

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04621

研究課題名（和文）シリコンスルーホール配列チップを用いたレンズレスイメージセンサーの研究

研究課題名（英文）Lensless image sensor using silicon through-hole array chip

研究代表者

有馬 裕（Arima, Yutaka）

九州工業大学・産学イノベーションセンター・教授

研究者番号：10325582

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：シリコン基板に一つの矩形スルーホールを形成したスルーホールチップをイメージセンサーチップの受光面に密着した単純構造のレンズレス撮像装置でも、それで取得されるボヤけた画像を鮮明化できることが確認できた。一つのスルーホールを介して受光する各画素間の規則的視野ズレを境界条件として、導出画像の空間的特徴量を用いたコスト関数を定義し、そのコストが小さくなる解によって、レンズレス画像が鮮明化できることが分かった。しかし、本研究期間内の実験では誤った推定箇所が部分的に残っており、十分な精度でのレンズレス画像を得ることはできなかった。コスト関数の更なる改良が必要なが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は光の屈折や回折・干渉現象を利用しない光学装置の可能性を検証することであり、工学的意義は究極の薄型イメージセンサーを低コストで実現することである。そこで、本研究では光の屈折現象や、回折・干渉現象を利用しない新たなレンズレス手法を考案しその可能性を実証した。イメージセンサーチップ上に一つの開口部のみを設ける単純なレンズレス撮像素子構造でも、ある程度の鮮明化画像が取得できることを示した。この手法では光の屈折や回折・干渉現象を利用しないので、レンズやレンズレス用マスク等の適用が難しい、大スケールや極狭スペースでの撮像装置を容易に形成できる優位性がある。

研究成果の概要（英文）：It was confirmed that even a lens-less imaging device with a simple structure of a single rectangular through-hole adhered to the image sensor chip can sharpen the blurry image acquired with it. The through-hole was formed on a typical silicon substrate using semiconductor manufacturing equipment. Using regular changes in the field of view between each pixel received through the through-hole, we defined a cost function expressed in terms of spatial features of the sharpened image. It was then confirmed that the lens-less image could be sharpened by that solution whose cost was small. However, we could not obtain lensless images with sufficient accuracy in the experiments conducted during this research period. It was found that the cost function needs to be improved.

研究分野：電子デバイス

キーワード：レンズレスイメージセンサー シリコンスルーホールチップ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

イメージセンサー(電子的カメラ)は光学レンズを用いる限りその焦点距離を確保するために薄型化に限界がある。また、小型化に伴い光学レンズの光軸および焦点距離合わせに高い組立精度が要求され製造コストの低減が制限される問題がある。

イメージセンサー薄型化に対する従来技術としてマイクロレンズを用いる手法などが開発されている[1][2][3][4]。また、レンズの代わりに符号化開口マスクを用いる手法が提案されている[5][6][7][8][9][10]。その他に回析格子を用いる方式[11][12][13][14]や、同心円パターンを用いてモアレ縞を利用する手法[15][16][17]なども提案されている。これらのレンズレス技術は特定の開口パターンや複数のピンホールによる符号化開口マスクを通して検知された信号パターンを基に画像を再現する手法であり、光学レンズが光の屈折現象を利用して撮像を空間的に分離しイメージセンサー上に直接投影する手法であるのに対して、従来のレンズレス技術は光の回折や干渉現象を利用した分散投影に基づく逆変換演算による画像再構成手法である。従って、薄型といえども光学マスクとイメージセンサー間には一定の隙間が必要で、その薄型化には制限がある。また、その画像再現には多量の演算処理が必要で十分な解像度の動画撮影には高速の演算器が不可欠であり、装置全体のサイズや消費電力を小さくすることが制限される課題がある。

本研究では、光の屈折や回折・干渉現象を用いないシンプルなデバイス構造で且つ演算処理量が少ないレンズレス手法の実現を目的としており、全く新しい撮像技術の実用性評価実証と位置付けられる。

### 2. 研究の目的

本研究の学術的目的は光の屈折や回折・干渉現象を利用しない光学装置の可能性を検証することであり、工学的目的は極限の薄型イメージセンサーを低コストで実現することである。そこで、本研究では光の屈折現象を利用した光学レンズや、回折・干渉現象を利用した従来のレンズレス手法などとは異なる新たな手法を提案する。具体的には、半導体シリコン基板に矩形のスルーホールを形成したスルーホールチップと一般的なイメージセンサーチップを密着させるデバイス構成を提案する(図1)。この構成においては、スルーホール下にある(光が入射される)イメージセンサーの各画素ではレンズ等の集光装置を介さないため、ぼやけた画像しか直接検知できない。しかし、それぞれの画素からそのスルーホールを介して見える視野範囲は画素毎に(画素配置位置に応じて)少しずつ変わる性質(図2)を有している。その画素毎の視野範囲の違いを利用して、より狭い視野範囲の受光量を算出する処理を行うことより画像の鮮明化を試みる。その技術によりスルーホールチップ厚 0.5mm とイメージセンサーチップ厚 0.5mm の合計 1mm 程度の超薄型レンズレスイメージセンサーを低コストで実現可能となる。この提案手法では少ない演算量で画像を再現でき、光の屈折や回折・干渉現象を利用しないことから従来手法と全く異なるアプローチであり独自性がある。

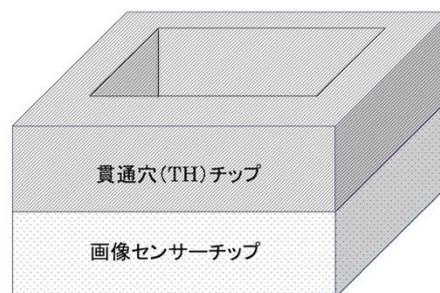


図1. 提案のデバイス構成例

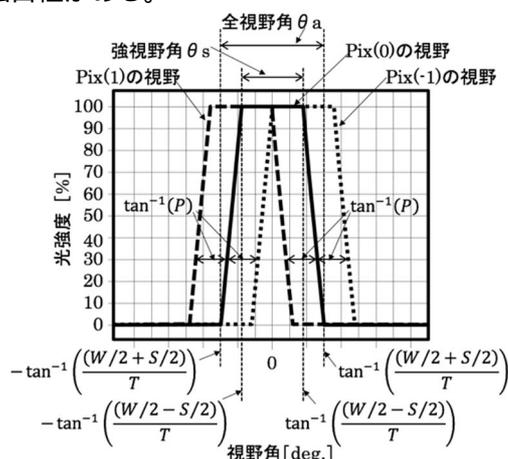
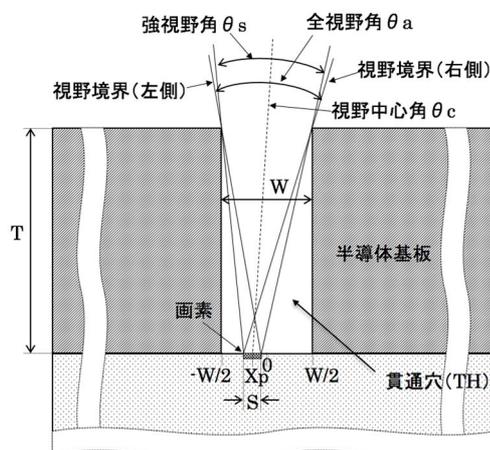


図2. (a) 画素の視野範囲の例



(b) スルーホールを介した画素の受光視野範囲

### 3. 研究の方法

実際に深掘り反応性イオンエッチング Deep RIE (Reactive Ion Etching) 装置を用いて一般

的なシリコン基板(4inch ウエハ、550 $\mu$ m厚、10 cm)にスルーホールを形成したチップを試作し(図3) 従来開発していたイメージセンサー評価実験用ボードを改修しそのスルーホールチップを撮像面に密着してスルーホールを介した画像を取得する撮像装置を試作した。そして、その取得画像を元に、その鮮明化実験を行い提案手法の有効性を検証した。しかし、当初、良好な結果が得られなかったため、新たに、一つのスルーホール以外を銅シートで塞いだスルーホールチップ(図4)と別のイメージセンサーを密着(図5)させた新たな評価用撮像装置を試作すると共に、新たな鮮明化手法を考案しその効果を評価検証した。この画像鮮明化手法は、各画素の規則的な視野範囲の違いを制約条件として鮮明化推定画像の空間的特徴をコスト関数として定義することで、そのコストが小さくなる鮮明化画像を算出する。その手法を実現する計算プログラムを作成し、幾つかのパラメータを最適化する実験を行った。その算出結果を通常のレンズカメラの撮像画像から一定範囲の画素値を平均化した予想画像と比較して鮮明化過程の機能を検証した。

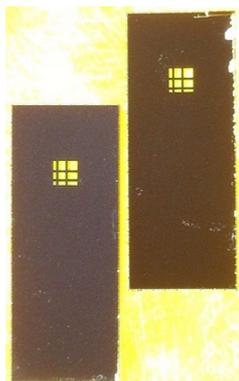


図3. スルーホールチップ

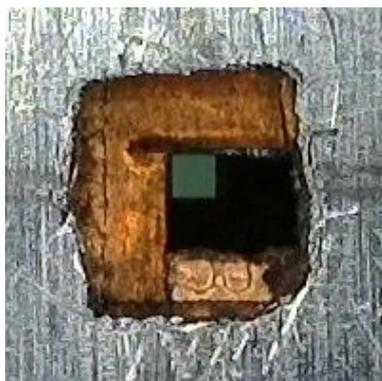


図4. 1個のスルーホール

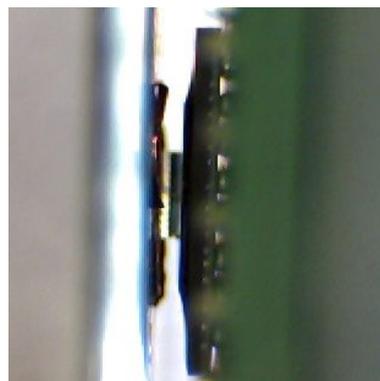


図5. スルーホールチップと画像センサーの密着状態

#### 4. 研究成果

レンズレス撮像装置からの取得画素値  $V_i$  とその半分視野の予測画素値  $h_i$  の関係は、取得画素の視野が半分ズレる画素数を  $S$  とすると式(1)で表せる。

$$h_i + h_{i+S} = V_i \rightarrow h_i = V_i - h_{i+S} \text{ or } h_{i+S} = V_i - h_i \dots (1)$$

そこで、視野が半分の鮮明化画像のコスト関数を式(2)のように定義する。その右辺の第1項は  $h_i$  で構成される曲線の  $i$  に関する2階微分の二乗和であり、 $h_i$  曲線上における直線や谷底・山頂の位置でコストが最小になる。第2項はその3階微分値の二乗和で曲率が一定の位置でコストが最小になり、第3項はその4階微分値の二乗和で曲率の変化が一定の位置でコストが最小になる。この式内の  $K_1 \sim 3$  はそれぞれの重みを表す係数である。このコスト関数内の  $h_i$  は一部を式(1)を用いて独立変数の数を半減することができる。その式(1)の代入によって本受光システムの制約条件がコスト関数に反映される。

$$C(h, V) \equiv K_1 \sum_i (h_{i-1} - 2h_i + h_{i+1})^2 + K_2 \sum_i (h_{i-2} - 2h_{i-1} + 2h_{i+1} - h_{i+2})^2 + K_3 \sum_i (h_{i-2} - 4h_{i-1} + 6h_i - 4h_{i+1} - h_{i+2})^2 \dots (2)$$

式(2)を全ての  $h_i$  で偏微分すると複数の  $h_i$  に関する一次方程式が導出され、それらの連立方程式を解くことで各  $h_i$  を  $V_i$  の1次多項式で表現できる。このように取得画素値からその視野範囲を半分にできれば、同様の手法をその垂直方向に施すことで、取得画像の1/4の視野範囲の画素値を導出できることになる。更に、その処理を繰り返せば更なる鮮明化が実現できる。この鮮明化処理は、受光システムの構成に応じて予め求めることが出来る上記多項式の係数を取得画素値  $V_i$  と掛けて足し合わせるだけなので、少ない演算処理で実現できる。

実際に導出した  $V_i$  の1次多項式の係数を  $h_i$  毎に配置した変換行列の例を図6に示す。

	V0	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16	V17	V18	V19	V20	V21	V22	V23	V24	V25	V26	V27	V28	V29	V30	V31	V32	V33		
h17	0.74	-3.56	3.91	-0.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.45	1.78	-1.93	2.59	-1.96	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.90	-3.57	3.12	-0.61
h18	0.86	-3.88	4.02	-0.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.41	1.56	-1.74	2.18	-1.51	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.82	-3.12	2.62	-0.49
h19	0.86	-3.60	3.29	-0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.36	1.31	-1.48	1.98	-1.85	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.71	-2.62	2.10	-0.36	
h20	0.81	-3.21	2.82	-0.59	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.30	1.05	-1.18	1.72	-1.41	0.30	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	-2.09	1.56	-0.23		
h21	0.72	-2.74	2.31	-0.46	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.24	0.77	-0.87	1.42	-1.16	0.23	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47	-1.55	1.02	-0.11		
h22	0.62	-2.23	1.78	-0.33	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.17	0.50	-0.55	1.11	-0.89	0.17	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.34	-1.00	0.47	0.02		
h23	0.51	-1.71	1.23	-0.20	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.10	0.22	-0.21	0.78	-0.62	0.10	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	-0.44	-0.08	0.14		
h24	0.39	-1.17	0.68	-0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.04	-0.05	0.12	0.45	-0.34	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.12	-0.62	0.27		
h25	0.27	-0.62	0.12	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	-0.34	0.45	0.12	-0.06	-0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	-0.06	0.68	-1.17	0.39			
h26	0.14	-0.08	-0.44	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.10	-0.62	0.78	-0.21	0.22	-0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	-0.20	1.23	-1.71	0.51			
h27	0.02	0.47	-1.00	0.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.00	0.17	-0.89	1.11	-0.55	0.50	-0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.33	1.78	-2.23	0.62			
h28	-0.11	1.02	-1.55	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.23	-1.16	1.42	-0.87	0.77	-0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	-0.46	2.31	-2.74	0.72		
h29	-0.23	1.56	-2.09	0.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.30	-1.41	1.72	-1.18	1.05	-0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	-0.59	2.82	-3.21	0.81		
h30	-0.36	2.10	-2.62	0.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.69	-1.65	1.98	-1.48	1.31	-0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.38	3.29	-3.60	0.86		
h31	-0.49	2.62	-3.12	0.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	-1.51	2.18	-1.74	1.56	-0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.83	4.02	-3.88	0.86		
h32	-0.61	3.12	-3.57	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	-1.96	2.59	-1.93	1.78	-0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.92	3.91	-3.56	0.74		

図6. 導出した変換行列の例

図7に示すボヤけた入力画像を用いた実験結果の一例を図8に示す。図9には通常のレンズカメラで撮像した画像を元に再現した予想画像を示す。取得画像が部分的に鮮明化できることを確認できた。しかし、鮮明化画像には不鮮明な部分や誤った推定箇所が散在しており、更なる改良が必要なが分かった。

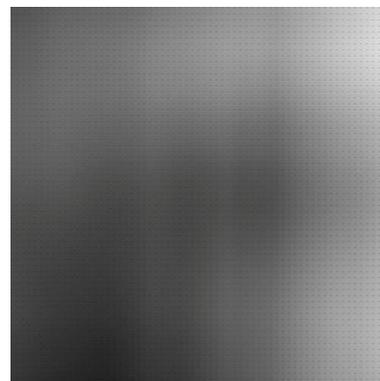


図7. 入力画像

今回の研究では、提案手法の原理的な可能性は確認できたものの、本研究期間内に十分な精度でのレンズレス画像を得ることはできなかった。本研究により、取得信号の相関関係に基づくコスト関数を定義し、取得画像より狭い視野信号を求める手法の有効性は確認できたので、今後は、その関数構成や制約条件等の改善により十分な精度のレンズレス画像を得ることが期待される。

当初は、できるだけシンプルな構造のレンズレス撮像素子を実現する技術の可能性検証を目的として研究を進めたが、新たな手法を検討考察する過程で、一つのスルーホールでも撮像できる可能性に気づいた。その結果、本手法の応用可能性が極めて広いことが分かった。つまり、本手法が改善され実用的なレベルに到達できれば、撮像装置は光の屈折や回折等の現象から解放され今までにない自由度を得られることになる。屈折や回折等が不要となれば、それを実現するための光学デバイス等が不要なことから、例えば、レンズ等を設けることが困難な(地球や宇宙規模の)大スケールや(生体内などの)極狭スペースでの新たな撮像装置を実現することが期待される。

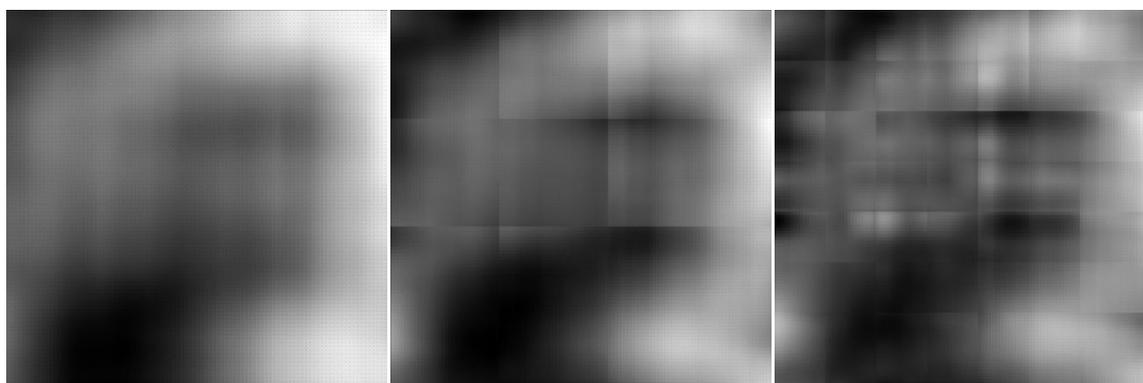


図8. (a) 1回処理後の画像

(b) 2回処理後の画像

(c) 3回処理後の画像

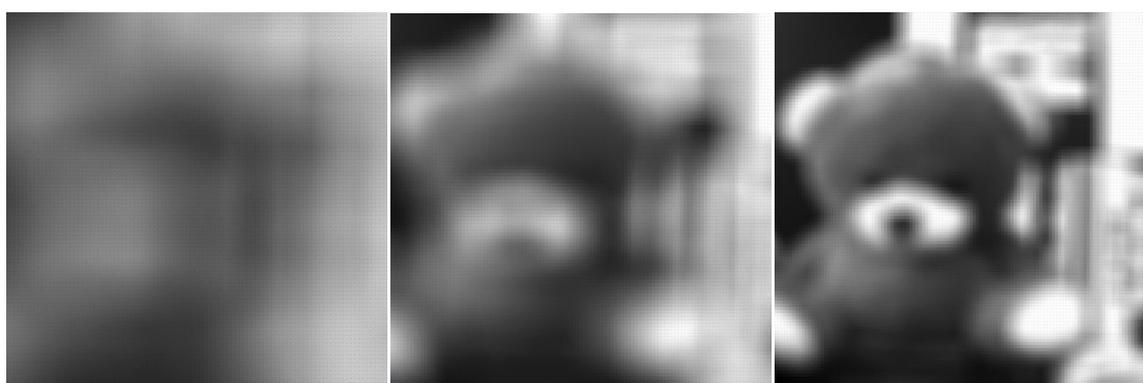


図9. (a) 1回処理の予想画像

(b) 2回処理の予想画像

(c) 3回処理の予想画像

#### < 引用文献 >

- [1] J. Tanida, T. Kumagai, K. Yamada, S. Miyatake, K. Ishida, T. Morimoto, N. Kondou, D. Miyazaki, and Y. Ichioka, "Thin observation module by bound optics (TOMBO): concept and experimental verification," *Applied optics*, vol. 40, no. 11, pp. 1806-1813, 2001.
- [2] M. Shankar, R. Willett, N. Pitsianis, T. Schulz, R. Gibbons, R. Te Kolste, J. Carriere, C. Chen, D. Prather, and D. Brady, "Thin infrared imaging systems through multichannel sampling," *Applied optics*, vol. 47, no. 10, pp. B1-B10, 2008.
- [3] A. Brückner, J. Duparré, R. Leitel, P. Dannberg, A. Bräuer, and A. Tünnermann, "Thin wafer-level camera lenses inspired by insect compound eyes," *Optics Express*, vol. 18, no. 24, pp. 24 379-24 394, 2010.
- [4] K. Venkataraman, D. Lelescu, J. Duparré, A. McMahon, G. Molina, P. Chatterjee, R. Mullis, and S. Nayar, "Picam: An ultra-thin high performance monolithic camera array," *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol.

32, no. 6, p. 166, 2013.

- [5] R. Dicke, "Scatter-hole cameras for x-rays and gamma rays," *The Astrophysical Journal*, vol. 153, p. L101, 1968.
- [6] E. Fenimore and T. Cannon, "Coded aperture imaging with uniformly redundant arrays," *Applied optics*, vol. 17, no. 3, pp. 337-347, 1978.
- [7] T. Cannon and E. Fenimore, "Coded aperture imaging: Many holes make light work," *Optical Engineering*, vol. 19, no. 3, pp. 193-283, 1980.
- [8] A. Zomet and S. K. Nayar, "Lensless imaging with a controllable aperture," in *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 1, 2006, pp. 339-346.
- [9] G. Huang, H. Jiang, K. Matthews, and P. Wilford, "Lensless imaging by compressive sensing," in *20th IEEE International Conference on Image Processing*, 2013, pp. 2101-2105.
- [10] M. J. DeWeert and B. P. Farm, "Lensless coded-aperture imaging with separable doubly-toeplitz masks," *Optical Engineering*, vol. 54, no. 2, pp. 023 102-023 102, 2015.
- [11] A. Wang, P. Gill, and A. Molnar, "Angle sensitive pixels in cmos for lensless 3d imaging," in *IEEE Custom Integrated Circuits Conference*, 2009, pp. 371-374.
- [12] P. R. Gill, C. Lee, D.-G. Lee, A. Wang, and A. Molnar, "A microscale camera using direct fourier-domain scene capture," *Optics letters*, vol. 36, no. 15, pp. 2949-2951, 2011.
- [13] P. R. Gill and D. G. Stork, "Lensless ultra-miniature imagers using oddsymmetry spiral phase gratings," in *Computational Optical Sensing and Imaging*. Optical Society of America, 2013, pp. CW4C-3.
- [14] D. Stork and P. Gill, "Lensless ultra-miniature cmos computational imagers and sensors," in *International Conference on Sensor Technologies and Applications*, 2013, pp. 186-190.
- [15] Kazuyuki Tajima, Takeshi Shimano, Yusuke Nakamura, Mayu Sao, Taku Hoshizawa, Lensless light-field imaging with multi-phased fresnel zone aperture, 2017 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), 12-14 May 2017.
- [16] Mayu Sao, Yusuke Nakamura, Kazuyuki Tajima, and Takeshi Shimano, Lensless close-up imaging with Fresnel zone aperture, *Japanese Journal of Applied Physics (9S1):09SB05*, September 2018.
- [17] Shimano T, Nakamura Y, Tajima K, Sao M, Hoshizawa T., Lensless light-field imaging with Fresnel zone aperture: quasi- coherent coding, *Appl Opt.* 2018 Apr 10;57(11):2841-2850.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 画像センサ装置	発明者 有馬 裕	権利者 九州工業大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-8015	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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