

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12025

研究課題名(和文) 単一光子検出型イメージセンサにおける撮像と再構成処理による高品質な画像の取得

研究課題名(英文) High quality imaging method by using quanta image sensor and image reconstruction

研究代表者

浜本 隆之 (Hamamoto, Takayuki)

東京理科大学・工学部電気工学科・教授

研究者番号：10297624

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：単一光子検出型イメージセンサは、高感度なフォトダイオード(PD)を用いて入力された光子の有無を判定する。これは、受光した信号をPDアレイの外に読み出す前に1ビットの情報としてA/D変換することに相当するが、時間解像度が高く、取得する情報量が多くなる。また、光子情報の揺らぎの影響を受けるため、単純な画像再構成では画質が劣化する。

本研究では、撮像時間内の入力光子の検出閾値を調整し画像を再構成する方式と、被写体の動き量を用いて画像を再構成する方式について検討し、その有効性を明らかにする。また、その再構成処理に相応しい機能を有するイメージセンサの構成を検討し、プロトタイプチップを試作した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、SPADを用いた単一光子検出型イメージセンサによる新たな撮像方式と、それに即した画像再構成処理の検討を行ったものである。イメージセンサの画素内のカウント回路の2段構成、計数途中の情報の閾値処理といった機能の導入を検討する。これらの情報をうまく活用し、高速撮像による動きボケ抑制、高DR化等による高画質化を図る。これらの技術を組み合わせることで、従来のイメージセンサでは取得できない高品質画像の取得が可能となり、撮像性能を飛躍的に向上させることができる。

研究成果の概要(英文)：Quanta Image Sensor (QIS) is new type of image sensor, which can observe the amount of incident light intensity in units of photons. In QIS imaging, a large number of photon incident observations are performed in the spatio-temporal direction, and multi-valued images are obtained by reconstruction processing.

In this research project, we investigated some image reconstruction methods for QIS imaging. One is the method based on motion vectors among adjacent frames. The other is the method using multiple thresholds for the minute photon detector (jot). Furthermore, we have designed and investigated the QIS image sensor for new image reconstruction method.

研究分野：画像工学

キーワード：イメージセンサ 単一光子検出 再構成処理

1. 研究開始当初の背景

デバイス、回路技術の発展に伴い、イメージセンサの高度化が実現されてきている。これにより、取得画像の高品質化が達成されてきている。さらには、デバイス構造の多層化技術の発展に伴い、上層のフォトダイオード (PD) アレイで撮像を行い、下層で A/D 変換やメモリ回路を実装することができるようになった。これにより、センサ上で信号処理を行うことが可能となった。このようなセンサは、コンピュータシヨナルイメージセンサと呼ばれ、様々な技術が開発されてきている。また、上下層を画素ごとに接続し、各画素が固有の PD、A/D 変換、メモリ回路を有するイメージセンサが報告されている。このような技術では、これまでのようにフレーム毎に全画素と一緒に撮像し、同じタイミングで処理する必要がなくなるため、撮像と信号処理が一体となった全く新しい形態の撮像技術の実現が可能となる。

従来のイメージセンサでは、一定の時間 (最長 1/フレームレート [秒]) に入射した光により生じた電荷を PD 内にて蓄積をした後に、そのアナログ情報を画素毎に出力し、列に 1 つ用意された A/D 変換回路を通じてデジタル情報に変換する。しかしながら、PD での電荷蓄積時のノイズや、読み出し過程におけるノイズが加わるため、画像の品質が制限される。

これに対し、SPAD (Single Photon Avalanche Diode) と呼ばれる単一光子を検出する Transducer の検討が行われている。この方式では、極短時間内に光子が入力したかどうかを判定し、光子の有無という 1 ビットの情報として PD 部でデジタル情報に変換する。高感度な PD が必要になるものの、前述の蓄積時や読み出し過程でのノイズが重畳されない利点がある。

しかしながら、SPAD を用いた撮像には問題点がある。SPAD を用いたセンサは、通常センサの 1 フレーム蓄積期間中に、多数枚の 1 ビット画像を出力する。これはつまり、出力する情報量が増加することになるため、結果として集積する画素数を増やすことを困難としている。また、出力する画像は 1 ビットなので、画像情報として表示するためには、何らかの画像再構成処理が必要になる。一方で、再構成に使用する 1 ビット画像の組み合わせ方や処理の仕方を変えることで、再構成映像の高フレームレート化、高 DR 化、動きボケ抑制等の実現が可能となる。

2. 研究の目的

本研究では、PD 部で画素毎に光子の入力の有無を判定することで A/D 変換を行い、後段の処理部で信号処理を施すことで、画像の使用目的に合わせた高品質画像を取得できる、柔軟な撮像技術を確立することを目的とする。

具体的には、撮像時間内の入力光子の検出閾値を調整し再構成する方式と、被写体の動き量を用いて再構成する方式について検討し、その有効性を明らかにする。また、その再構成処理に相応しい機能を有するイメージセンサの構成を検討し、プロトタイプチップを設計する。

3. 研究の方法

(1) 新しい単一光子検出型イメージセンサの試作

計測した光子数 (フォトンカウント値) からセンサ内部で被写体の状態を判断し、画素毎に適した撮像・信号処理を行うことで、必要な情報量を取得しつつ出力する情報量を削減することが可能なイメージセンサアーキテクチャを提案した。

イメージセンサ内に搭載した撮像・信号処理では、図 1 の左図に示すように、撮像したフォトンカウント値を使って被写体を動体の無い静的領域と動体のある動的領域を区別する。そして静的領域ではダイナミックレンジを高めるため低速・多階調で撮像を行い、動的領域では動きぼけを抑制し時間分解能を高めるよう高速・通常階調で撮像を行うことで、被写体に合わせてより

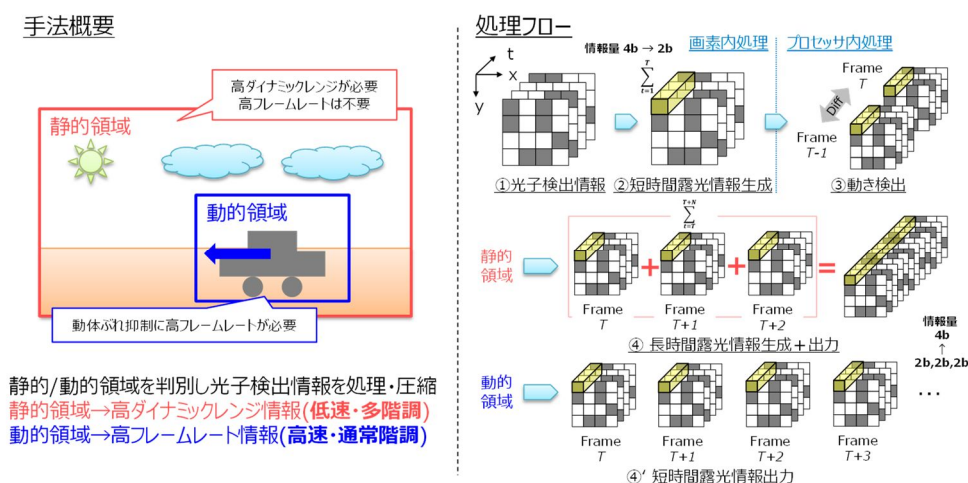


図 1 イメージセンサ内の信号処理手法

必要な情報を選択して取得できるようにする。一方で静的領域に不要な高速撮像を減らすことや、動的領域においては階調よりも時間分解能を優先し被写体情報を失わないようにすることで、被写体に対して優先する情報を取得しつつ、情報量を削減する。

具体的な信号処理の方法としては、図1の右図に示すように、センサ内部で高速に撮像したフレーム1と1フレーム前に取得したフレーム2の差分を取り、しきい値処理を行うことで、動きの有無を判別する。動的領域と判別された領域については、高速に撮像したフレームをそのまま出力する。一方で静的領域と判別された領域については、高速に撮像したフレーム情報をセンサ内部のフレームメモリで積算し階調情報を高めた上で出力する。静的領域では上述のように高速に撮像したフレーム情報を時間方向に積分するため時間分解能は低下するが動体が無いため問題とならない。一方で必要な階調情報を増やし高ダイナミックレンジ化が可能となる。

(2) 複数検出閾値を用いた画像再構成

単一光子検出型イメージセンサ(QIS)の撮像の流れを図2に示す。QISは多数の微細な光子検出素子(jot)によって構成される。撮像においては、まず、予め各々のjotに自然数の光子検出閾値(以下、閾値と呼ぶ)を設定する。この閾値と露光期間後に蓄積した光子数との比較により、“0”または“1”のバイナリ値を出力するといった光子入射観測を行う。ここで、出力“0”はjotに設定された閾値に満たない個数の光子入射、出力“1”は閾値以上の個数の光子入射が起こったことをそれぞれ表す。このような観測を時空間方向に行うことで、時系列的なバイナリ画像から構成されるbit-plane画像群を取得する。次に、複数のjotをまとめたjotブロック毎に入射光量推定を行う再構成処理によって、一枚の多値画像を取得する。

ここで、全てのjotに単一の閾値を設定した場合[1,2]、再構成画像において高照度領域では白飛び、低照度領域では黒潰れがそれぞれ発生する傾向となり、被写体全体の正しい把握が困難となる。一方、局所領域毎(例えば、jotブロック毎)に最適な閾値を設定する手法[3]は高品質な多値画像が取得可能であるが、閾値調整のために時間を要する。動被写体や輝度変動が存在するシーンにおいては頻繁な閾値調整が必要となるため、時間解像度が実質的に低下する。

そこで、図3に示すように繰り返しパターンを導入するアプローチにより複数の閾値をjot配列に適用した上で光子入射観測及び画像再構成を行う撮像方式を提案する。提案手法ではシーンに応じた閾値調整を行わないことで、時間解像度の低下を回避する。また、jotに複数の閾値を設定することにより、幅広い照度を同時に捉えることが可能となる。提案手法は、繰り返しパターンを適用した状態での光子入射観測の特性に基づいた多値画像の再構成処理と雑音低減処理、さらに、それらを踏まえた上で繰り返しパターン内の最適化の三つから構成される。

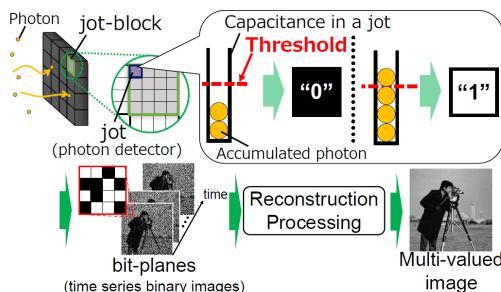


図2 単一光子検出型イメージセンサによる撮像

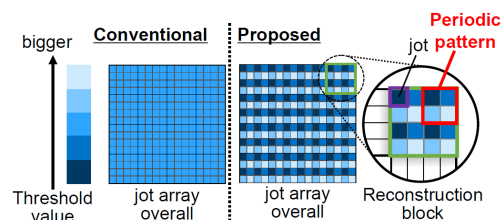


図3 光子検出素子への閾値の適用

(3) 被写体ごとの動き推定に基づく画像再構成

低光量下での高品質な画像取得を目的とし、動きぼけの抑制及び再構成画像上のフォトンショット雑音を抑制可能なbit-plane画像の画像再構成手法を提案する。提案手法では、高品質な動きぼけ抑制を目的として、動被写体の動き単位での動きぼけ抑制を行う。画像内で同じ動きを有する画素を均一に動き補償した「部分的ぼけ抑制画像」を介して動きぼけを抑制する。各被写体の動きに注目しながら取得した部分的ぼけ抑制画像群から動きぼけ抑制を行うことで、同じ動きを有する画素を均一に動き補償しつつ異なる動きを有する動被写体が重複する場合や単一の動被写体に複数の動きが含まれる場合にも高品質に動きぼけが抑制できる。さらに提案手法では、部分的ぼけ抑制画像内での動きぼけ量に基づく平滑化により再構成画像上のフォトンショット雑音を抑制する。

図4に提案手法の概要を示す。まず、(a)注目度に基づく動き推定、(b)フレームレベルの動き補償、(c)注目度マップの更新を繰り返し、部分的ぼけ抑制画像を各サイクルで取得する。その際、各画素の動きぼけ抑制に対する優先度である注目度を設定した注目度マップを導入

する。(a) では、画像全体に対して相対的に注目度が高い画素を重視した動き推定を行う。(b) では、推定した動きを有する画素の動きぼけを、bit-plane 画像全体を整列させる動き補償により抑制する。動き補償後の画像再構成により部分的ぼけ抑制画像を取得する。(c) では、動きぼけ抑制不十分な画素の注目度を相対的に上昇させる。最終的に、取得した部分的ぼけ抑制群を基に画像全体の動きぼけを抑制した再構成画像を生成する。

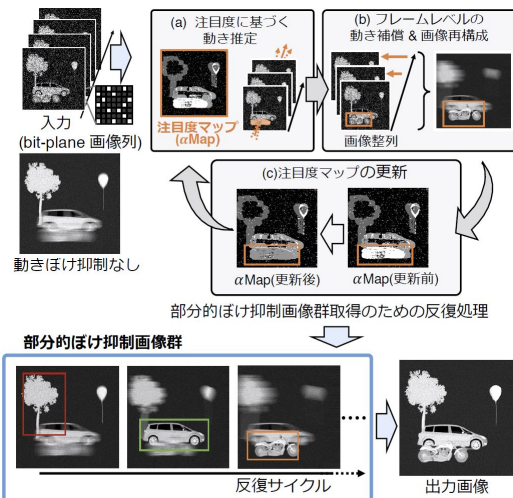


図4 提案手法の概要

4. 研究成果

(1) 新しい単一光子検出型イメージセンサの試作

3.(1)で説明した機能を有する回路を設計し、試作したセンサの全体レイアウトを図5に示す。プロセスは $0.18\mu\text{m}$ CMOSを使用しており、チップサイズは $2.5\text{mm(H)} \times 5.0\text{mm(V)}$ である。画素サイズは $56\mu\text{m(H)} \times 56\mu\text{m(V)}$ で、搭載画素数は $32(\text{H}) \times 32(\text{V})$ となる。画素内でフォトンカウント可能な階調数は6bitで、開口率は5%である。入力電圧はSPAD駆動のための -27V および回路駆動のための 3.3V 、 1.8V である。フレームレートは 1000fps である。SPAD画素アレイに対して列並列にメモリ、信号処理用の演算回路を搭載して高速化している。

さらに、試作チップを駆動して出力情報を評価するために評価システムを開発した。

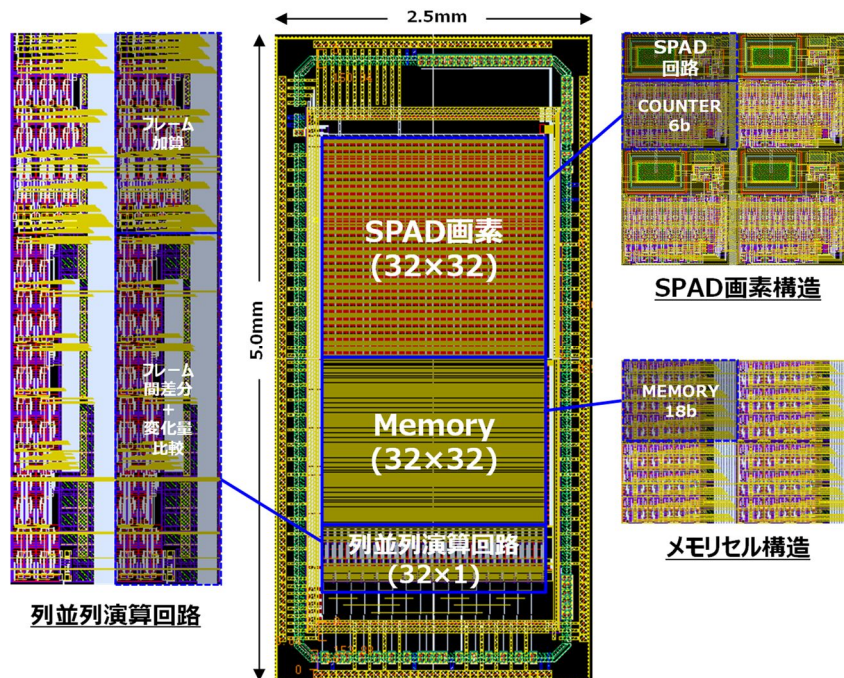


図5 試作センサのレイアウト

(2) 複数検出閾値を用いた画像再構成

QISは図2に示したjotブロック単位で入射光量推定をすることで撮像を行う。なお、推定の基となるbit-plane画像群の取得に際しては、jotブロックを成す複数のjotによってオーバーサンプリングを行う。本稿では、jotブロックのサイズを $K^2 (= K \times K)$ 、bit-plane画像群の枚数を T 、設定可能な閾値の最小値、最大値をそれぞれ q_{\min} 、 q_{\max} とする。また、同一jotブロック内のjotの平均入射光量は全て等しいと仮定する。また、提案手法においては、jotブロックのサイズは繰り返しパターンの整数倍の大きさとする。さらに、繰り返しパターンは $q_{\min} \leq q_1 \leq q_2 \leq \dots \leq q_M \leq q_{\max}$ を満たす M 個の自然数からなる閾値群 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_M\}$ で構成され、各々が均等に配置されているものとする。提案手法では、光子入射の揺らぎに起因するフォトンショットノイズ(Photon Shot Noise; PSN)に由来する雑音の効果的な低減を目的として、bit-plane画像群から得られた光子入射に関する統計情報を基に、まず雑音低減とエッジ保持の協調処理を行う。次に、jotブロック単位での統計的な入射光量推定により、高品質な多値画像を取得する。なお、広い照度範囲を正確に捕捉するため、繰り返しパターンの最適化を予め行う。

提案手法の有効性を確認するために、24枚のグレースケール自然画像のそれぞれに対し、光

子入射のシミュレーション及び多値画像再構成の評価実験を行った。実験パラメータとしては、jot ブロックのサイズ K^2 を 4×4 、bit-plane 画像群の枚数 T を 4、設定可能な閾値を $q_{\min} = 1$ から $q_{\max} = 25$ とした。これに対し比較手法は、全ての jot に単一の閾値を設定した上で最尤推定 (Maximum Likelihood Estimation; MLE) によって統計的な入射光量推定を行う手法 [1]、VST を導入した上で雑音低減を行う手法 [2] の 2 つとし、後者については雑音平滑化処理に BM3D を適用した。また、単一の閾値 q として 8, 13, 18 を適用した計 3 つの場合を検証した。なお、提案手法を含む全ての場合において、光子入射のランダム性を無くすために 25 回の試行を行い、その平均によって評価を行った。表 1 に再構成多値画像の品質を PSNR によって示す。提案手法は、単一の閾値を適用するいずれの比較手法に対しても、良好な品質を得たことが確認できる。

表 1 再構成多値画像の品質

Threshold		Reconstruction Method	Average PSNR [dB]
Method	Value		
Uniform	8	MLE [1]	20.25
	13		21.45
	18		14.68
	8	Transformed Denoise [2] w/ BM3D	26.56
	13		29.64
	18		21.97
Ours	{5,10,16,24}	Ours w/o Denoise	29.39
		Ours	32.80

(3) 被写体ごとの動き推定に基づく画像再構成

図 6(a) に評価シーンを示す。低光量下での撮像を想定し、入射光量はおおよそ 0.7 lux とした。図 6(b)、(c) は従来の電荷蓄積型の撮像方式を用いた $1/60$ 秒、 $1/240$ 秒の露光時間での撮像結果である。その際、読み出し雑音は $2e^-$ とした。単一光子検出型撮像方式においては、 $1/60$ 秒間に画像サイズ 1024×1024 の bit-plane 画像を 16 枚取得し、画像再構成を行なった。図 6(d) は提案手法を用いて動きぼけ抑制を行なった画像再構成結果である。(b)、(c)、(d) から、従来の電荷蓄積型撮像方式では動きぼけ抑制のため短い露光時間での撮像を行った場合には信号量に対して読み出し雑音の影響が大きく SNR が大きく低下する一方で、(d) では高品質かつ動被写体の動きぼけない画像が取得できており、動被写体単一光子検出型撮像方式の有効性が確認できる。

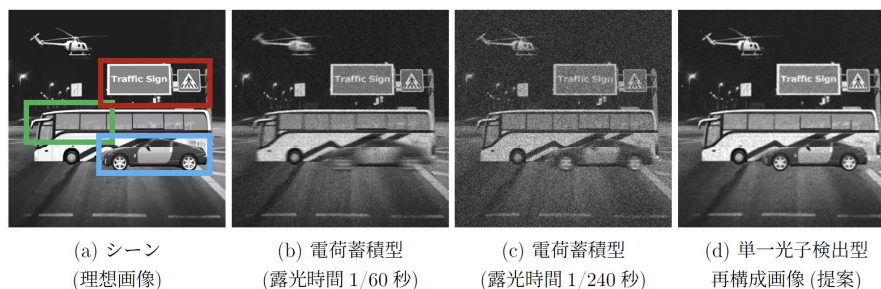


図 6 撮像方式の比較

< 引用文献 >

- [1] Feng Yang et al., "Bits From Photons: Oversampled Image Acquisition Using Binary Poisson Statistics," IEEE Trans. Image Process., vol. 21, no. 4, pp. 1421-1436, 2012.
- [2] Stanley H. Chan et al., "Images from Bits: Non-Iterative Image Reconstruction for Quanta Image Sensors," Sensors, vol. 16, no. 11, 2016.
- [3] Omar A. Elgendy et al., "Optimal Threshold Design for Quanta Image Sensor," IEEE Trans. Comput. Imaging, vol. 4, no. 1, pp. 99-111, 2018.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shuichi Namiki, Shunichi Sato, Yusuke Kameda, Takayuki Hamamoto	4. 巻 12177
2. 論文標題 Imaging Method using Multi-Threshold Pattern for Photon Detection of Quanta Image Sensor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. of International Workshop on Advanced Image Technology	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） 10.1117/12.2625974	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 -
1. 著者名 Kiyotaka Iwabuchi, Yusuke Kameda, Takayuki Hamamoto	4. 巻 9
2. 論文標題 Image Quality Improvements Based on Motion-Based Deblurring for Single-Photon Imaging	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 30080-30094
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2021.3059293	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 並木修一, 亀田裕介, 浜本隆之	4. 巻 44
2. 論文標題 単一光子検出型撮像方式における画像再構成のための動きぼけ抑制処理	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 映像情報メディア学会技術報告	6. 最初と最後の頁 7-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 -
1. 著者名 岩淵清隆, 山崎智裕, 亀田裕介, 浜本隆之	4. 巻 IST2019-50
2. 論文標題 単一光子検出型撮像方式における高精度な動き推定及び動きぼけ抑制手法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 映像情報メディア学会技術報告	6. 最初と最後の頁 29-32
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Shuichi Namiki, Shunichi Sato, Yusuke Kameda, Takayuki Hamamoto
2. 発表標題 Imaging Method using Multi-Threshold Pattern for Photon Detection of Quanta Image Sensor
3. 学会等名 International Workshop on Advanced Image Technology (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 甲田 紘己, 亀田 裕介, 佐藤 俊一, 浜本 隆之
2. 発表標題 単一光子検出型撮像方式における動き推定のためのbit-plane画像の蓄積制御
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 2021年

1. 発表者名 並木 修一, 佐藤 俊一, 亀田 裕介, 浜本 隆之
2. 発表標題 単一光子検出型イメージセンサのための複数の光子検出閾値を用いた撮像方式
3. 学会等名 Picture Coding Symposium (PCSJ2021), Image Media Processing Symposium (IMPS2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩淵 清隆, 亀田 裕介, 浜本 隆之
2. 発表標題 単一光子検出型撮像方式のための画素毎に推定した注目度に基づく動きぼけ抑制
3. 学会等名 Picture Coding Symposium (PCSJ2020), Image Media Processing Symposium (IMPS2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kiyotaka Iwabuchi, Tomohiro Yamazaki, Takayuki Hamamoto
2. 発表標題 Iterative Image Reconstruction for Quanta Image Sensor by using Variance-based Motion Estimation
3. 学会等名 International Image Sensor Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩淵清隆, 山崎智裕, 亀田裕介, 浜本隆之
2. 発表標題 単一光子検出型撮像方式における高精度な動き推定に基づく再構成手法
3. 学会等名 映像情報メディア学会年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔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	杉村 大輔 (Sugimura Daisuke) (10712052)	津田塾大学・学芸学部・准教授 (32642)	
研究分担者	亀田 裕介 (Kameda Yusuke) (50711553)	東京理科大学・工学部電気工学科・講師 (32660)	

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