

氏名	こばやし まさひろ 小林 昌弘
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 技術社会システム専攻
学位論文題目	全画素像面位相差検出オートフォーカスCMOSイメージセンサの 画素構造に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 須川 成利 東北大学教授 中村 健二 東北大学教授 石田 修一 東北大学准教授 黒田 理人

## 論文内容要約

デジタル一眼レフカメラ, ミラーレスカメラを始めとする写真撮影用のカメラに加え, 車載, 防犯, 医療, 検査, 科学計測等の分野で利用されるカメラシステムにおいて, 小型で動画撮影に対応した高性能なオートフォーカス機能が求められており, 高画質なイメージセンシング機能と高性能なオートフォーカスセンシング機能と1つのチップで実現する像面位相差検出オートフォーカス技術への要求が高まっている. これまでに, 図1中に示す部分的に遮光部を設けた画素を像面に点在させることで像面位相差検出オートフォーカスを機能させたCMOSイメージセンサが提案・実用化されているものの, 遮光部が導入され感度が低下した画素に起因する画劣化の影響から, オートフォーカス検出点の配置に制限が生じていた.

本論文はこうした背景に鑑み, 画素毎に具備されたフォトダイオードを複数に分割することで, 図1右に示像面の全画素における位相差検出を実現する全画素像面位相差検出オートフォーカス CMOS イメージセンサ術を提案し, 設計, 製造してその性能を実証した成果をまとめたものであり, 全文6章からなる.

第1章では序論として, CMOS イメージセンサの活用動向とオートフォーカス技術の動向について述べ, カラシステムに係わるそれぞれの性能指標について述べた. さらに, 先行研究における課題を明確にしたうえで, 本研究の目的を述べた. また, 本研究に係わる内容として, 撮像装置としての性能向上 (多画素化・高感度化・高機能化) について述べた.

第2章では, カメラシステムにおけるオートフォーカス機能の歴史と像面位相差検出オートフォーカスとして, まず人間の眼におけるピント調整について述べ, オートフォーカス方式に関して, エネルギー投射の有無, 測距光束の利用形態, 像の分離, 焦点検出原理で系統的に分類し, 特徴をまとめることで, 本研究の特徴と先行研究に対する優位性を位置付けるとともに, 本研究のフォトダイオード分割型の全画素像面位相差検出オートフォーカス方式の動作原理について論じている.

本研究の全画素像面位相差検出オートフォーカス方式の動作原理を図2右に示す. 図2(a)のフロントフォーカスの状況では, 撮像レンズの右側を通る光束Aと左側を通る光束Bは, イメージセンサの像面上でそれぞれ像A, 像Bとして撮像レンズの中央に対して反対方向に投影される. 一方, 図2(c)のバックフォーカスの場合は, 光束A, Bは像面上で同じ方向に投影される. したがって, 結像面における像A, Bのピーク点の位置関係からデフォーカス (フォーカスのずれ) 方向がわかる. デフォーカス量は像A, Bのピーク点間の距離に比例して増加し, 撮影時の瞳距離, 絞り値から算出される. 合焦点では図2(b)に示すように, 像面上の同一点に光束A, Bが集光し, 像A, Bのピーク点が一致する. カメラシステムは, 算出されたデフォーカス方向とデフォーカス量とに基づいて, 撮影レンズを瞬時に合焦位置まで駆動することができる.

第3章では, 第2章で論じたオートフォーカス方式の原理を実証するために, フォトダイオード分割型の画素設計フローを提案するとともに, フォトダイオードを分割した際に生じる感度低下領域および光散乱の影響を

明らかにし、画質へ与える影響を考察している。また、原理確認用に各画素の1つのトップマイクロレンズに2×2に4分割したサブフォトダイオードを割り当てた全画素像面位相差検出オートフォーカス原理検証チップを試作、測定し、提案方式によるオートフォーカス機能を実証している。原理検証試作品でカメラシステムを構築し、実際に撮影した撮影結果を図3左に各サブフォトダイオードから得られる像ごとに示す。図3右は、それぞれの像の黄色点線枠部を拡大した図である。それぞれの像において、特に奥側の被写体で視差が生じていることを確認することができる。それぞれの光電変換部から得られた視差情報により、位相差検出AFとして動作可能であることを確認できた。

第4章では、第3章で動作原理を実証した提案技術を適用して全画素のフォトダイオードを左右に2分割した、有効画素数920万画素、フォーカス検出点920万点の全画素像面位相差検出オートフォーカスCMOSイメージセンサ画素の光学・デバイス設計論をまとめている。また、分割するフォトダイオードの分離部には、絶縁体材料を用いないPN接合分離方式の適用が高画質と高い製造安定性を両立するのに望ましいことを明らかにしている。さらに、フォトダイオードを分割することで増大する出力信号数をフレームレートの低減を招くことなく高速に読み出すための回路構成、及び高感度性能とオートフォーカス機能に必要な左右の像分離の容易さとを両立するためのトップマイクロレンズの光学設計指針を明らかにしている。光学設計の一例として、トップマイクロレンズの曲率半径を変化させた場合の光学・デバイスシミュレーションの結果を図4に示す。光強度が高いことを示す赤色の部分が曲率半径の大きさによって変化していることがわかる。すなわち、入射光の集光位置が曲率半径で調節できる。また、位相差検出オートフォーカスの精度を高めるためには、サブフォトダイオード間により大きな感度差がつく(図4左下の感度比が小さくなる)ことが望ましく、曲率半径の大きさによって感度比も変化することが確認できる。

第5章では、第4章で論じたCMOSイメージセンサを製造し、測定結果からその性能の有用性を論じている。最小加工寸法0.18 $\mu\text{m}$ のCMOSイメージセンサ製造技術を用いて製造した画素ピッチ6.4 $\mu\text{m}$ 、有効画素数920万画素の試作チップを用いて4K映像で毎秒60コマを出力するカメラを構築し、78ke $\cdot\text{lx/s}$ の光感度と像面位相差検出オートフォーカス機能を実証している。表1に試作したCMOSイメージセンサの仕様と性能を一覧にして示す。また、画素構造の最適化により、オートフォーカス機能を維持しつつ光感度、暗時ノイズ、飽和性能を改善した結果をまとめている。さらに、提案技術を応用したダイナミックレンジ拡大及び撮像後の画像のリフォーカス機能を提案し、今後の性能改善に向けた指針についても論じている。

第6章は、結論である。

本論文は、フォトダイオード分割型の全画素像面位相差検出オートフォーカスCMOSイメージセンサの画素構成、要素技術を明らかにし、設計、製造して、その性能を実証し、高画質性能と高性能なオートフォーカス機能を両立した成果をまとめたものである。本研究の全画素で像面位相差検出オートフォーカスを実現するCMOSイメージセンサを基礎とすることで、デジタルカメラの高性能化のみならず、デジタルカメラ以外の産業用途への展開など、科学技術のさらなる発展の一助となるCMOSイメージセンサの開発がなされることが期待される。

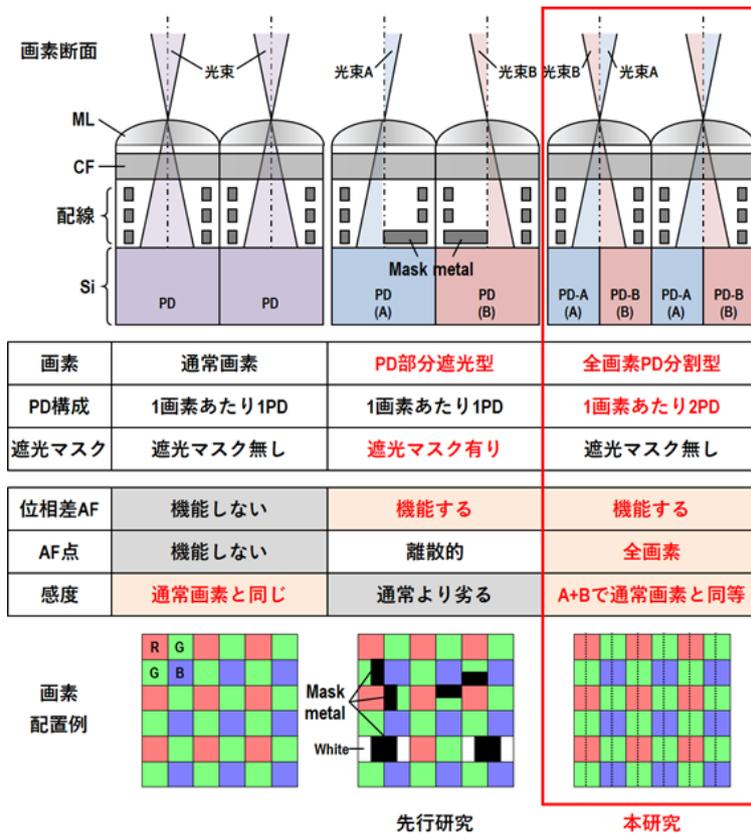


図1. 像面位相差検出オートフォーカス方式のまとめ

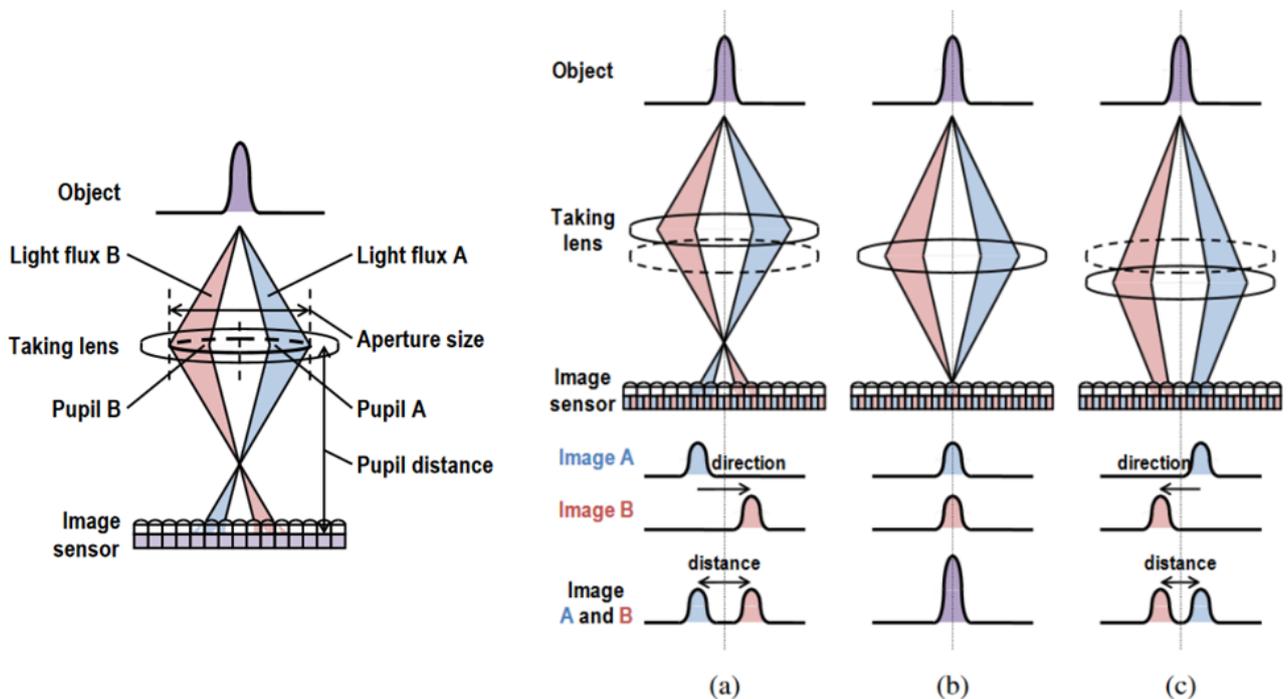


図2. 全画素像面位相差検出AFの光学系と原理

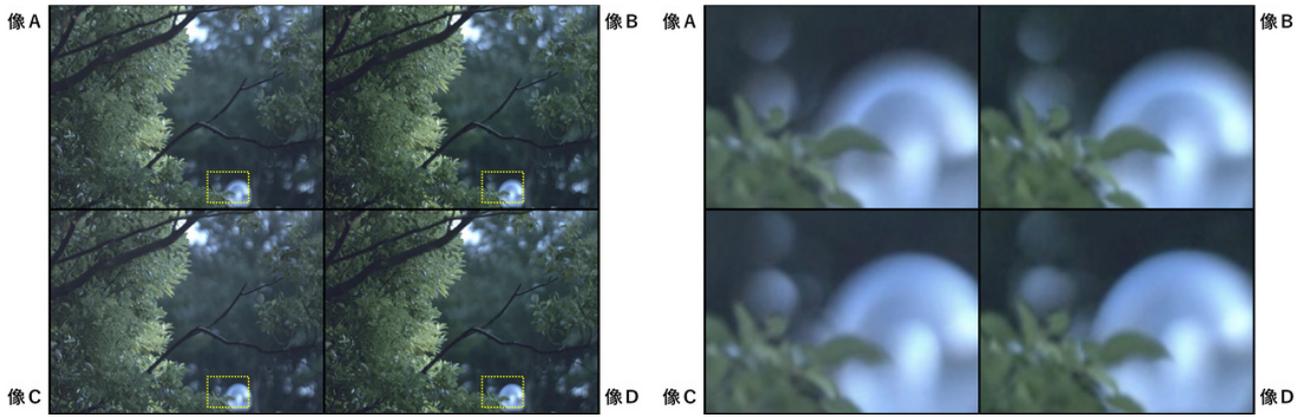


図3. 原理検証試作品での撮影例と黄色枠部の拡大図

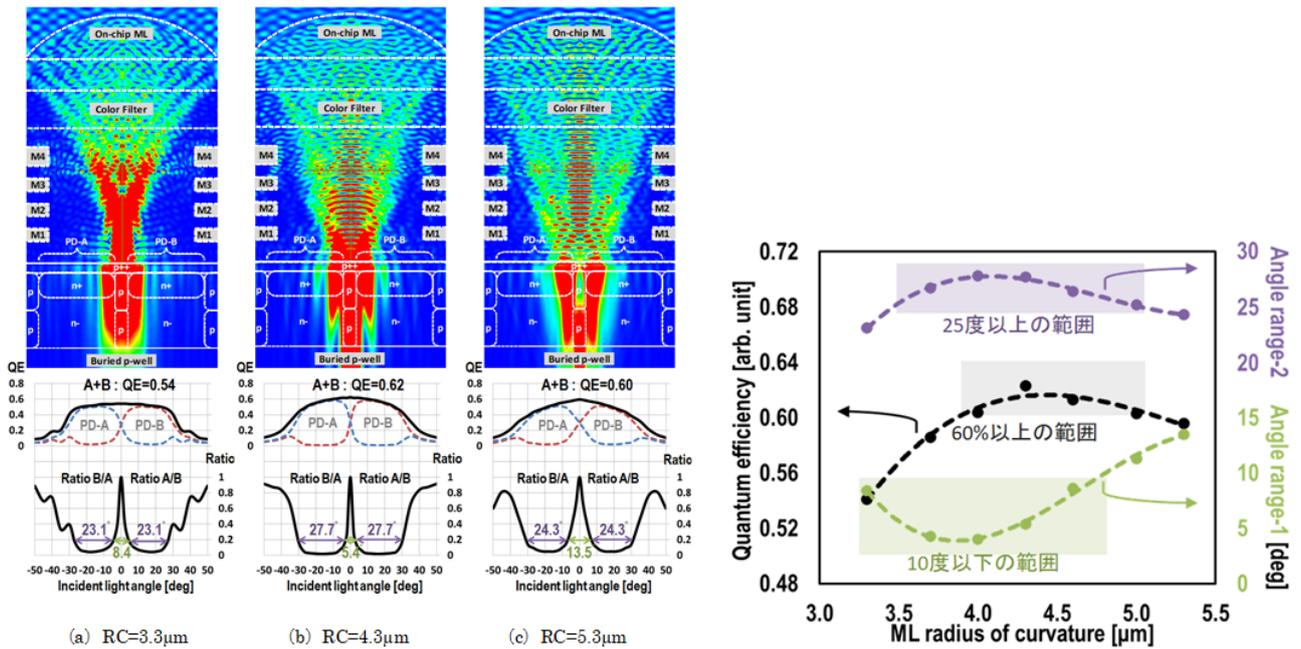


図4. 光学・デバイスシミュレーション結果例と結果のまとめ

表1. 試作した全画素像面位相差 AF CMOS イメージセンサの仕様と性能

製造プロセス	0.18 $\mu\text{m}$ 1P4M CMOS	チップサイズ	29.9mm $\times$ 21.6mm
画素ピッチ	6.4 $\mu\text{m}$	光学サイズ	スーパー35mm
画素構成	PD2分割型	電源電圧	3.3V / 1.8V
サブ画素サイズ	3.2 $\mu\text{m}$ $\times$ 6.4 $\mu\text{m}$	フレームレート	60fps @ 4K
飽和電荷量	40000e <sup>-</sup>	有効画素数	4112 $\times$ 2248 (9.2M)
G画素感度	78000e <sup>-</sup> /lx/s	有効PD数	8224 $\times$ 2248 (18.4M)
ランダムノイズ	2.5e-rms	有効像面AF領域	80% $\times$ 80%
暗電流	50e <sup>-</sup> /s	AFスピード	Cont. AF比 $\times$ 4 $\sim$ 10