ、撮影効率が高いことも本提案方式の利点である。

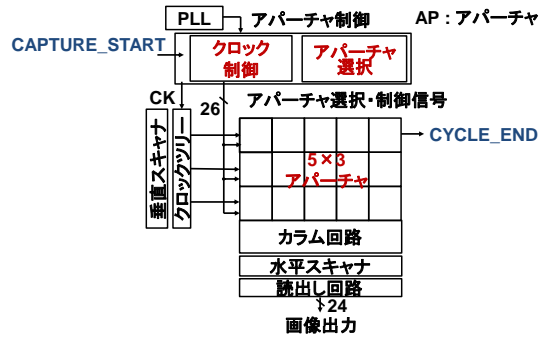


【高速】 電気による信号伝送の一呼吸が無い
【高効率】 撮影画像数 < 処理後の復元画像数

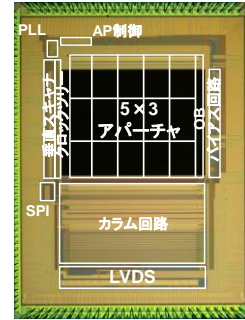
図3 従来の超高速イメージセンサと提案手法の比較

4. 研究成果

試作したイメージセンサのブロック図4とチップ写真、および仕様をそれぞれ図4と表1に示す。センサは5×3眼のマルチアパーチャ構造をもち、アパーチャ制御部によりシャッタパターンの書き込みと撮像用のクロック供給を行う。図5にアパーチャ構造を示す。それぞれのアパーチャはシャッタパターンを記憶するシャッタパターンメモリとシャッタパターン終了位置メモリを持ち、最大128ビットのシャッタパターンを生成できる。シャッタ生成はスタート/ストップ検出部により制御され、ノンオーバーラップ信号生成部、クロックツリーを介して、画素アレイを駆動する。トリガ信号CAPTURE_STARTをHに設定すると撮影を開始し、1回シャッタパターンを出力すると、CYCLE_ENDに短いHパルスが出力される。これを外部で数えることで、シャッタを1~任意回繰り返すことができる。CAPTURE_STARTをLにすると、その時のシャッタを出力した後に撮影が終了する。シングルショット撮影の場合は、CAPTURE_STARTをHにした直後にLにする。



(a)



(b)

図4 試作したイメージセンサ:
(a) ブロック図, (b) チップ写真

表1 イメージセンサ仕様

画素数	64H × 108V
画素ピッチ	11.2μm ^H × 5.6μm ^V
アパーチャ数	5 ^H × 3 ^V
チップサイズ	7.0mm × 9.3mm
製造技術	0.11μm CIS
読出しフレームレート	15fps
連続読出し画像枚数 (処理後)	32 (comp. ratio≒47%)
フレームレート	200Mfps
消費電力	1.62W@200Mfps

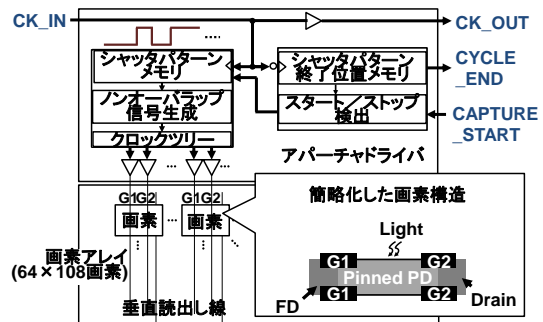


図5 アパーチャ構造

図5に本センサの画素構造であるラテラル電界制御型画素の上面図とポテンシャルの簡略図を示す。PD (Photodiode) の両側面に蓄積部であるFD (Floating diffusion) が1つずつ備わっており、G (Gate) 1, 2のどちらかに電圧をかけるかによってPDで発生した電荷の振り分け先を選択する。この画素構造

は信号経路上にトラップが発生しないため高速であり、サブナノ秒オーダの電荷転送時間が可能である。そのため数百 MHz のクロック周波数でシャッタパターンを変化させても、光電荷が正確に振り分けられる。また蓄積時間中に PD に発生した全ての電荷をどちらかの FD に振り分けるため、電荷の損失が無いという利点がある。

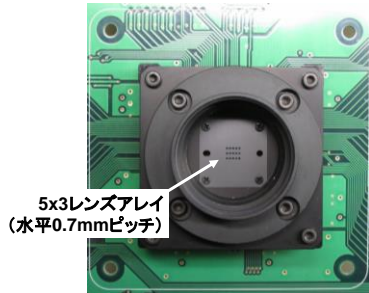
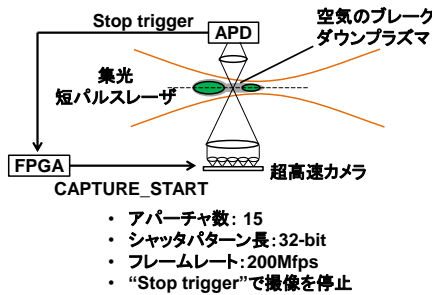
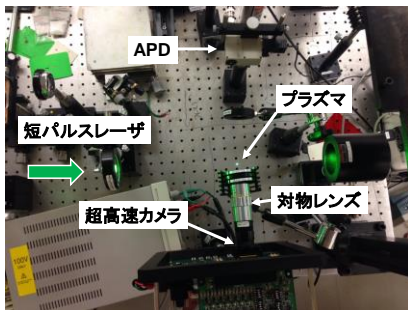


図 6 マルチアパーチャ超高速カメラ



(a)



(b)

図 7 実験系

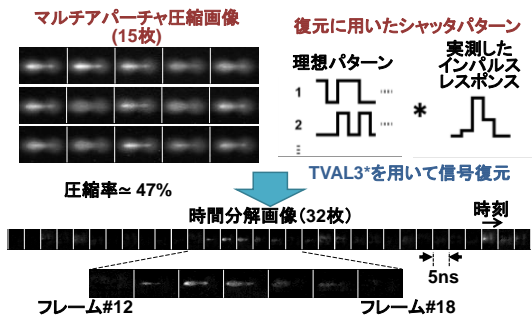


図 8 実験結果

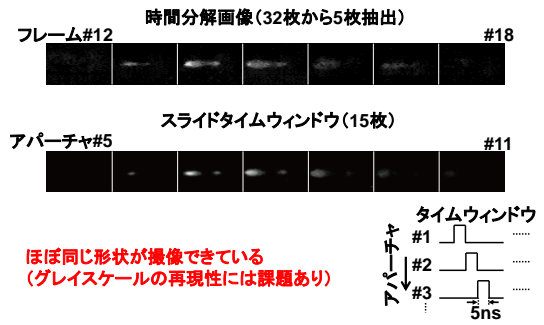


図 9 シングルショット非圧縮撮像結果との比較

開発した CMOS イメージセンサの時間分解能特性を計測した結果、シャッタパターンを生成するデジタル回路の問題で 200MHz までしか動作しなかったため、最高時間分解能 (1 フレーム当たりの時間) は 5ns に留まった。イメージセンサに適合するレンズアレイを試作し、イメージセンサ上に実装した写真を図 6 に示す。市販の焦点距離 3mm, 外形 1.0mm のダブルレットレンズの両側をカットし、横 0.7mm, 縦 1.2mm ピッチで横 5 個, 縦 3 個配列し、接着剤により固定した。観察対象が小さい場合、この前方に対物レンズを配置して利用する。

超高速圧縮撮像の準備段階として、圧縮サンプリングのソルバーとして、インターネット上でソースコードが公開されている TVAl3 を用いた。復元像の再現性を PSNR を用いてシミュレーションにより評価し、一定の拘束をかけた条件で、再現性の良いシャッタパターンを選んだ。

測定対象として、ナノ秒 YAG レーザの 2 倍高調波による空気のブレークダウンプラズマを選択し、シングルショットによる超高速撮影を試みた。図 7 に実験系を示す。イメージセンサを連続撮影状態とし、プラズマ発光をトリガとして撮影を停止して画像を読み出した。図 8 に撮影したマルチアパーチャ画像のシングルショット撮影結果と、その復元画像を示す。15 個のマルチアパーチャ画像から逆問題を解くことで、1 枚当たりの時間分解能 5ns で 32 枚の連続画像を復元することに成功した。これは、シリコンイメージセンサにおける世界最高速度である。また、図 9 に示す様に、圧縮しない状態でシングルショット撮影した結果と比較し、両者が近いことを確認した。マルチアパーチャ画像に含まれる視差を十分補正できなかったこと、レンズ間の明るさの違い、歪曲収差などが原因で、これらが完全には一致しなかったと考えられる。

また、USAF チャートとピコ秒パルスレーザで照明し、繰り返し蓄積により圧縮撮像した。圧縮撮像ではシャッタのデューティ比を 50% と高く設定できるため、圧縮しない場合の 6.7% (~1/15) よりも高い S/N の画像を復元することができた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- 1) “多眼性を利用した高機能複眼カメラ,” 香川景一郎, システム/制御/情報, Vol. 58, No. 10, pp. 404-413 (2014)[査読有り]

[学会発表] (計 16 件)

- 1) F. Mochizuki, K. Kagawa, S. Okihara, M. -W. Seo, B. Zhang, T. Takasawa, K. Yasutomi, S. Kawahito, “Single-shot 200Mfps 5x3-aperture compressive CMOS imager,” ISSCC Dig. Tech. Papers, pp. 116-117 (San Francisco (USA), 2015 年 2 月 23 日).
- 2) 望月風太, 香川景一郎, 沖原伸一朗, ソミンウン, 張博, 高澤大志, 安富啓太, 川人祥二, “画素内圧縮型マルチアパーチャ超高速イメージセンサによる 200Mfps バースト撮影”, 映像情報メディア学会情報センシング研究会, 映情学技報, Vol. 39, No. 16, pp. 45-48 (機械振興会館 (東京都港区), 2015 年 3 月 27 日).
- 3) K. Kagawa, T. Takasawa, M. -W. Seo, K. Yasutomi, S. Kawahito, “Designing CMOS image sensors as a key building block of new camera systems,” Proc. of The 16th Takayanagi Kenjiro Memorial Symposium, pp. NM2-1-1 - NM2-1-2 (静岡大学佐鳴会館 (静岡県浜松市), 2014 年 11 月 12 日).
- 4) K. Moriguchi, D. Miyazaki, K. Kagawa, F. Mochizuki, “High-speed three dimensional measurement by coding of exposure time and TOF with a multi-aperture imaging system,” Proc. of 2nd Assan Image Sensors and Imaging Systems Symposium, ITE tech. report, Vol. 38, No. 47, pp. 45-46 (東京工業大学田町キャンパス (東京都港区), 2014 年 12 月 1 日).
- 5) 望月風太, 高澤大志, 香川景一郎, ソミンウン, 安富啓太, 川人祥二, “画素内圧縮型マルチアパーチャ超高速イメージセンサによる撮像実験”, 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2014 講演予稿集, 5aDS21 (筑波大学東京キャンパス文京校舎 (東京都文京区), 2014 年 11 月 5 日).
- 6) K. Kagawa, K. Yasutomi, S. Kawahito, “Multi-point and multi-aperture time-resolving CMOS image sensors,” Proc. Int’l Symp. on Optical Memory (ISOM’14), We-I-01, pp. 68-69 (Hsinchu (Taiwan), 2014 年 10 月 20-23 日).
- 7) 香川景一郎, 川人祥二, “高性能・高機能マルチアパーチャセンサとカメラおよびその応用”, 映像情報メディア学会情報

- センシング研究会, 映情学技報, Vol. 38, No. 26, pp. 31-35 (大社文化プレイスうらら館 (島根県出雲市), 2014 年 7 月 3 日). [招待講演]
- 8) F. Mochizuki, T. Takasawa, K. Kagawa, M-W. Seo, K. Yasutomi, and S. Kawahito, “An ultra-high-speed compressive multi-aperture CMOS image sensor,” Imaging Systems and Applications, IWIC.4 (Seattle (USA), 2014 年 7 月 13-17 日).
- 9) 香川景一郎, 谷田純, 川人祥二 “3D だけではない多眼カメラの新展開: 小型高機能と超高性能の実現”, 画像センシングシンポジウム, OS3-2 (パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市), 2014 年 6 月 11-13 日). [招待講演]
- 10) 望月風太, 高澤大志, 香川景一郎, ソミンウン, 安富啓太, 川人祥二, “画素内圧縮型マルチアパーチャ超高速イメージセンサの検討”, 映像情報メディア学会情報センシング研究会, 映情学技報, Vol. 38, No. 20, pp. 1-4 (東京理科大学森戸, 記念館 (東京都新宿区), 2014 年 6 月 2 日).
- 11) 望月風太, 高澤大志, 香川景一郎, ソミンウン, 安富啓太, 川人祥二, “画素内圧縮型マルチアパーチャ超高速イメージセンサと撮像実験”, LSI とシステムのワークショップ, ポスターセッション, 6 (北九州国際会議場 (福岡県北九州市), 2014 年 5 月 26 日).
- 12) 望月風太, 高澤大志, 香川景一郎, ソミンウン, 安富啓太, 川人祥二, “画素内圧縮型マルチアパーチャ超高速イメージセンサの提案と撮像”, 映像情報メディア学会情報センシング研究会, 映情学技報, Vol. 37, No. 48, pp. 9-12 (静岡大学佐鳴会館 (静岡県浜松市), 2013 年 11 月 15 日).
- 13) K. Kagawa, “Multi-aperture Cameras and CMOS Image Sensors,” Asian Symposium on Advanced Image Sensors and Imaging Systems, Hamamatsu (Oct., 2013). [招待講演]
- 14) 望月風太, 香川景一郎, ソミンウン, 安富啓太, 川人祥二, “画素内圧縮型マルチアパーチャ超高速イメージセンサの提案と動作検証”, 平成 25 年度 電気関係学会東海支部連合大会, I1-3 (静岡大学 (静岡県浜松市), 2013 年 9 月 24-25 日).
- 15) F. Mochizuki, K. Kagawa, M-W. Seo, K. Yasutomi, and S. Kawahito, “Multi-aperture high-speed CMOS imager,” 13th Int’l Conf. on QiR, pp. 927-930 (Yogyakarta (Indonesia), 2013 年 6 月 25-28 日).
- 16) 望月風太, 香川景一郎, ソミンウン, 安富啓太, 川人祥二, “画素内圧縮型マルチアパーチャ超高速イメージセンサの提

案,” 映像情報メディア学会情報センシング研究会, 映情技報, Vol. 37, No. 22, pp. 17-19 (埼玉大学東京ステーションカレッジ (東京都千代田区), 2013年5月31日).

〔図書〕 (計 0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1件)

名称: 距離画像計測装置
発明者: 香川景一郎, 川人祥二, 望月風太, 安富啓太
権利者: 静岡大学
種類: 特許
番号: 特願 2015-032121
出願年月日: 平成 27年 2月 20日
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0件)

〔その他〕

新聞報道等

- 1) 静岡新聞
<http://www.at-s.com/news/detail/1174181076.html>
- 2) 日刊工業新聞
<http://www.nikkan.co.jp/news/nkx0720150304eaal.html>
- 3) 朝日新聞 (静岡)
<http://www.asahi.com/articles/ASH334F2HH33UTPB00F.html>
- 4) オプトロニクスオンライン
<http://optronics-media.com/news/20150305/30289/>

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