

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01497

研究課題名(和文) マルチアパーチャ・マルチタップCMOSイメージセンサによる機能的生体イメージング

研究課題名(英文) Functional biomedical imaging with multi-aperture and multi-tap CMOS image sensors

研究代表者

香川 景一郎 (Kagawa, Keiichiro)

静岡大学・電子工学研究所・教授

研究者番号：30335484

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、投影光学系と密接に連携することで実世界の多様な情報を複数の光学的計測手法により一度にリアルタイムに撮影する空間・時間分割多重プログラマブル集積化カメラと、そのコアデバイスであるマルチアパーチャ・マルチタップCMOSイメージセンサのアーキテクチャを確立した。多波長に対する空間周波数領域イメージング(SFDI)とマルチ露光レーザーSpeckleコントラスト血流イメージング(MELSCI)を同時実行可能な2×2アパーチャ4タップCMOSイメージセンサを設計・試作し、同時計測を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

カメラに用いられるイメージセンサは用途に応じて必要とされる多様な情報を、制御された光投影と連携して様々な方法で一度に撮影することが求められる。生体イメージングはその最たる例である。例えば、組織の代謝・3次元構造、体液のかん流などの同時計測による総合判断が求められるため、同一部位を構造光照明やコヒーレント照明を用いて複数の計測法により同時計測するマルチモーダルイメージングが不可欠である。本研究は、投影光学系との密接な連携とマルチモーダル計測に対応した、高いプログラム性をもつ新規の集積化カメラアーキテクチャおよびコアデバイスであるイメージセンサの新規アーキテクチャを提案・実証したことに意義がある。

研究成果の概要(英文)：The architecture of the programmable space- and time-division multiplexed integrated camera and multi-aperture multi-tap CMOS image sensor as its core device for real-time imaging has been established. An 2x2-aperture four-tap CMOS image sensor that can perform the multi-band spatial frequency domain imaging (SFDI) and multi-exposure laser speckle contrast blood flow imaging (MELSCI) concurrently has been designed and fabricated. Its operation was confirmed experimentally.

研究分野：CMOSイメージセンサ

キーワード：CMOSイメージセンサ マルチタップ画素 空間周波数領域イメージング マルチ露光レーザーSpeckル血流イメージング

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、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

カメラに用いられるイメージセンサは実世界から情報世界への重要な入口であり、回路とデバイスの融合技術である。近年、高画素化・高フレームレート化のみならず、前段の光学系、後段の画像処理との融合が盛んに研究されている。また、カメラは人が画像を見るものから、コンピュータが見る(=意味のある情報を定量的に抽出する)ものに移行しており、求められる情報の質が変わりつつある。つまり、1つのレンズと1つのイメージセンサにより得られるRGB動画画像では不十分である。用途に応じて必要とされる多様な情報を、制御された光投影と連携して様々な方法で一度に撮影することが求められる。生体イメージングはその最たる例である。例えば、組織の代謝・3次元構造、体液の流動などの同時計測による総合判断が求められるため、同一部位を構造照明やコヒーレント照明を用いて複数の計測法により同時計測するマルチモーダルイメージングが不可欠である。つまり、投影光学系との密接な連携とマルチモーダル計測に対応した高いプログラム性をもつ新規の集積化カメラアーキテクチャと、コアデバイスであるイメージセンサの新規アーキテクチャの探求が重要となっている。

2. 研究の目的

本研究では、コンピュータが見ることを前提とし、投影光学系と密接に連携することで実世界の多様な情報を複数の光学的計測手法により一度にリアルタイムに撮影する空間・時間分割多重プログラマブル集積化カメラと、そのコアデバイスであるマルチアパーチャ・マルチタップ CMOS イメージセンサのアーキテクチャを確立する。また、マルチモーダル計測による総合判断が要求される生体イメージングに向けたイメージセンサと集積化カメラを開発し、その有効性を実証する。

3. 研究の方法

本研究で開発する新しいマルチアパーチャ・マルチタップ CMOS イメージセンサを用いたマルチモーダルイメージングシステムの構成を図1に示す。本研究の独自性・創造性は、光投影とマルチモーダル計測というビッグデータ時代のカメラに要求される2大要素を取り込んだ、マルチアパーチャカメラ・マルチタップ画素に基づく汎用的な新しいイメージセンサアーキテクチャにある。ここで、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空間的に複数並べたカメラを意味する。研究代表者は、1つのフォトダイオード(受光部)と複数の電荷蓄積部(タップ)から成る画素とこれを用いたイメージセンサを研究している。時系列に自由な順番・間隔で、フォトダイオードに発生した電荷をいずれかの蓄積部に転送して蓄積した後、タップ数分の画像を同時に読み出す。図1に示す様に、新規イメージセンサはアパーチャ毎に4つのタップをもつ画素が2次元的に配列した単位イメージセンサをもち、露光制御部により光信号を4つのタップに自由に時間軸で振り分ける。これにより、アパーチャ毎に波長フィルタなどの任意の光学フィルタを設ける(空間分割多重)、高速に複数の照明方法を切り替えてそれぞれに対応する画像を得るといった任意の時間サンプリングを実現する(時間分割多重)などのプログラム性が得られ、単位イメージセンサごとに異なる光学的計測法を適用して、実世界の自在なサンプリングを可能とする。空間分割多重による波長分割多重撮像は、マルチモーダル撮影にも適用される。後述する空間周波数領域イメージング(SFDI)により生体組織の吸収と換算散乱係数の2次元マップが得られる。また、マルチ露光レーザースペckルコントラストイメージング(MELSCI)により血流速さの2次元マップが得られる。SFDIを多波長で行うことでヘモグロビンなどの生体色素濃度が推定できる。この様なマルチバンド SFDI と MELSCI に異なる波長を割り当てることで、同時計測が可能となる。

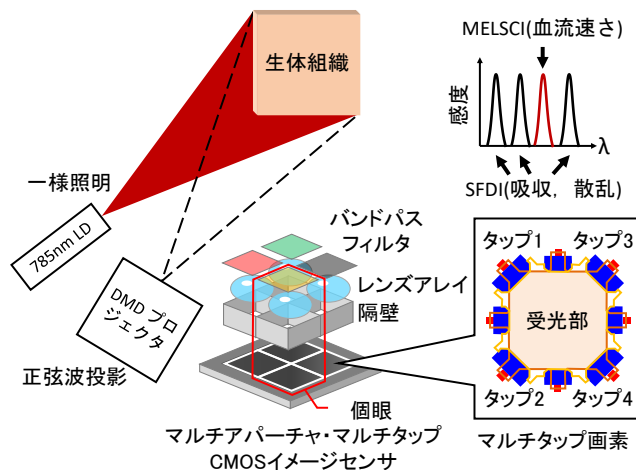


図1) マルチアパーチャ・マルチタップ CMOS イメージセンサを用いたマルチモーダルイメージングシステムの構成。

4. 研究成果

4. 1 マルチスペクトル複眼 SFDI

マルチモーダル複眼カメラの基本画像処理を確立するために、市販の近赤外感度を向上した CMOS カメラを複眼化し、空間周波数領域イメージング(SFDI)とレーザースペックルコントラストに基づく血流速度イメージング(LSCI)を行うシステムを構築した。複眼カメラは3×3個の個眼から成り、最大9種類の波長に対する反射画像を同時に取得できる。個眼の画素数は約600×600画素である。光源として白色LEDと近赤外強度を向上したハロゲンランプを組み合わせた。パターン生成にはデジタルミラーデバイス(DMD)を利用した。画像処理では、取得した複眼画像を個眼ごとに切り出して位置合わせし、光学特性が既知のリファレンスファントムに対する反射画像を用いて反射率を補正する。あらかじめモンテカルロシミュレーションにより作成したルックアップテーブル(LUT)を用いて反射率から吸収係数、換算散乱係数を推定する。さらに、吸収係数から生体色素の既知の分光モル吸光係数を用いて色素濃度を推定する。このとき、プロジェクタ・カメラの密な分光特性を考慮することで精度を向上する。

4. 2 被写体の動きと環境光に強い SFDI [1]

現有資産である開発済みの4タップ CMOS イメージセンサを利用して、SFDIの高機能化を行った。SFDIでは空間位相の異なる3枚の縞模様を順番に計測対象に投影する。そのため、投影中に被写体が動くと大きな計測誤差を生じる。また、環境光も計測結果に大きな影響を与える。そこで、4タップそれぞれに無照明(環境光)と3つの投影パターンを割当て、照明を短時間で切り替えて複数サイクル多重露光することを提案した(図2)。高速化係数をNとすると、1つのパターンの投影時間を、本方式を適用しない場合の1/Nとし、露光をN回繰り返す。これによりパターン間の時間差が短縮され、被写体の動きに強くなる。また環境光画像を他の画像から減算することで、環境光の影響が除去される。図3、4の実験結果は、それぞれ被写体の動きと環境光に対する耐性が向上したことを示している。

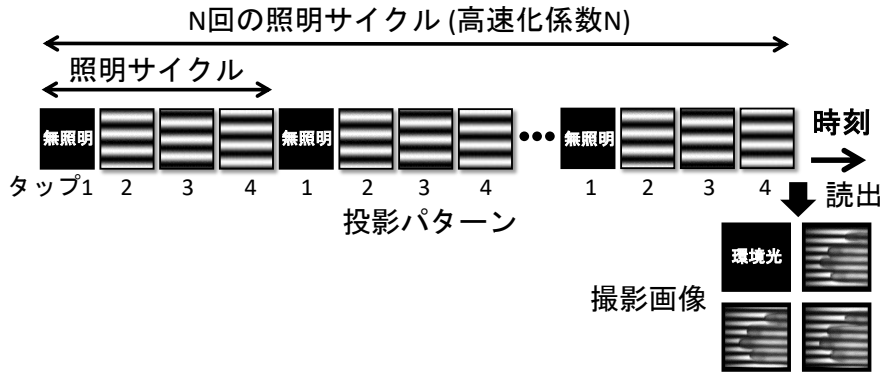


図2) 被写体の動きと環境光に強い SFDI の撮影方法。

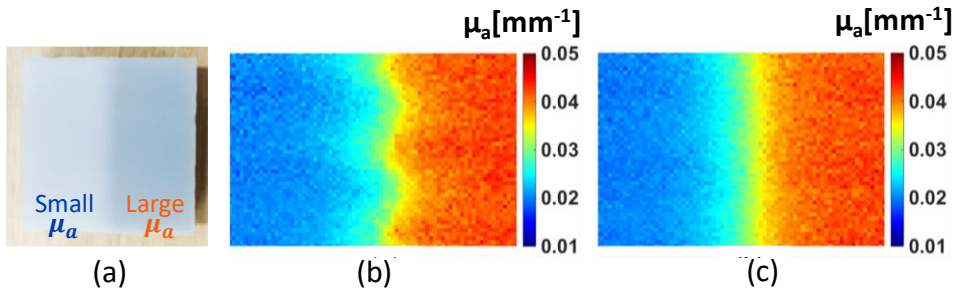


図3) 被写体の動きの抑制。(a)シリコンファントム, (b)動き抑制なし, (c)動き抑制あり (高速化係数8)。

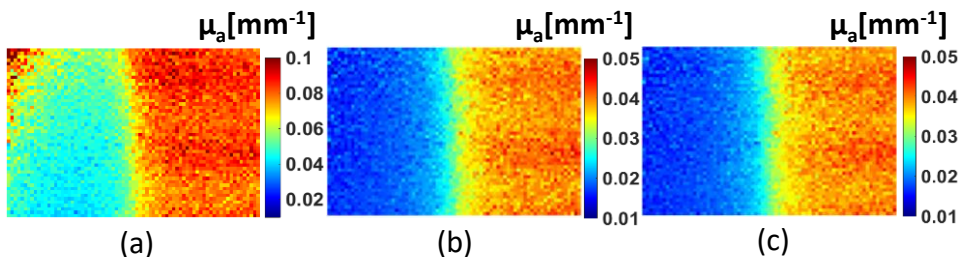


図4) 環境光の影響の抑制。投影パターンの空間周波数 0.1mm^{-1} 。波長 850nm 。
(a) 環境光あり・抑制なし, (b) 環境光あり・抑制あり, (c) 環境光なし。

4. 3 マルチタップによるマルチ露光レーザースペckルコントラスト血流イメージング[2]

現有資産である開発済みの4タップCMOSイメージセンサを用いて、効率的なサンプリングによるレーザースペckルコントラストを用いた流速イメージング技術を開発した。生体の様な散乱体にレーザ光を照射すると、カメラの像面で光が干渉してspeckルパターンと呼ばれる空間的にランダムな粒状の光強度分布を生じる。血流により赤血球が動くときspeckルパターンが時間的に変化し、その変化の速さは流速に依存する。イメージセンサの露光時間内にspeckルパターンは時間成分されて平滑化される。したがって流速が速いほど空間的なコントラストが低下する。複数の露光時間に対して画像の各点で空間コントラストを算出し、理論式とフィッティングすることで流速の2次元マップを得る。従来高速カメラが使われていたが、マルチタップイメージセンサを利用することでフレームレートを低く抑えながら高精度な流速計測を可能とした。図5(a)は4タップに同じ露光時間を割り当てた場合、図5(b)は露光時間を指数関数的に増加させた場合の撮影画像である。散乱体上にイントラリピッドを入れた2本のチューブを配置した。左側のチューブのみイントラリピッドを一定の速さで流し、右側は流速0とした。図6は異なる流速に対する推定画像である。設定した流速に近い結果が得られた。また、シミュレーションによりタップ数と血流速度推定精度を検討し、8タップの場合に露光時間を指数関数的に増加させることで、高い推定精度が得られることを明らかにした。

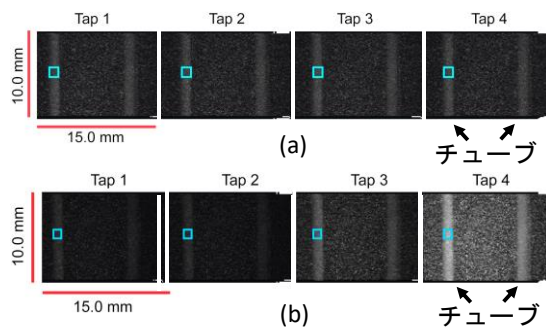


図5) 4タップイメージセンサによるMELSCIの撮影画像。

(a) 等しい露光時間, (b) 指数関数的に変えた露光時間。

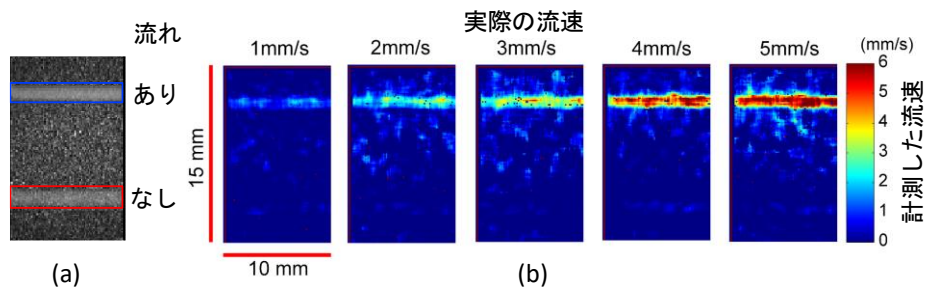


図6) (a) ファントムの構成, (b) MELSCIにより計測した流速の2次元マップ。

4. 4 マルチアパーチャ・マルチタップマルチモーダルイメージセンサ

マルチバンドSFDIとMELSCIを同時に実行する専用CMOSイメージセンサを開発した。センサ構成と外観、仕様・特性を図7、表1に示す。基本画素として、電荷排出機能をもつ4タップ画素を開発した。露光パターンはSFDIとMELSCIで独立に設定できる。これは、MELSCIの露光時間は計測対象の流速範囲に依存するためである。動作確認のために、SFDI用アパーチャには全て同じIRカットフィルタ、MELSCI用アパーチャには785nm帯バンドパスフィルタを設けて撮影を行った。DMDに表示するパターンに同期してSFDI用アパーチャのマルチタップ画素を駆動した。タップ1~3で位相の異なる正弦波パターンを撮影し、タップ4で環境光を撮影した。図8に撮影画像例を示す。1つのタップの中に4つのアパーチャ画像が埋め込まれていることがわかる。図9は環境光下で撮影した画像から吸収係数を換算散乱係数の2次元マップを推定した結果である。環境光が無い場合の結果と良く一致した。この成果は重要性が認められ、イメージセンサ技術に特化した国際会議であるInternational Image Sensor Workshop (IISW) 2021の口頭発表に採択された[3]。

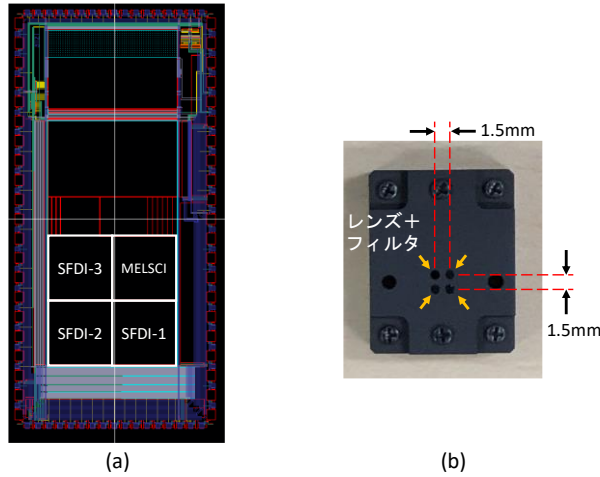


図7) マルチアパーチャ・マルチタップ CMOS イメージセンサ.
(a) センサレイアウト, (b) カメラの外観.

表1) マルチアパーチャ・マルチタップ CMOS イメージセンサの仕様・特性.

プロセス	0.18 μ m CMOSイメージセンサ
個眼数	2 \times 2
個眼当たりの画素数	132 \times 132
画素サイズ	11.2 μ m \square
個眼有効面積	1.48mm sq.
フィルファクタ	17.5%(マイクロレンズなし)
画素当たりのタップ数	4タップ+ドレーン
フレームレート	2.8fps (出力バッファの問題により制限)
電荷転送速度	<10 μ s

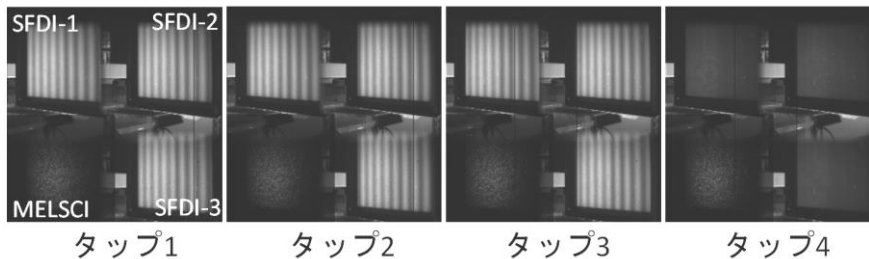


図8) 撮影例 (10枚平均). コントラストを強調している.

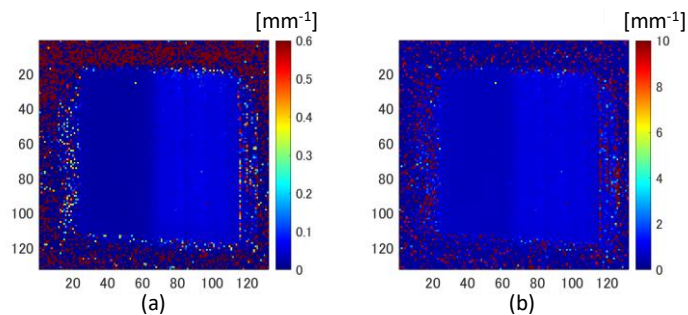


図9) 環境光下. 波長 660nm (a) 吸収係数, (b) 換算散乱係数.

<参考文献>

1. K. Kagawa, "Functional imaging with multi-tap CMOS pixels," ITE Transactions on Media Technology and Applications, Vol. 9, Issue 2, pp. 114-121 (Apr. 2021).[Invited]
2. P. S. Sivakumar, K. Kagawa, C. Crouzet, B. Choi, K. Yasutomi, S. Kawahito, "Multi-exposure laser speckle contrast imaging using a video-rate multi-tap charge modulation image sensor," Optics Express, Vol. 27, No. 18, pp. 26175-26191 (Sep. 2019).
3. Y. Shimada, K. Takada, H. S. Nam, K. Miyazaki, K. Watanabe, I. Shibata, K. Yasutomi, S. Kawahito, K. Kagawa, "2x2-aperture 4-tap CMOS image sensor for multi-modal multi-band tissue imaging with suppressing the ambient light and motion artifact," IISW2021 (Sep. 2021, accepted).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Panneer Selvam Sivakumar, Keiichiro Kagawa, Christian Crouzet, Bernard Choi, Keita Yasutomi, Shoji Kawahito	4. 巻 27
2. 論文標題 Multi-exposure laser speckle contrast imaging using a video-rate multi-tap charge modulation image sensor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 26175-26191
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.27.026175	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 Keiichiro Kagawa	4. 巻 9
2. 論文標題 Functional imaging with multi-tap CMOS pixels	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ITE Transactions on Media Technology and Applications	6. 最初と最後の頁 114-121
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3169/mta.9.114	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 Manabu Machida, Yoko Hoshi, Keiichiro Kagawa, and Kazuki Takada	4. 巻 37
2. 論文標題 Decay behavior and optical parameter identification for spatial-frequency domain imaging by the radiative transport equation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Optical Society of America A	6. 最初と最後の頁 2020-2031
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/JOSAA.402124	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 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 2件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Keiichiro Kagawa, Keita Yasutomi, Shoji Kawahito
2. 発表標題 Biomedical imaging based on multi-tap CMOS image sensors and compact compound-eye cameras
3. 学会等名 4th Int'l Conf. on Photonics Solutions (ICPS2019)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Panneer Selvam Sivakumar, Keiichiro Kagawa, Christian Crouzet, Bernard Choi, Keita Yasutomi, and Shoji Kawahito
2. 発表標題 Simulation of multi-exposure laser speckle contrast boold flow imaging based on multi-tap charge modulator CMOS image sensor
3. 学会等名 Optics & Photonics Int ' l Congress 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高田一輝, 西岡佑記, 香川景一郎
2. 発表標題 8タップCMOSイメージセンサとストライプ光投影を用いた高機能空間周波数領域イメージングの基礎検討
3. 学会等名 第14回関東学生論文講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 香川景一郎, 西館泉, Rolf Saager, 津村徳道, 谷田純
2. 発表標題 TOMBOを用いたマルチバンドSFDIによる吸収・散乱スペクトル計測 - 逆モンテカルロ法との比較
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柴田伊織, 香川景一郎, 安富啓太, 川人祥二
2. 発表標題 時間・空間分割多重生体イメージング用マルチタップCMOSをイメージセンサ画素の開発
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
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keiichiro Kagawa, Keita Yasutomi, Shoji Kawahito,
2. 発表標題 Multi-tap CMOS image sensors and multi-aperture cameras for biomedical imaging
3. 学会等名 Proc. 24th Int'l Symp. On Artificial Life and Robotics (AROB 24th) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Nishioka, Keiichiro Kagawa, Chen Cao, Norimichi Tsumura, Takashi Komuro, Katsumasa Nakamura, Anthony Durkin, Bruce Tromberg, Keita Yasutomi, Shoji Kawahito
2. 発表標題 Motion-artifact-free near-video-rate spatial-frequency-domain imaging using a 4-tap CMOS image sensor with ambient light suppression
3. 学会等名 SPIE Photonics West BiOS (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keiichiro Kagawa, Tomoya Koike, Yuki Nishioka, Takaya Omura, Norimichi Tsumura, Takashi Komuro, Mohammad Torabzadeh, Rolf Sagger, Ata Sharif, Anthony Durkin, Bruce Tromberg, Jun Tanida
2. 発表標題 Multi-spectral spatial-frequency-domain imaging with a compact compound-eye camera TOMBO
3. 学会等名 Photonics West BiOS (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keiichiro Kagawa, Keita Yasutomi, Shoji Kawahito
2. 発表標題 Medical imaging with multi-tap CMOS image sensors
3. 学会等名 Proc. 4th Int'l Workshop on Image Sensors and Imaging Systems (IWISS2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小池知也, 香川景一郎, 大村昂也
2. 発表標題 複眼分光カメラと光源の波長特性を考慮した生体色素濃度画像推定
3. 学会等名 情報フォトンクス研究会第13回関東学生研究論文講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柴田伊織, 香川景一郎, 安富啓太, 川人祥二
2. 発表標題 時間・空間分割多重生体光イメージングに向けたマルチタップ画素の設計
3. 学会等名 情報フォトンクス研究会第13回関東学生研究論文講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 香川景一郎, 安富啓太, 川人祥二
2. 発表標題 マルチタップCMOSイメージセンサによる生体イメージング: 散乱・蛍光・血流
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会Optics & Photonics Japan 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西岡佑記, 香川景一郎, Chen Cao, 津村徳道, 小室孝, 中村和正, Anthony Durkin, Bruce Tromberg, 安富啓太, 川人祥二
2. 発表標題 4タップCMOSイメージセンサを用いたリアルタイム静脈イメージング
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会Optics & Photonics Japan 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小池知也, 香川景一郎, 西岡佑記, 大村昂也, 津村徳道, 小室孝, Rolf Saager, Mohammed Torabzadeh, Ata Sharif, Anthony Durkin, Bruce Tromberg, 谷田純,
2. 発表標題 複眼マルチスペクトルカメラを用いた生体色素濃度の2次元マップ推定
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会Optics & Photonics Japan 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 香川景一郎, 西岡佑記, Mohammad Torabzadeh, Rolf Saager, Ata Sharif, Anthony Durkin, Bruce Tromberg, 谷田純
2. 発表標題 小型複眼マルチスペクトルカメラと用いた空間周波数領域生体光イメージング
3. 学会等名 第12回新画像システム・情報フォトニクス研究討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大村昂也, 西岡佑記, 香川景一郎, Mohammad Torabzadeh, Rolf Saager, Ata Sharif, Anthony Durkin, Bruce Tromberg, 谷田純
2. 発表標題 小型複眼マルチスペクトルカメラを用いた空間周波数領域生体イメージング
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
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 香川景一郎, 安富啓太, 川人祥二
2. 発表標題 マルチタップCMOSイメージセンサを用いた生体光イメージング
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
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuto Shimada, Kazuki Takada, Hoang Son Nam, Kakeru Miyazaki, Kohei Watanabe, Iori Shibata, Keita Yasutomi, Shoji Kawahito, Keiichiro Kagawa
2. 発表標題 2x2-aperture 4-tap CMOS image sensor for multi-modal multi-band tissue imaging with suppressing the ambient light and motion artifact
3. 学会等名 International Image Sensor Workshop (IISW) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Research project (ISL) http://id1.rie.shizuoka.ac.jp/~kagawa/study/project/index.html

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	津村 徳道 (Tsumura Norimichi) (00272344)	千葉大学・大学院工学研究院・准教授 (12501)	
研究分担者	小室 孝 (Komuro Takashi) (10345118)	埼玉大学・理工学研究科・教授 (12401)	

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			
スウェーデン	Linkoping University			
米国	University of California, Irvine			