



イメージセンサを用いた新機能センシングシステムに関する研究

西村, 佳壽子

(Degree)

博士 (科学技術イノベーション)

(Date of Degree)

2022-03-25

(Date of Publication)

2023-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8387号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1008387>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博士論文

イメージセンサを用いた 新機能センシングシステムに関する研究

令和4年1月

神戸大学大学院科学技術イノベーション研究科

西村 佳壽子

目次

1	緒論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究の概要と本論文の構成	15
2	有機 CMOS イメージセンサ回路技術	21
2.1	はじめに	21
2.2	有機 CMOS イメージセンサ画素構造	22
2.3	広ダイナミックレンジ技術	25
2.4	ノイズキャンセル技術	30
2.5	グローバルシャッタ技術	34
2.6	8K4K センサ技術	36
2.7	評価結果	37
2.8	まとめ	47
3	光通信用トランシーバ技術	49
3.1	はじめに	49
3.2	バーストモード光受信回路技術	50
3.3	バーストモード光送信回路技術	57
3.4	評価結果	62
3.5	まとめ	66
4	高ロバストなイメージセンサを用いた高効率生産性向上 システム技術	69

4.1	はじめに	69
4.2	事業戦略：外部・内部環境分析	83
4.3	技術戦略	91
4.4	財務戦略	95
4.5	まとめ	97
5	結論	101
5.1	本研究まとめ	101
5.2	今後の展望	103
	謝辞	105
	参考文献	107
	発表論文一覧	115
	本研究に関する発表論文	115
	学術論文	115
	その他の発表論文	116
	国際会議	116
	国内会議および国内論文	117
	受賞	120
	招待講演	120
	図一覧	123
	表一覧	127

第1章

緒論

1.1 研究背景

1.1.1 イメージセンサ技術

我々は、自分自身の姿、行動、自分を取り巻く周辺状況を感じ、認識しながら日常生活、産業生活を行っている。人間が感知、認識するための感覚機能のうち、古来から最も主となる5種類の感覚機能、視覚・聴覚・触覚・味覚・嗅覚を「人の五感」という（図1-1）。

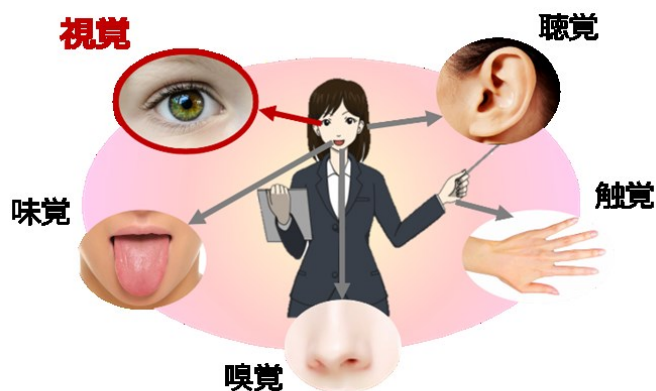


図1-1 人の五感

近年の Society5.0 に代表される情報化社会において、人の五感を機械(各種センサ)で代用、取得したデータを蓄積、解析に活用しようとする動きが盛んである。その一例が、図1-2に示す、視覚の代用となるイメージセンサ、聴覚の代用となる音響・超音波センサ、触覚の代用となる接触センサ、味覚の代用となる味覚・液体成分分析センサ、嗅覚の代用となる匂い・気体成分分析センサである。また、これらを連携させたマルチモーダルセンシングもおこなわれつつある。

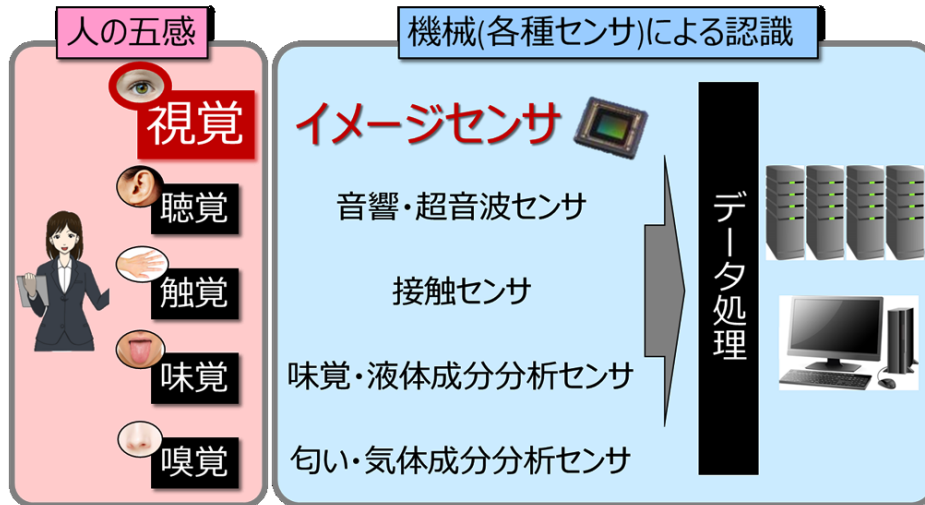


図1-2 人の五感と機械(各種センサ)による認識

この中の、視覚をつかさどるイメージセンサであるが、従来は、人の眼に代わり、いかに正確に人の眼と同等の撮影をするかが目的であった。

図 1-3 に示すように、イメージセンサを搭載したカメラ製品が数多く開発されており、携帯電話やパーソナルコンピュータでは、日常生活の個人記録や友人とのコミュニケーションを目的に、放送カメラ、監視カメラ、車載カメラなどでは、産業のあらゆるシーンにおける事実の記録を目的に使用されている。そして、我々の生活において、その目的通り、人の眼の代用として機能し続けている。



図1-3. 現在のイメージセンサ活用例

さらに、今後の情報化社会においては、人の眼の認識限界を超え、高速、高/低照度、可視光以外の波長など、人の眼には不可視の情報を可視化できる機能を持つことで、人よりも正確に、人よりも早く、また、人には認識できない事象の可視化、データ化を行っていくことが求められている。また、人々の生活をより安全に、産業検査をより高速・高精度に、各種機械の自動自律制御を可能とするキーテクノロジーとなることが求められている。

このような技術が実現できれば、例えば、都市における交通渋滞要因解明とその回避策、最適な乗り換え情報の提供や、街中における異常行動の早期発見と追跡などの「俯瞰的な視点」や、個人の嗜好、その時の感情に合わせた購買サービスの提案といった「個にフォーカスした視点」など、今までは実現できなかった新しい価値の提案や、今までは隠れていた真の課題解明が期待される(図1-4)。



図1-4 今後のイメージセンサ活用による価値創造

ここで、イメージセンサ技術の技術進化の概要を示す。

イメージセンサの、第1のイノベーションは、CCD(Charge Coupled Device)イメージセンサの発明である。ベル研のW. S. Boyle氏とG. E. Smith氏が、磁気バブルメモリの動作原理から着想し、半導体に応用することによって、CCD技術を1969年に発明、1970年に発表した(図1-5)。本CCD技術は、当初はメモリ、ディスプレイ、遅延素子に活用され、1971年にその応用としてフレーム転送方式のFT(Frame Transfer)-CCDイメージセンサが発表された。その後、1975年に試作カメラ、1980年にカラーカメラが開発され、さらに、1985年に、25万画素高解像度CCDイメージセンサとして民生

用ビデオカメラに搭載、実用化が開始された。CCDイメージセンサ方式は、現在においても、CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)イメージセンサ方式と共に、様々な分野で活用されるイメージセンサの基本構成となっている。

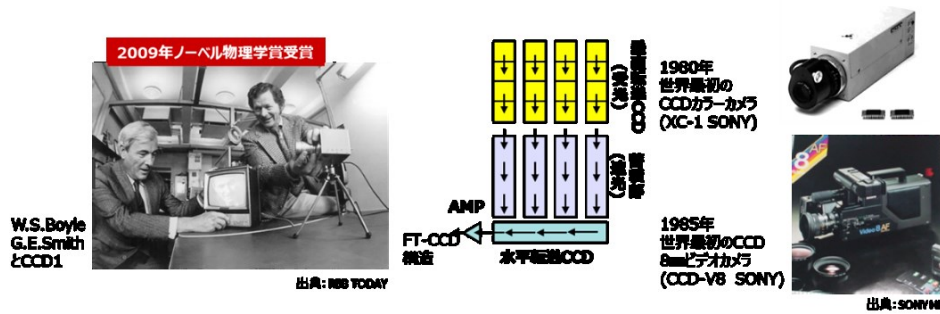


図1-5 CCD開発者とCCD構造、世界最初のカメラ・ビデオ

人に視覚は精密である。そのため、人に視覚と同一性能の実現には多くの課題があり、CCDイメージセンサの本格実用化までには、いくつかの技術の発明が重ねられた。表1-1にその一部を示す。

表1-1 CCDイメージセンサ実用化のための重要技術

年	発明・発表内容	発明者	詳細
1969	CCDの基本原理	Bell Lab. W.S.Boyle氏 G.E.Smith氏	1969発明 1970発表
1971	FT (Frame Transfer)-CCD	Bell Lab. M.F.Topmsett氏 等	最初の電荷転送方式
1971	FD (Floating Diffusion) アンプ	RCA W.F.Kosonocky氏 J.E.Carnes氏	高感度の実現
1972	ブルーミング抑制方式	Bell Lab.	高輝度光入射時のセンサ画質向上
1972	IT (Interline Transfer)-CCD	RCA W.F.Kosonocky氏 J.E.Carnes氏	現在使用されている基本的な電荷転送方式
1974	CDS (Correlated Double Sampling)	Westinghouse Electric M.H.White氏 等	センサのノイズ低減
1976	オンチップマイクロレンズ	松下電器 和田孝道氏 等	画素毎にマイクロレンズを配置し集光を高める画素の感度向上、小型化に貢献
1976	ベイヤー配列カラーフィルタ	EASTMAN KODAK	フィルタ処理によるRGBカラー画像の実現
1977	可変電子シャッタ	SONY 越智成之氏 等	不要電荷を放出、高感度の実現
1978	縦型オーバーフロードレイン構造フォトダイオード	東芝 山田哲生氏	ブルーミング抑制画素の小型化、電子シャッタの実現に貢献
1979	FIT (Frame Interline Transfer)-CCD	東芝 関根弘一氏	スミアやブロッカ等のセンサ画質問題を解決高機能カメラでは本方式を使用
1981	埋め込みフォトダイオード	NEC 寺西昌一氏	画素のノイズ低減
1986	電子シャッタ	SONY 米本和也氏	露光制御技術
2000	ハニカムCCD	富士フイルム 山田哲生氏	静止画の高解像度化を実現プログレッシブスキャンに最適な画素構造

CCD イメージセンサの開発においては、特に大きな技術の発明が2つあった。

1点目は、「縦型オーバーフロードレイン構造」技術である。各画素に基板方向にPN構造を作り、強い光により過剰に発生し、蓄積できなくなった信号電荷を、基板側に捨て去る構造である。本技術確立により、それまで画質を大きく劣化させていた、信号電荷の漏れ込みによる画像のにじみであるブルーミングを抑制することができるようになった。本技術は、CCD イメージセンサの微細化、高密度化、電子シャッタの実現に大きく貢献した。

2点目は、「埋め込みフォトダイオード」技術である。通常のフォトダイオードは、半導体N基板の上にP-Wellを形成し、その上にN⁺層を形成する、いわゆるN+PN構造になっている。埋め込みフォトダイオードでは、さらに、N型層の上にP⁺層を形成し、フォトダイオードを表面ではなく、バルク側に形成したことに特徴がある。この構造によりフォトダイオード界面が空乏化しないようにでき、界面に発生する暗電流が抑制され、暗電流に起因する固定パターンノイズを一桁以上下げることができるようになった。本技術は、CCD イメージセンサだけでなく、CMOS イメージセンサでも活用されており、特に近年の低照度における信号・ノイズ比(S/N)改善に貢献している。

また、CCD イメージセンサの技術進化の方向性としては、画素サイズの小型化も重要である(図1-6)。小型化技術の進化に伴い、様々な被写体を高解像度に撮像する技術が進んだ。

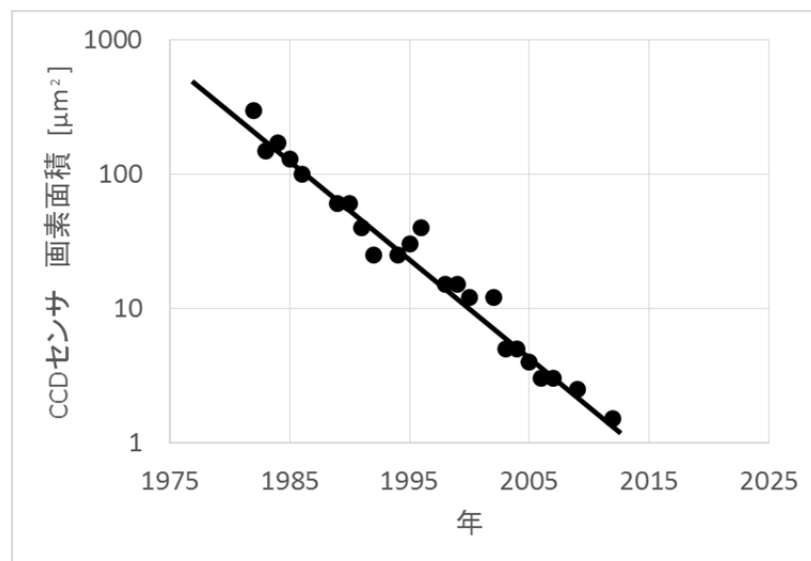


図1-6 CCDイメージセンサ 画素サイズ

イメージセンサの、第2のイノベーションは、CMOS イメージセンサの発明、台頭である。CMOS イメージセンサの開発自体は1990年ごろから行われていたが、初期のCMOS イメージセンサは画素毎のばらつきが大きく、また、感度、ノイズ、暗電流といった、画質を決定する主要な性能がすべてCCD イメージセンサに対して劣っていた。そのため、なかなか製品化が実現されなかったが、その一方で、CCD イメージセンサのように高電圧をかける必要がなく、消費電力を抑制できる、汎用CMOSプロセスでの開発が可能であり、後段回路との融合、SoC(System on a Chip)化が可能であるなどのメリットから、そのポテンシャルは感じられていた。

図1-7、表1-2に、CCD イメージセンサとCMOS イメージセンサ構造、性能の比較を示す。

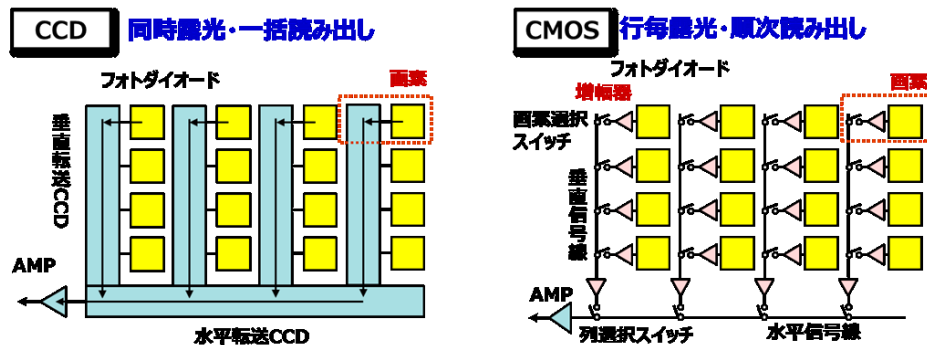


図1-7 CCDイメージセンサとCMOSイメージセンサの構造比較

表1-2 CCDイメージセンサとCMOSイメージセンサの性能比較

特性	CCD	CMOS
感度	○	(初期)△ → (現在)○
ノイズ	○	(初期)△ → (現在)○
暗電流	○	(初期)△ → (現在)○
混色	○	(初期)△ → (現在)○
スミアによる劣化	×	○
ダイナミックレンジ	△	○
速度	△	○
電源電圧	△	○
消費電力	×	○
ランダムアクセス	×	○
製造プロセス	×専用プロセス	○汎用プロセス
SoC化	×	○

初期性能の劣っていた CMOS イメージセンサであるが、増幅器構成の導入、および、回路的な抑制対策により、センサ特性が CCD イメージセンサ同等から、さらには低ノイズ、低コストなどで上回ったことにより、2000 年以降、CCD 方式から CMOS 方式への置き換えが急速に進んだ。CMOS 方式実用化のための大きな技術進化の一部を表 1-3 に示す。

表1-3 CMOSイメージセンサ実用化のための重要技術

年	発明・発表内容	発明者	詳細
1990	ASIC Image Sensor	University of Edinburgh	CMOSプロセスを用いたイメージセンサ 但しPassive構造
1993	CMOS Image Sensor	VLSI Vision Ltd., University of Edinburgh	CMOSプロセスを用いたイメージセンサ 但しPassive構造 題名にもCMOS Image Sensorと明記
1993	Active Pixel Sensor	California Institute of Technology	CMOSイメージセンサの初期構造
1994	CMOS Active Pixel Image Sensor	California Institute of Technology	CMOSイメージセンサの初期構造
2006	列並列カムADC Digital Double Sampling	SONY	低ノイズADC方式の開発
2006	有機イメージセンサ	NHK	有機光電変換膜を用いたイメージセンサを開発、高感度
2006	広ダイナミックレンジイメージセンサ	東北大学	Lateral Overflow構成回路で200dBを超える広ダイナミックレンジを実現
2006	広ダイナミックレンジイメージセンサ	東芝	2重露光で広ダイナミックレンジを実現
2007	BSI画素	Omnivision Technologies TSMC	配線層を裏面に配置することで、フォトダイオードの感度向上、配線部の自由度向上
2012	積層型イメージセンサ	SONY	画素部と回路部の積層により小型化、高速化を実現
2015	低ノイズイメージセンサ	静岡大学	0.27e ⁻ 超低ノイズ実現
2016	グローバルシャッタ対応有機イメージセンサ	Panasonic	光電変換制御グローバルシャッタと1回露光で広ダイナミックレンジの両立実現
2017	3層積層型イメージセンサ	SONY	画素部と回路部に加え、DRAMメモリ層に積層、超高速動作、イメージセンサチップでのデジタル処理を可能とする

CMOS イメージセンサにおいても、画素サイズの小型化は重要なファクタである(図 1-8)。特にモバイル機器(スマートフォンなど)の高解像度化に伴い、画素サイズは 0.5 μm 代までの微細化が進んだ。一方、デジタルカメラや監視用カメラ、産業検査用カメラにおいては、イメージセンサの特性として暗時撮像特性の重要度から、感度が必要であり、画素サイズの微細化は 2.0 μm から 4.0 μm 程度が最適値とアプリケーション毎に求める性能は異なっている。

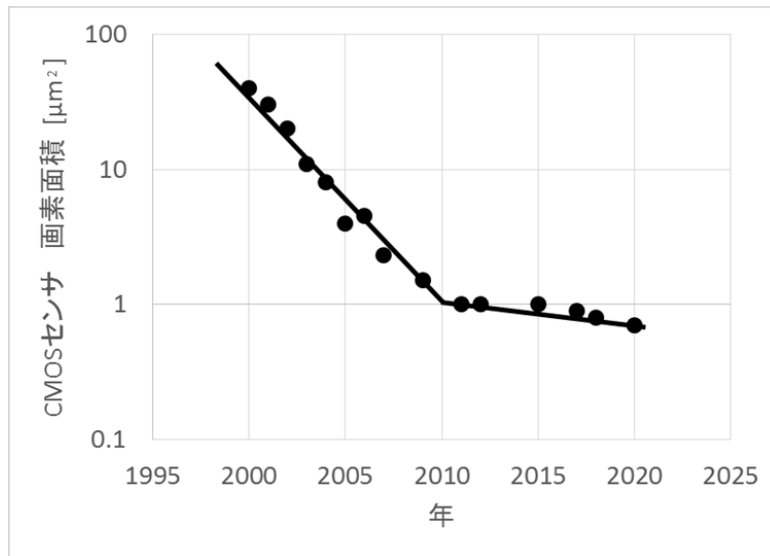


図1-8 CMOSイメージセンサ 画素サイズ

イメージセンサの、第3のイノベーションは、本研究にも関係する、センシング技術の進化である。従来、いかに正確に人の眼を模するかということが求められてきたが、現在は様々なシーンにおいて、人の眼の能力を超えて認識する、判断することが求められている。例えば、人認識においては、人の眼には認識できない距離や暗さにおいてもその人を区別、認識することが求められており、産業検査においては、人の眼では追従できない速度において正確な識別、判断することが求められている。また動体解析においては、周辺物との距離や速度の認識、さらには今後の動作の予測が求められている。

これらの市場要望に対し、イメージセンサの高速化、低ノイズ化、広ダイナミックレンジ化技術、またToF(Time of Flight)などの距離測定技術、これらをシステム化しローパワーで動作させるシステム制御技術が急激に進化している。

一方、大きく進化しているイメージセンサ性能、センシング技術であるが、実際のセンシング現場における情報取得においては、求められる要望レベルは高く、さらなる性能向上が求められている。

進化の求められる性能の一つは、ダイナミックレンジ性能である。図1-9に示すように、一日の中で、また屋外から屋内への移動時などにおいて、輝度の変化はとて大きい。このような様々な輝度変化時にも正確な連続撮像が可能となるよう、広いダイナミックレンジ性能が求められている。人の目

のダイナミックレンジはおよそ 100 dB と言われているが、現在のイメージセンサの 1 回撮像のダイナミックレンジとしては 70 dB 程度しかない。一方、市場要望としては、人が判断を行う監視、車載カメラで 120 dB 以上、完全に機械が判断を行う自動運転で 140 dB 以上のダイナミックレンジが必要と言われている。

本課題に対し、従来は、露光条件を変更した複数枚画像を加算することにより、ダイナミックレンジの拡大を図る手法や、あふれた電荷を別容量で蓄積し、読み出し後加算することで、ダイナミックレンジの拡大を図る手法が用いられていた。しかし、動体の高精度なセンシング、また、動体からの高精度なセンシングにおいては、タイミングの異なる複数枚画像を合成することによる動作ぶれが課題となってしまったため、動作ぶれのない撮像(例えば 1 回撮像)でのダイナミックレンジ向上が重要となる。

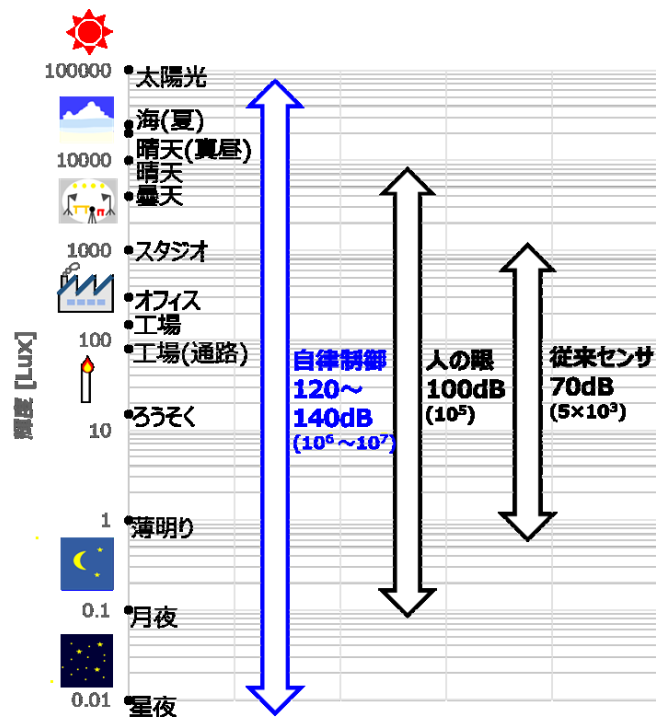
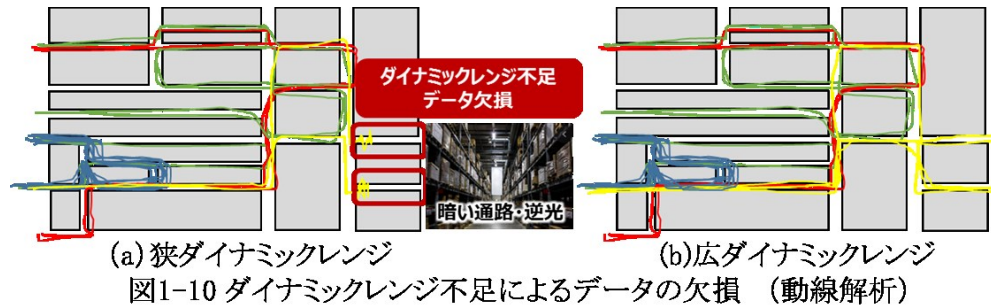


図1-9 各シーンに必要なダイナミックレンジ

ここで、撮像データを、イメージング用途のデータとして考えると、ダイナミックレンジが不足した場合の影響は、露光の過不足による白飛び・黒つぶれといった画像のクオリティ劣化となるが、認識・判断を行うセンシング用途のデータとして考えると、白飛び・黒つぶれ部分は、データの欠損とな

ってしまうため、とても大きな課題となる(図1-10)。



もう一点、進化が求められる性能は高速撮像性能である。近年、高速物体を歪みなく撮像、正確にデータ取得、判定できる機能が求められている。

一般的なCMOSイメージセンサでは、センサ面上部から下部にかけて順次シャッタが実行されるローリングシャッタ制御が使用されているため、図1-11(a)のように、高速物体撮像時には歪みが生じ、正確な形状の判断が不可能となる課題が生じた。そのため、近年の産業検査や交通監視分野においては、図1-11(b)のように、一画面全画素同時撮像可能なグローバルシャッタ制御が求められており、グローバルシャッタ制御対応センサの開発が必須となる。

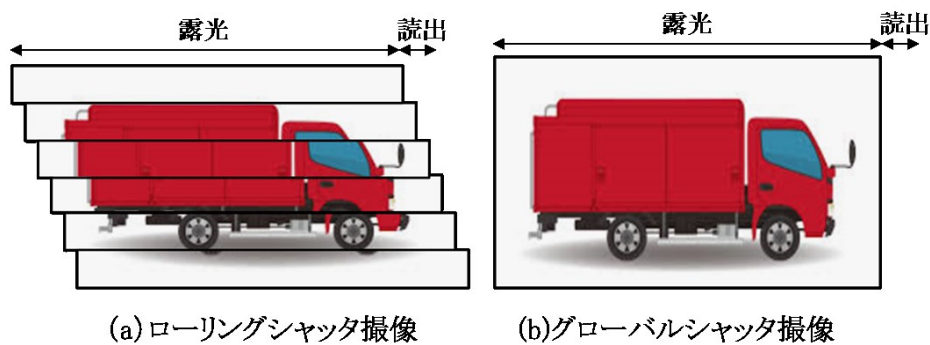


図1-11 高速撮像

さらに、人や作業状況を常にモニタし続ける現場センシング、特に、動体からのセンシングにおいては、環境変化に影響を受けず、正確なデータを取得し続ける必要があるため、グローバルシャッタ機能と広ダイナミックレンジ性能の同時実現が求められる。

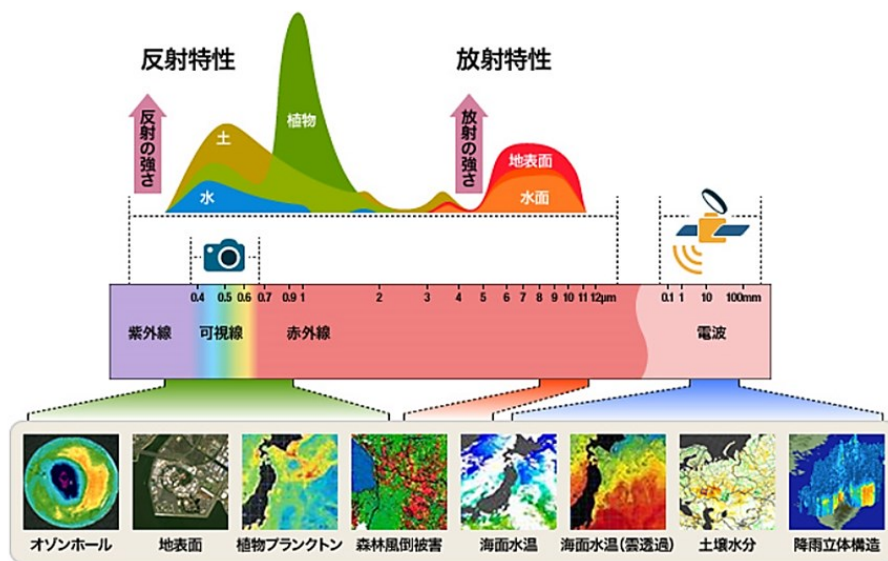
しかし、現在のグローバルシャッタ制御対応のCMOSイメージセンサの構

造では、感度と飽和特性を決定するフォトダイオードとグローバルシャッタ機能を実現するための電荷蓄積容量の面積の取り合いとなり、グローバルシャッタを実現しつつ、広ダイナミックレンジ性能を実現することは構造上困難であるという課題がある。

本課題に対し、筆者は1つの解として、パナソニックで開発中の「有機 CMOS イメージセンサ」が差別化デバイスとして提案できると考えた。本デバイスは、光電変換を行う有機薄膜と電荷を蓄積する電荷蓄積部が別構造となっているため、各々独立に最適化設計が可能である。そのため、従来 CMOS イメージセンサでは実現できなかった、広ダイナミックレンジ性能とグローバルシャッタ機能を同時に実現できる。本デバイスを使用することにより、刻々と環境の変わるシチュエーションにおいても、ロバスト性高く、正確なデータの連続取得が可能となる。

また、図 1-12 に示すように、各波長に感度を持ったセンサによる撮像により、人間の眼でとらえることが可能な可視情報だけではなく、人間の眼ではとらえることが不可能な紫外から赤外の波長までの情報を取得できる短・長波長センシングの可能性も検討されつつある。

「有機 CMOS イメージセンサ」では、従来の CMOS イメージセンサのように、シリコンフォトダイオードの物性で対象波長や感度が決定されるわけではなく、光電変換部の材料を開発、変更することで、任意の波長に対し、高感度撮像可能とできるため、取得可能な情報を拡張することができる大きな可能性も持つ。



出典: JAXA HP

図1-12 波長を活かしたセンシング

「有機 CMOS イメージセンサ」技術詳細については第2章で述べるが、上記に述べた特長を活かし、ロバスト性の高い高精度センシングの検討を行う。

また、「有機 CMOS イメージセンサ」などを用いて取得した大容量の高精度センシング情報の伝送を行うためには、センシング機器間、現場間で信頼性高く高速伝送する技術が必要となる。そこで本研究では、伝送速度1 Gbps超の光通信システムおよび光トランシーバ技術活用について検討を行った。光トランシーバ技術詳細については第3章、高精度センシング情報の高速伝送技術については第4章で述べる。

1.1.2 市場動向と要望

次に、CMOS イメージセンサの市場動向と、市場要望について述べる。

CMOS イメージセンサは、半導体業界では最も成長率の高い分野の一つであり、IC Insights の産業成長予測によると、年平均成長率(CAGR)7.2%で成長を続け、2024年には250億ドルに達するとの予測されている。また、個数ベースでも、CAGR11.5%で成長するとの見通しである(図1-13)。

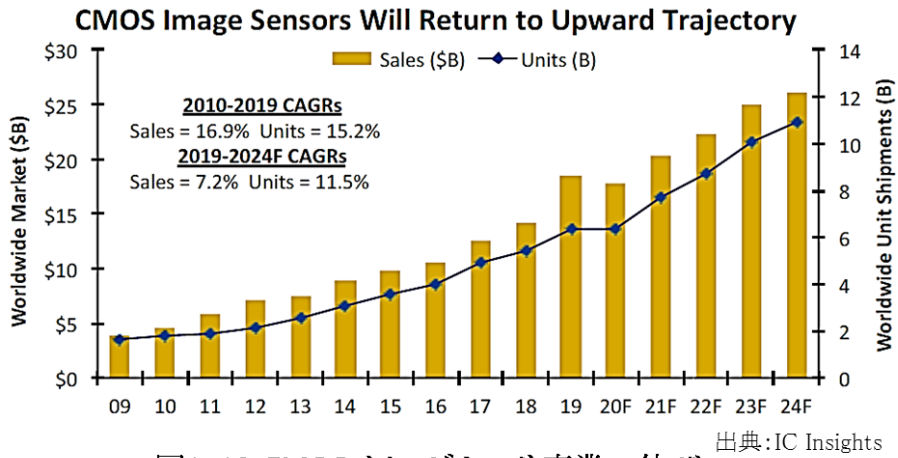


図1-13 CMOSイメージセンサ産業の伸び

その中でも特に、成長率という観点では、監視、産業、自動車の伸びが大きく、2015年から2020年にかけてのCAGRが各々20%程度と驚異的な伸びとなっている(図1-14)。

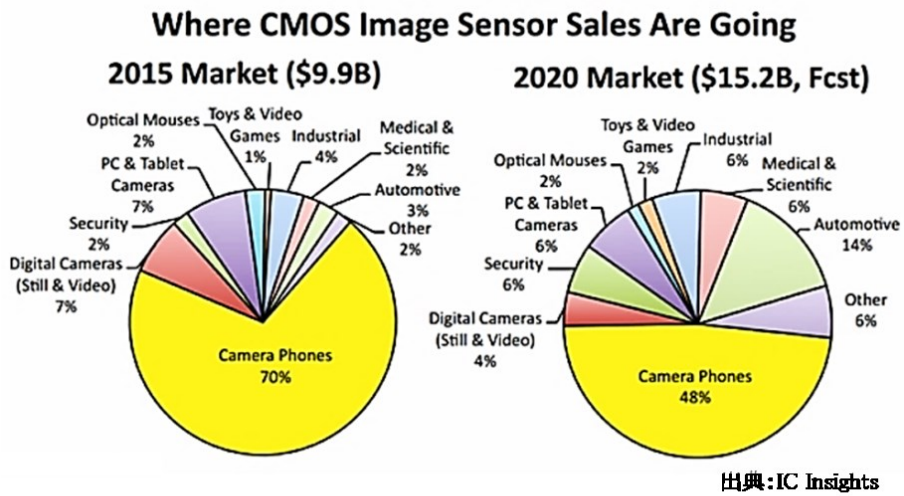


図1-14 CMOSイメージセンサ分野別成長率

また、Yole Developmentによるセンシング市場の変化予測によると、センシング機能は、単一の距離や形状の測定から、AIを用いた機械学習、さらに認識・予測へ技術進化が進む(図1-15)。

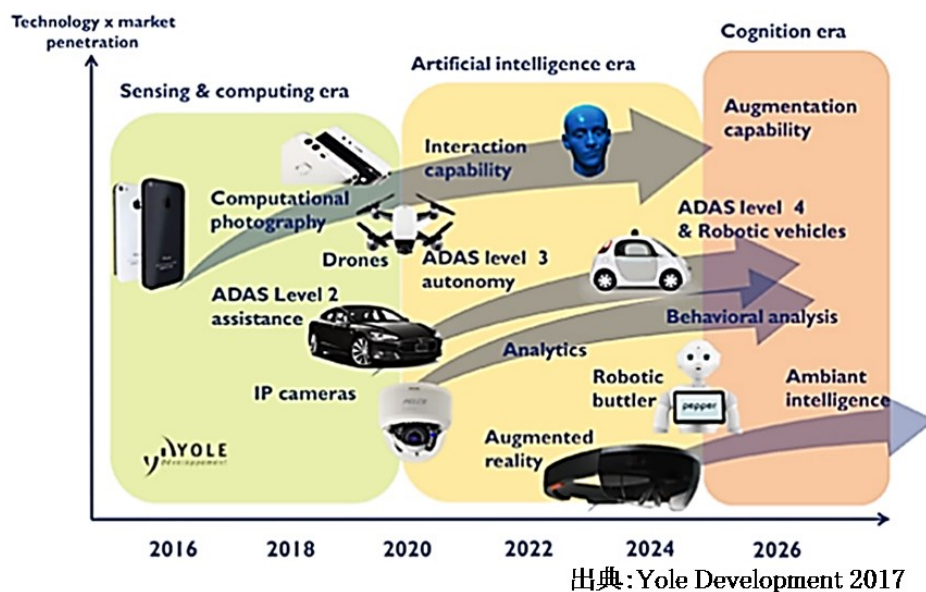


図1-15 イメージセンサ市場の変化

最近の CMOS イメージセンサの技術動向(半導体の著名国際学会である ISSCC : International Solid-State Circuits Conference、Symposium on VLSI Technology and Circuits、IEDM : International Electron Devices Meeting などの技術動向)においても、低ノイズ、広ダイナミックレンジ、高速化、グローバルシャッタ機能といった高性能・高機能化技術に加え、センシングに関する発表が増加している。ただし現時点において、すでに市場ニーズを実現する最適なセンシング方式が選択され、同一センシング方式の中で性能競争が行われているわけではなく、複数多数の方式が検討されており、最適方針、事業化への模索期にあたる。

人に一番近いエッジ部で情報集可能なイメージセンサだからこそ、センシング活用に対して期待が高まっている。また、近年のイメージセンサが高性能になっているがゆえに、期待と要望が大きくなっているともいえる。一方、前述したように、センシング用途活用に向けてはさらなる性能向上要望があり、様々なセンシング方式の検討が行われているが、最も効果的な方向性の決定については、現時点、検討中である。今回の技術研究を通じ、これらの技術を進化させ、方向性を提示していくことは、大きな意義があると考えられる。

1.2 研究の概要と本論文の構成

本論文における研究内容は、近年のイメージセンサを取り巻く概要、および、イメージセンサ技術の進化、課題について述べた本章(第1章)に加え、第2章から第5章の5つの章から構成される。

第2章では、高精度で高ロバストなイメージセンサの有効な一方式として、有機CMOSイメージセンサの特長的なデバイス構造、および、その独自のデバイス構造を活かした技術開発について述べる。

近年、イメージセンサは、車載、監視、ロボットビジョン、放送、医療、モバイルなど様々なアプリケーションのキーデバイスとなっている。各々の環境において、高精度なイメージングおよびセンシング性能を実現するために、広ダイナミックレンジ、高感度、高フレームレートなどに対する要望が高まっており、特に、逆光時にも確実に撮像可能であること、LED照明やLEDサイネージに対してもフリッカが発生しないことなど、正確でロバスト性の高いイメージングおよびセンシング技術への需要が急増している。このような要望の中で、高解像度、高フレームレート、低消費電力に加え、後段LSIと同時搭載することで高機能処理が可能となるなどの性能的優位性から、CCDイメージセンサに代わり、CMOSイメージセンサがイメージングおよびセンシングデバイスの主流となっている。しかし、一般的なCMOSイメージセンサの動作では、すべての画素のシャッタ、露光が同時に行われるのではなく、行毎にシャッタ、露光が順次実行されるローリングシャッタ操作が実施されるため、高速動体撮像時には動体歪みが生じてしまう。そのため、近年の、産業検査の高速化、自動車・ドローンなど動体の自動自律制御への要望に対しては、CCDイメージセンサのように、すべての画素のシャッタ、露光操作が同時に行われることで動体歪みの発生しない、グローバルシャッタ動作への要望が高まりつつある。ここで、従来のCMOSイメージセンサで、グローバルシャッタ動作を実現しようとする、1点大きな課題がある。画素内に、全画素同時撮像をした電荷を、各々の読み出し時間まで一時的に蓄積するためのメモリと、メモリへ電荷転送を行うための転送回路を追加する必要があるため、電荷蓄積領域と追加したメモリ領域の間で面積の取り合いが発生し、感度と飽和信号が共に低下してしまう。この課題の解決策の1つとして、有機CMOSイメージセンサの新たなデバイス構造が活用できると考える。

有機CMOSイメージセンサは、従来のシリコンCMOSイメージセンサとは画素のデバイス構造が全く異なり、光電変換のための有機薄膜と、信号の電荷

蓄積および読み出し用の回路を設けるシリコン基板部が完全に独立で、積層構造となったイメージセンサである。本センサでは、2つの部分を各々独立に最適に設計可能なため、グローバルシャッタ機能と広いダイナミックレンジ性能を同時に実現することができる。本章では、有機 CMOS イメージセンサの特長のうち2つの技術に焦点を当てる。1点目は、一回の撮像で 120 dB を超える広ダイナミックレンジ性能を実現する技術、2点目は、画素面積や飽和電子数などのセンサ特性を犠牲にすることなくグローバルシャッタを実現する技術である。

これらの技術は、イメージングおよびセンシング分野の性能の飛躍と共に、市場における新価値創造に貢献できると考える。

第 3 章では、近年の IoT 化により、IP トラフィックが劇的に増加する中で、高速かつ低コストで実現可能なネットワークサービスの需要に対し、経済的に大容量のデータ伝送が可能で、伝送速度が 1 Gbps 超の EPON(GE-PON) システムの開発について述べる。

EPON システムでは、複数台の光回線終端装置 ONUs(Optical Network Units)が光ファイバーと 1:N 光カプラーを介して基地局側の 1 台の光回線終端装置 OLT(Optical Line Terminal)に接続されており、1490 nm の波長を使用する連続モードのダウンストリーム伝送と、1310 nm の波長を使用する TDMA(Time Division Multiple Access)バーストモードのアップストリーム伝送で構成される。したがって、本 PON システムにおいて、最も技術的に高性能化が求められるコンポーネントは、アップストリーム伝送用の高速バーストモード光トランシーバとなる。本章では、低コストかつ 1.25 Gbps 高速通信可能なバーストモード光トランシーバ(OLT 用の受信器と ONUs 用の送信器)の技術開発について説明を行う。

新しい自動利得制御技術(AGC:Automatic Gain Control)と基準電圧発生器(RVG:Reference Voltage Generator)により、光受信器は、1.25 Gbps のバーストモード伝送で -29.0 dBm の最小光感度と -2.2 dBm のオーバーロードで 26.8 dB の広いダイナミックレンジを達成した。さらに、新しい自動光出力パワーおよび消光比の制御(APC:Automatic Power Control)システムの考案により、光送信器は、-40 °C~100 °Cの広い温度範囲でそれぞれ ±0.4 dBm および ±0.6 dB 範囲内に変動を抑制可能とした。

本章で説明した光通信技術は、高精度イメージセンサを用いて取得した大容量情報を、センシング機器間、現場間で高速伝送することを可能とする。また、センシング現場(例えば、工場)では、様々な機器で多様な電気信号が用い

られているため、多くのノイズが発生している。しかし、本光通信技術を用いることで、現場機器のノイズ影響を抑制し、信頼性の高い高速伝送を実現することが可能となる。

第4章では、第2章、第3章で述べた技術を活用した、新しいセンシングシステムへの応用について述べる。

日本生産性本部発表の「労働生産性の国際比較(2020年度)」によると、日本の「労働生産性」(=GDP/就業者数)はOECD(Organisation for Economic Co-operation and Development:経済協力開発機構)加盟国37か国中26位と非常に低迷しており、1990年以前の生産性を取り戻すことは、政府、各企業にとって大きな使命となっている。

また、近年、少子高齢化が進み、実効労働人口が減少することによる生産現場における効率化が求められている。団塊世代の退職により、高度経済成長期に技術を立ち上げた人材、高度な専門性を持った人材を一気に喪失することにより、後継者技術の向上、「匠」技術・技巧の伝承の緊急性も高い。

さらに、2019年12月より全世界に広がったCOVID-19の影響により、工場の製造ラインなど密集状態での作業や海外での工場立ち上げ・直接指示ができない状況となり、少人数での効率アップと遠隔制御が必要不可欠となっている。

日常生活に目を向けると、デジタル・ネットワーク社会の発達により、各家庭や職場において、多くの情報や物品の入手が容易になったため、過去とは異なる水準で個人ニーズの実現が求められている。生産側にとっては、多様な個人ニーズに対応した製品開発が必要であり、工場での生産においても、大量汎用品生産から少量多品種生産への移行が進んでいる。

このような背景のもと、生産現場における、多様化への対応と、今まで以上に高効率な生産性向上の実現が求められている。

それぞれの現場においては、1900年以降、生産性向上の取り組みが継続実施されているところも多く、ある程度までは有効性も実証されている。しかし、現状市場に存在する可視化技術だけでは限界があり、近年の多品種生産への対応やさらなる生産性向上にむけては、有効な抽出ができているとはいえない。

本章では、上記社会問題を解決する「高効率生産性向上システム」の実現を目的とし、あらゆる環境下で高精度にロバストなデータを取得可能なイメージセンサを活用したセンシングシステムを開発、また、本システムを活用し、生産性向上を目指すための統合的組織を新規に立ち上げ、高効率な生産性向

上を実現するための提案を行う。

本研究の価値(バリュー)は、短期的に、現場課題の可視化とその改善により生産性の向上を図ること。中長期的に、今まで数値化・データ化できなかった高度作業の可視化に基づき、個々の作業の高度化、目標の高度化を図ること。またその結果、生産性向上のゴールを高めること。さらに、複数事象の相関関係を明確にすることで潜在課題を明確化し、現場の働き方に変革を起こすことである。

最後に第 5 章では、本研究のまとめを行い、今後の展望について述べる。

図 1-16 に、イメージセンサの高性能化と上記第 1 章から第 4 章の各章の構成の関係を示す。

本図に示すように、人が介入せず、機械が判断を行う、完全自動自律制御センシングのためには、周辺環境・状態変化時にも高精度で高ロバストなセンシングを実現し続けることが可能なシステムを構築することが必須となる。そこで、第 1 章では、現在および今後の市場で求められる性能と、特にその中で、イメージセンサ技術への要望について述べる。次に、第 2 章では、イメージセンサの様々な性能の中でも、特に高ロバストなセンシングに貢献する、高速撮像機能(グローバルシャッター機能)と広ダイナミックレンジ性能に注目した技術開発について述べる。その後、第 3 章では、高精度イメージセンサを用いて取得した情報の伝送を行う場合に、センシング機器間、現場間で、ノイズ影響を受けない信頼性の高い高速大容量データ通信を可能とする光通信用トランシーバ技術について述べる。最後に、第 4 章で、第 2 章、第 3 章の技術を活用した「高効率生産性向上システム」の事業提案とその妥当性・成長性の検討結果を示す。

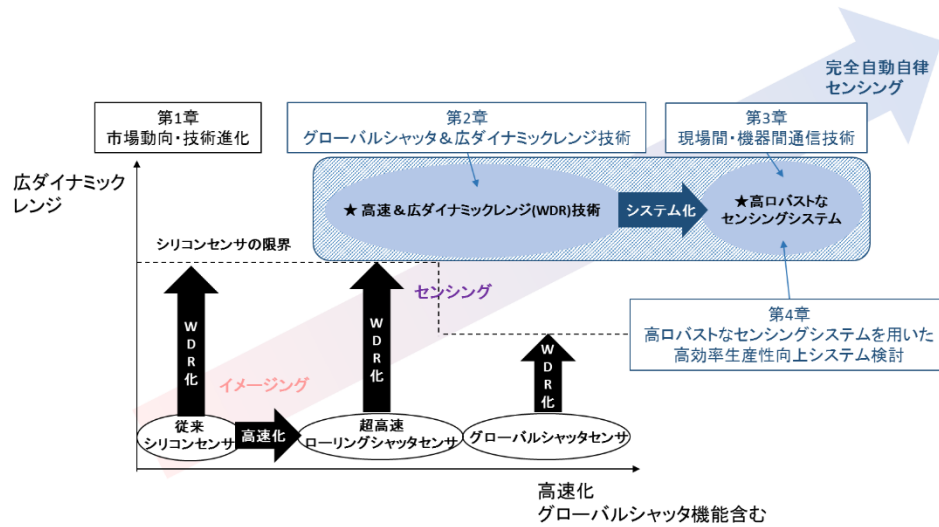


図1-16 イメージセンサの高性能化と本論文の構成

また、図 1-17 に、高精度・高ロバストなイメージセンサで構築したセンシングシステムを用いて行う高効率生産性向上システムと第 2 章から第 4 章の各章の関係イメージ図を示す。第 2 章では、高精度・高ロバストなセンシングを可能とするために、高速撮像機能(グローバルシャッター機能)と広ダイナミックレンジ性能を伸長するイメージセンサ技術開発について、第 3 章では、取得した大容量の情報を高速に、ノイズ耐性高く伝送可能な光通信用トランシーバ技術開発について、そして第 4 章では、これらの第 2 章、第 3 章の技術を活用した「高効率生産性向上システム」事業提案と、本事業の妥当性・成長性の検討結果を示す。

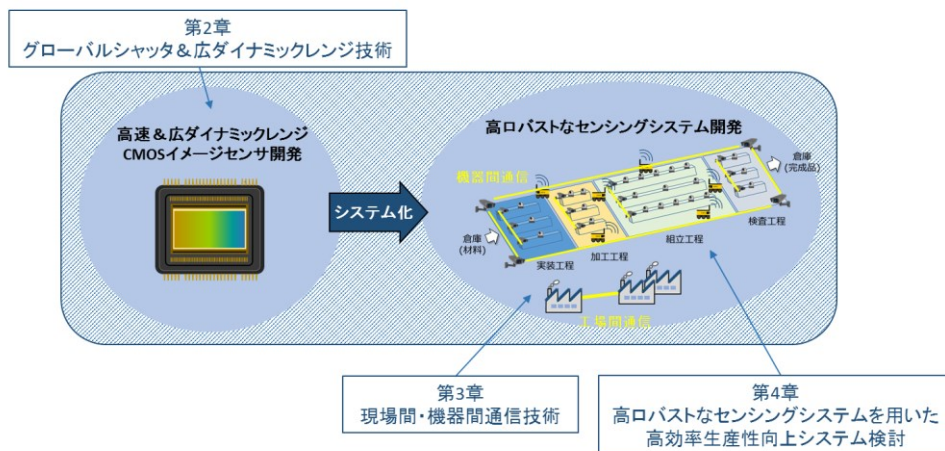


図1-17 高ロバストなセンシングシステムを用いた高効率生産性向上事業と本論文の構成

第2章

有機 CMOS イメージセンサ回路技術

2.1 はじめに

近年、イメージセンサは、車載、監視、ロボットビジョン、放送、医療など様々なアプリケーションのキーデバイスとなっている。各々の環境において高精度なイメージングおよびセンシング性能を実現するために、広ダイナミックレンジ、高感度、高フレームレートなどに対する要望が高まっている。また、逆光時にも確実に撮像可能であること、LED 照明や LED サイネージに対してもフリッカが発生しないことなど、正確でロバスト性の高いイメージングおよびセンシング技術への需要が急増している。

また、高解像度、高フレームレート、低消費電力に加え、後段 LSI と同時搭載することで高機能処理が可能になるなどの性能的優位性から、CMOS イメージセンサが、CCD イメージセンサに代わるイメージングおよびセンシングデバイスの主流となっている。ただし、一般的な CMOS イメージセンサの動作では、すべての画素のシャッタと露光が同時に行われるのではなく、行毎にシャッタと露光が順次実行されるローリングシャッタ操作が実施されるため、高速動体撮像時には動体歪みが生じてしまうという課題が発生する。近年の産業検査の高速化、自動車・ドローンなどの動体自動自律制御への要望の高まりに応じ、動体の撮像、および、動体からの撮像時には、CCD イメージセンサのように、すべての画素のシャッタ、露光操作が同時に行われることで動体歪みの起きない、グローバルシャッタ動作への要望が高まっている。しかし、従来の一般的な CMOS イメージセンサで、グローバルシャッタ動作を実現しようとする、画素内に、同時撮像をした電荷をデータ読み出しまで一時的に蓄積するためのメモリと、メモリへ電荷転送を行うための転送回路を追加する必要が生じる。この場合、電荷蓄積領域と追加したメモリ領域間で面積の取り合いが発生し、感度と飽和信号が共に低下してしまうという問題が発生してしまう。

この問題の解決に、光電変換のために有機薄膜を用いた「有機 CMOS イメー

ジセンサ」が最適な候補の1つとなる。「有機 CMOS イメージセンサ」とは、従来のシリコン CMOS イメージセンサとは画素のデバイス構造が異なり、光電変換のための有機薄膜と、信号電荷蓄積と信号読み出し用の回路を設けるシリコン基板部が完全に独立、積層構造となったイメージセンサである。本センサでは、2つの部分を各々独立に最適設計することが可能なため、センサ性能を従来のシリコン CMOS イメージセンサよりも大幅に向上させることができる。本論文では、「有機 CMOS イメージセンサ」の独自特長技術の中で、特に2つの性能に焦点を当てる。1点目は、一回の撮像で 120 dB を超える広ダイナミックレンジ性能を実現する技術、2点目は、画素面積や飽和電子数など、その他のセンサ特性を犠牲にすることなく、シリコン CMOS イメージセンサよりも 10 dB 高い単位面積あたりの高飽和特性を実現した状態で、グローバルシャッタ機能を実現する技術である。「有機 CMOS イメージセンサ」のこれらの技術は、イメージングおよびセンシング分野の性能の飛躍と共に、センシングシステムとして、市場の新価値創造に貢献すると考える。

2.2 有機 CMOS イメージセンサ画素構造

図 2-1 に、一般的な裏面照射型シリコン CMOS イメージセンサ (BSI CMOS Image Sensor: Back-side Illumination CMOS Image Sensor) と新しく開発した有機 CMOS イメージセンサ (OPF CMOS Image Sensor: Organic Photoconductive Film CMOS Image Sensor) の画素構造を比較して示す [1-3]。

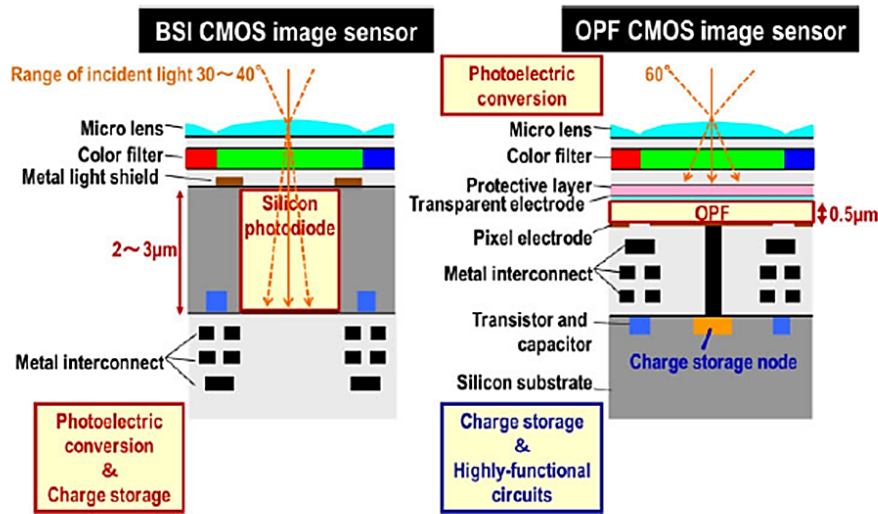


図2-1. 画素断面構造

© 2018 The Japan Society of Applied Physics (発表論文[1])

有機 CMOS イメージセンサの画素構造は、一般的なシリコン CMOS イメージセンサの画素構造とは全くデバイス構造が異なる。シリコン CMOS イメージセンサでは、光電変換と電荷蓄積の両方の機能がシリコンフォトダイオードによって実行される。これは、感度と飽和容量がシリコンフォトダイオードの大きさと量子効率によって制限されることを意味する。

一方、有機 CMOS イメージセンサでは、入射光はオンチップマイクロレンズとカラーフィルタを通して、有機薄膜に吸収され、有機薄膜に印加された電界強度に応じて光電変換された電荷が、画素電極側に抽出され、信号電荷としてシリコン基板上に形成されたフローティングディフュージョン (FD) 部に蓄積される。つまり、光電変換部分は有機薄膜で、電荷蓄積部分は FD 部の電荷蓄積容量であり、これらの 2 つの構造は完全に独立している。そのため、シリコン基板上の回路領域に大きな電荷蓄積容量などの高機能回路を用意すれば、光電変換部とは独立に、より高い飽和電子数を実現できる。

また、有機薄膜の光電変換特性は、図 2-2 に示すように有機薄膜の上部にある透明電極 (ITO: Indium Tin Oxide) に印加される電圧 V_{ITO} によって制御できる。

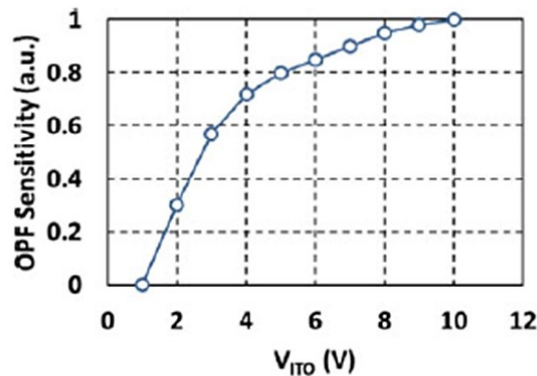


図2-2. 有機薄膜(OPF)の光電変換特性

© 2018 The Japan Society of Applied Physics (発表論文[1])

さらに、光電変換を行う有機薄膜に最適な構造と材料を選択することができる。たとえば、参考文献[4]に示されているように、RGB3色の有機薄膜を垂直方向に積み重ね、それぞれの色の波長が異なる特性を利用して3つの色情報を取得する方法がある。この方法では、従来比3倍の解像度を実現できる。しかし、この方法の実現には、色毎の有機薄膜の間に遮断層が必要であり、また複雑な製造プロセスが必要となる。また、G光またはR光の一部がB光フォトダイオードに吸収されるため、色再現性や光透過率を維持することが困難という課題も発生する。そのため今回は、図2-1の右図に示すように、1つの有機薄膜を使用し、RGB3色をバイヤーパターンのカラーフィルタで分離するという、色再現性のよい構成を選択した。

ここで、有機薄膜は、シリコンフォトダイオードのように組成が固定された材料ではない。たとえば、現在の有機薄膜の光吸収率はシリコンフォトダイオードの10倍であり、そのため、厚さ0.5 μm 程度の非常に薄い光電変換膜を使用することができる。有機CMOSイメージセンサでは、この浅いエリアで光電変換が完了するため、斜め入射光(浅い角度での入射光)に対しても、隣の画素への光の漏れ込が発生しない。そのため高い耐クロストーク性能(色分離性能)と 60° ($\pm 30^\circ$)を超える広い入射光範囲を実現可能とする。さらに、シリコンCMOSイメージセンサでは、シリコンフォトダイオードの物性によって各波長における感度が決定されていまいが、有機CMOSイメージセンサでは、所望の特定波長の感度を大幅に向上した材料を開発し、有機薄膜に適応させることで、所望の特定波長における高精度なセンシングを可能とする[5]。

そこで、このユニークな積層型画素構造と、電圧制御可能な有機薄膜の光電変換特性に焦点を当てた技術を開発した。

2.3 広ダイナミックレンジ技術

センシングのロバスト性を高めるための新しいダイナミックレンジ拡張技術について説明を行う。

これまで、ダイナミックレンジを拡大するためにいくつかの方法が提案されてきた[6-16]。参考文献[6]に示されるような複数の露光時間の画像を用いてダイナミックレンジを拡大する手法や、参考文献[7, 8]に示されるような横型オーバーフロー蓄積容量を用いてダイナミックレンジを拡大する手法があった。これらの技術では、複数の画像を合成することにより、それぞれ 140 dB、104 dB、207 dB のダイナミックレンジを実現した。しかしこれらの方法では、高速イメージングにおいて、異なる撮像時間を合成することにより起因する画像ぶれの問題があり、それらの一回撮像時のダイナミックレンジは最大 100 dB に留まっていた。図 2-3 に、ダイナミックレンジが不十分だった場合の、逆光時の運転シーンを示す。逆光を受け輝度が非常に高くなっている部分は、画像としては白飛びし、データとしては飽和電子数を超え一定の値に張り付き、活用できるデータが取得できていないという課題が発生している。



図2-3. 不十分なダイナミックレンジでの撮像特性

広ダイナミックレンジを実現する他の方法として、高感度と低感度の2つのシリコンフォトダイオードを設ける構造が提案されている[17]。従来のシリコン CMOS イメージセンサにおいても2つの感度を実現可能であるが、高感度フォトダイオードの蓄積容量は大きく、低感度フォトダイオードの蓄積容量は小さく設計されるため、高輝度の光を受け取ることは可能となるが、飽和特性は蓄積容量のサイズによって制限されてしまう。

図2-4は、複数の材料におけるダイナミックレンジをまとめたものである。一般的なシリコン CMOS イメージセンサのダイナミックレンジは70 dBから75 dBである。一方、人間の目のダイナミックレンジは100 dB、脳での計算を含めて110 dBと言われている。したがって、シリコン CMOS イメージセンサのダイナミックレンジは人間の眼の能力をはるかに下回っている。そこで、有機 CMOS イメージセンサの構造的長を活かした新しい画素構造を提案し、上記問題を克服、人間の眼の能力を超えたダイナミックレンジの実現を目標とする。ここでは、1回撮像でのダイナミックレンジ特性の目標を120 dB以上に設定した。

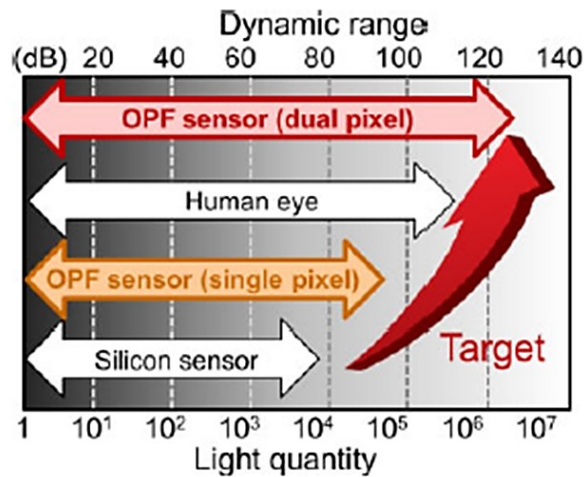


図2-4. 有機CMOSイメージセンサの広ダイナミックレンジターゲット

© 2018 The Japan Society of Applied Physics (発表論文[1])

図2-5に、今回提案したダイナミックレンジ拡張技術「1画素2セル画素(DS-Pixel: Dual Sensitivity Pixel)」の断面画像を示す。

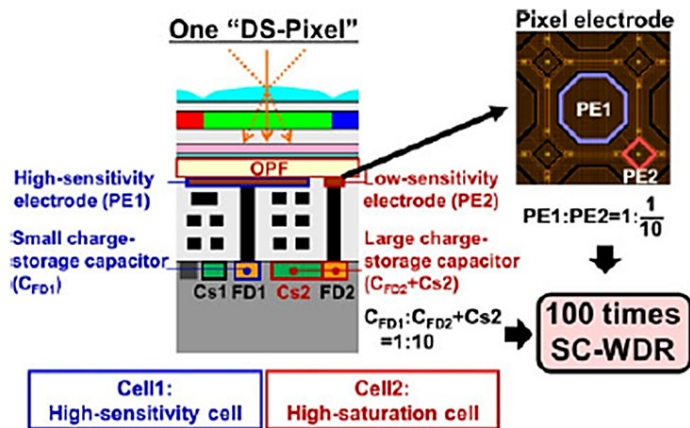


図2-5. 有機CMOSイメージセンサ 1画素2セル画素 (DS-Pixel) 断面構造

© 2018 The Japan Society of Applied Physics (発表論文[1])

1画素2セル画素 (DS-Pixel) では、感度と飽和を独立に設定できる有機CMOSイメージセンサ特有の構造を活用している[3]。1つの画素の中に2つのセルを設け、2つのセル用に2つの光電変換部、2つの電荷蓄積部、および2タイプのノイズキャンセル回路を用意する。2つのセルは、セル1:高感度セルとセル2:高飽和セルで構成される。

セル1:高感度セルでは、暗い環境、暗い物体を対象として撮像するため、高感度性能と低ノイズ性能が重要となる。一方、検出する電荷は多くないため、高い飽和特性は必要ない。したがって、セル1には、高感度に光を検出できるように大きな画素電極PE1と、高変換ゲイン用の小さな電荷蓄積容量、および、低ノイズ特性実現のための新構造のノイズキャンセル回路を設ける。新しいノイズキャンセル回路は4つのトランジスタと2つの容量で構成される。

セル2:高飽和セルでは、超高輝度物体を撮像するために高い飽和特性を必要とする。一方、画素のリセットノイズは光ショットノイズに埋もれるため、高精度なノイズキャンセル機能は必要ない。これらの要件に基づいて、セル2には、高輝度光を低感度に検出できるように小さな画素電極PE2、多くの電荷を蓄積可能な大きな電荷蓄積容量、およびノイズ仕様が緩和された従来相当のノイズキャンセル回路を設ける。従来相当のノイズキャンセル回路は3つのトランジスタで構成される。この構造では、容量はノイズキャンセルには使用せず、電荷蓄積にのみ使用、最適な面積効率を実現する。

また、一例として、セル1とセル2の電荷蓄積容量比を約1:10に、PE1と

PE2 の感度比(画素電極面積比)を約 1:1/10 に設定することで、この 1 画素 2 セル 画素(DS-Pixel)では、セル 1 単体の 100 倍の一回撮像でのダイナミックレンジを実現できる。

次に、図 2-6 に、画素内に Metal-Insulator-Metal (MIM) 容量を使用した場合の 1 画素 2 セル 画素(DS-Pixel)の断面画像を示す。

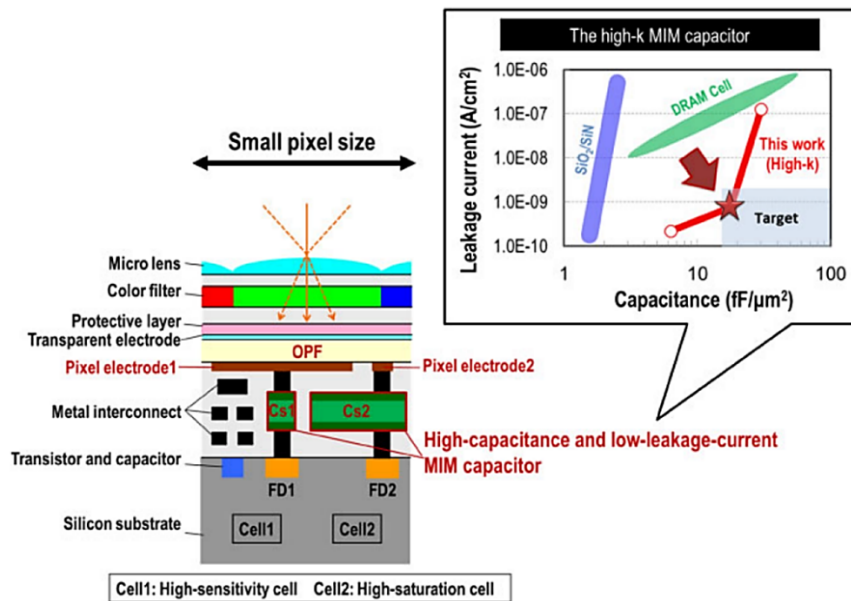


図2-6. 有機CMOSイメージセンサ MIM搭載 1画素2セル画素(DS-Pixel)断面構造

© 2018 The Japan Society of Applied Physics (発表論文[1])

ここでは、低リーク電流を実現するため High-k 材料を用いた MIM 容量を開発、シリコン基板上の容量の代わりに BEOL (Back End of Line) 層に配置した画素内容量を提案する。BEOL 層に容量を実装することで、画素設計の自由度が向上する。また、MIM の構造は目的に応じて変更可能である。たとえば、高容量と低リークの両方を実現するために、各画素の BEOL 層にトレンチを配置した 3D 構造の MIM 容量を用意することも可能である。一例として 3D 構造の MIM 容量は TiN / HfO₂ / TiN 積層で構成され、厚い誘電体膜を使用できるという特長を実現できる[18]。このように、有機 CMOS イメージセンサでは、高性能デバイスを有機薄膜と回路領域の間に積層できる構造的長を活かし、MIM 容量をノイズキャンセル用容量 Cs1 および電荷蓄積容量 Cs2 として積層化可能とする。ここで、シリコン基板上の容量の代わりに MIM 容量を使用した場合、3 μm の画素サイズが実現可能となる。これは、画素サイズをシリコ

ン基板上の容量使用時の4分の1に縮小、または、解像度を4倍にできることを意味する。従来のシリコン CMOS イメージセンサで同様の画素サイズ的设计を行った場合には、シリコンフォトダイオードの面積を減少させ、感度と飽和電荷を犠牲にする必要があるため、本特性の実現は有機 CMOS イメージセンサのみとなる。

図 2-7 に、シリコン CMOS イメージセンサと有機 CMOS イメージセンサの性能比較を示す。X 軸は感度、Y 軸は飽和容量を示す。シリコン CMOS イメージセンサでは、灰色の矢印線上の 1 点となり、シリコンフォトダイオードのサイズに応じて感度と飽和容量が決定される特性となる。したがって、感度を低く設定したい場合は、飽和容量も小さくなってしまふ。一方、有機 CMOS イメージセンサでは、感度を低く、飽和容量を大きく設定することが可能となり、大きなメリットを有する。また、1 画素 2 セル 画素(DS-Pixel)では、2 つのセルの高い性能を同時に組み合わせることが可能となる。したがって、有機 CMOS イメージセンサでは、ダイナミックレンジを大幅に拡張することが可能となる。

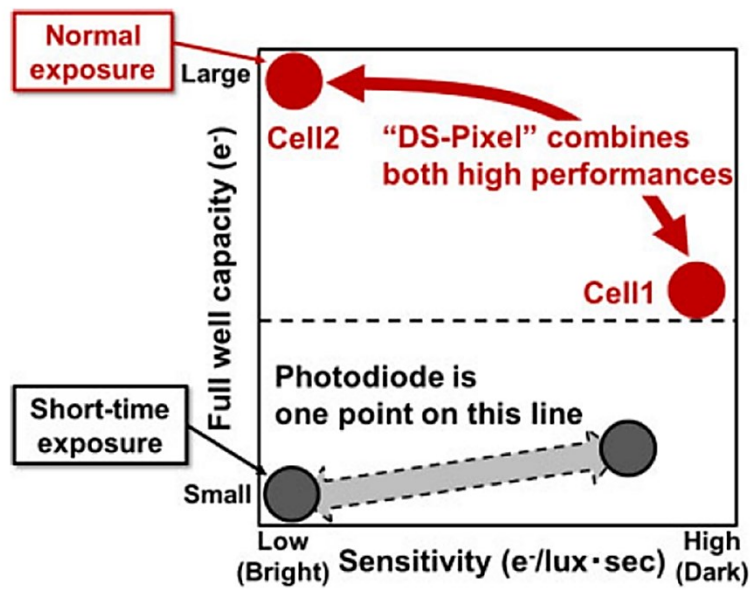


図2-7.有機CMOSイメージセンサ 1画素2セル構造(DS-Pixel) 感度と飽和特性

2.4 ノイズキャンセル技術

2.4.1 容量結合型ノイズキャンセル回路

(CCNC: Capacitive-Coupled Noise Canceller)

次に、暗い物体を撮像する際にもクリアな画質で正確な撮像を可能とするために、新しく開発したリセットノイズキャンセル回路について説明を行う。

まず、リセットノイズについて説明する。画素のリセットトランジスタをオフにすると、リセットノイズが発生する。従来のシリコン CMOS イメージセンサの場合、埋め込みフォトダイオード構造による完全な電荷転送により、相関二重サンプリング(CDS:Correlated Double Sampling)手法を使用できるため、リセットノイズはキャンセルされ課題とならなかった。一方、有機 CMOS イメージセンサではシリコンフォトダイオードではなく、FD ノードに信号電荷を蓄積するため、CDS 手法は使用できず、FD ノードにリセットノイズの残留電荷が残ってしまう。リセットノイズの残留電荷は、特に暗い状況で物体を検出する場合に根本的な課題となる。そこで、今までにも、リセットノイズを抑制するためにいくつかの手法が提案されてきた。一例として、参考文献[2]に示すように、3つのトランジスタとフィードバック増幅器を用いた負帰還手法が提案された。フィードバック増幅器の利得を $-A$ に設定すると、(1)に示すように、利得 A の二乗根に反比例してリセットノイズ N を抑えることができる。

$$N \propto 1 / \sqrt{A} \quad (1)$$

ただし、 A は数十または数百にしか設定できないため、効果は限定的となる。そこで、リセットノイズを十分に抑制できる新しいノイズキャンセル回路を開発した。

図2-8に、各画素に4つのトランジスタと2つの容量(SF:増幅トランジスタ、SEL:選択トランジスタ、RST:リセットトランジスタ、FB:フィードバックトランジスタ、 C_s :安定化容量、 C_c :結合容量)、各列にフィードバック増幅器を設けた新しいノイズキャンセル回路「CCNC」の構成を示す。 C_c による容量結合構造は、リセットノイズの抑制とロバストな動作に非常に効果的となる[3]。

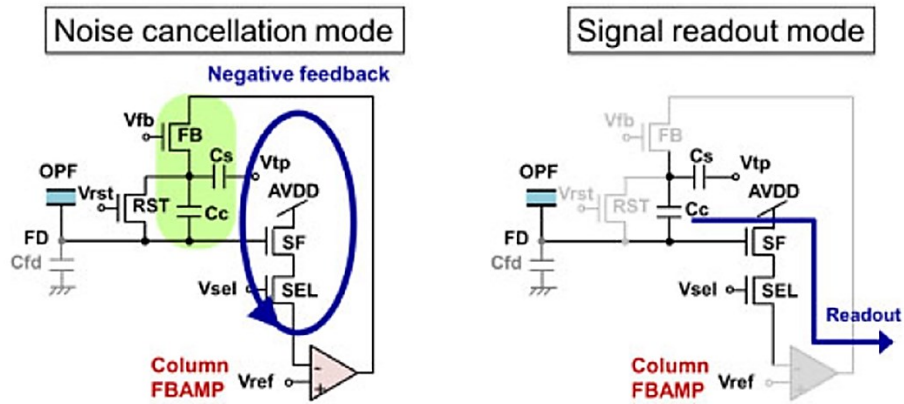


図2-8. 容量結合型ノイズキャンセル回路(CCNC)構成

© 2018 The Japan Society of Applied Physics (発表論文[1])

ここで、ノイズキャンセルの手順を説明する。まず、RST と FB を同時にオンにし、FD ノードをリセット電圧に設定する。次に、RST と FB を順次オフにする。この時、2つのトランジスタ RST、FB で発生したリセットノイズは、FB に供給されるゲート電圧 V_{FB} により帯域制御された状態で、負帰還ループをかけ、抑制を行う。負帰還ループの利得を $-A$ に設定すると、RST と FB のリセットノイズ N_{RST} 、 N_{FB} は、それぞれ(2)と(3)に示すように抑制できる。また、総ノイズ N は式(4)で表される。

$$N_{RST} \propto 1 / (A \times C_c / C_{fd}) \quad (2)$$

$$N_{FB} \propto 1 / \sqrt{A \times C_s / C_c} \quad (3)$$

$$N = \sqrt{N_{RST}^2 + N_{FB}^2} \quad (4)$$

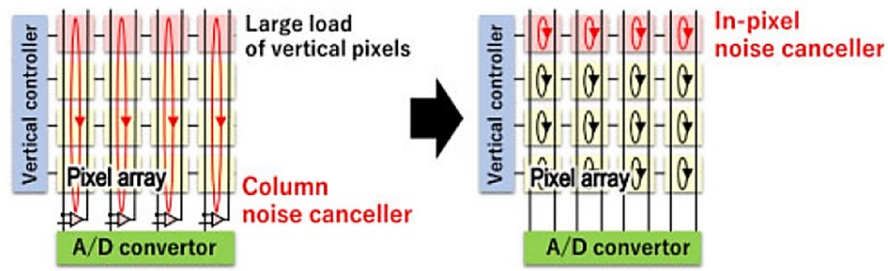
評価の結果、RST と FB で発生したリセットノイズ $25 e^-$ は、ノイズキャンセル時間 $5.0 \mu s$ で、 $1.6 e^-$ まで抑制された。これは、生成されたリセットノイズの $1/15$ であり、イメージングおよびセンシングアプリケーションに十分な値となっている。

2.4.2 画素内容量結合型ノイズキャンセル回路

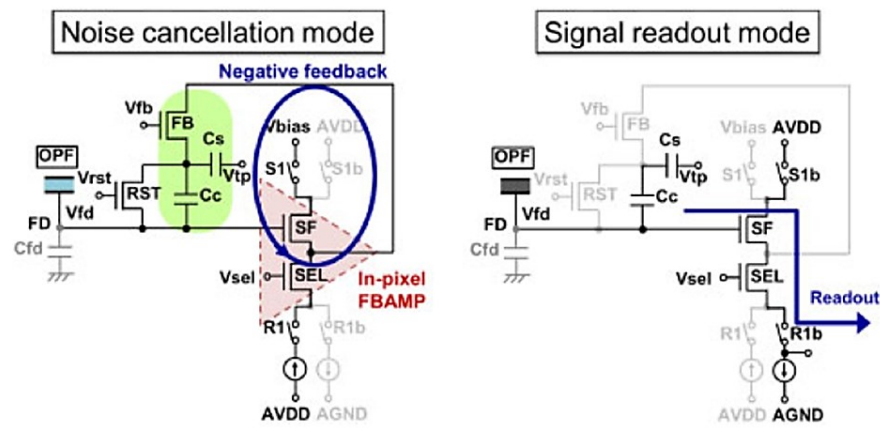
(IP-CCNC: In-Pixel Capacitive-Coupled Noise Canceller)

次に異なるタイプのノイズキャンセル回路について説明する。従来の方法または2.4.1項で説明されている方法では、フィードバック増幅器が各列または各エリアに割り当てられた状態で、リセットノイズの抑制が実施されている[2, 3, 19]。しかし、画素数の多い高解像度センサでは、垂直信号線の負荷が大きく、時定数が大きくなるため、抑制時間が長くなる。たとえば、4Kまたは8Kセンサの垂直信号線は、フルハイビジョン(FHD)センサの垂直信号線のそれぞれ2倍または4倍長くなる。そこで、高解像度センサでもノイズキャンセル時間を短縮するために、新しい画素内ノイズキャンセル回路を開発した。

図2-9に、各画素に4個のトランジスタと2個の容量(SF:アンプトランジスタ、SEL:セレクトトランジスタ、RST:リセットトランジスタ、FB:フィードバックトランジスタ、Cs:安定化容量、Cc:結合容量)、各列に4つのスイッチ(S1、S1b、R1、R1b)、2つの電圧(AVDD、Vbias)、および2つの電流源で構成される新しい画素内ノイズキャンセル回路「IP-CCNC」のコンセプトと構成を示す[20]。



(a)



(b)

図2-9. 画素内容量結合型ノイズキャンセル回路(IP-CCNC)構成

© 2018 The Japan Society of Applied Physics (発表論文[1])

高速ノイズキャンセル実施に対し、画素数増加による時定数の影響を受けないように、フィードバック増幅器を、各列ではなく各画素に配置した。

また、3 μm の画素サイズのまま、高解像度センサの高速読み出しと高速ノイズキャンセルを共に実現するためには、さらに新しい回路工夫が必要となる。そこで、新たにノイズキャンセル用のフィードバック増幅器と信号読み出し用のソースフォロワ増幅器の2つの動作モードを同一の画素トランジスタで実現できる回路構成を開発した。ノイズキャンセル期間中、画素内SFと列電流源は、S1とR1をオン状態に、S1bとR1bをオフ状態に設定することにより、画素内のソース接地反転増幅器(=フィードバック増幅器)を構成する。これにより、各画素のノイズキャンセルが実現できる。動作としては、まず、RSTとFBを同時にオンにすることにより、FDノードをリセット電圧に設定する。次に、RSTとFBが順番にオフになる。この間、RSTとFBによるリセットノイズは負帰還ループで抑制される。負帰還ループの利得を

-A に設定すると、「CCNC」同様、RST と FB のリセットノイズを抑えることができる。この場合、画素内フィードバック増幅器の利得は列フィードバック増幅器の利得よりも小さくなってしまふ。この利得を上げるために、高容量で低リーク電流の MIM 容量を開発し、 C_s 値を高く設定した。これにより、RST と FB で発生したリセットノイズ $23 e^-$ は、リセットノイズキャンセル時間 $2.5 \mu s$ で、 $2.5 e^-$ まで抑制された。その後、信号読み出し期間中、画素内 SF および列電流源は、S1 および R1 をオフ状態に設定し、S1b および R1b をオン状態に設定することにより、ソースフォロワ増幅器を構成、FD ノードからの信号読み出し動作が実現される。

さらに、この画素回路では、もう 1 つのモードを実現できる。入射光量が少ない場合はノイズキャンセルモードで動作するが、入射光量が多い場合には、 C_s 容量を FD ノードに接続することで FD ノードの容量を大きくし、多くの電荷を蓄積可能な高飽和モードとして動作可能にできる。RST のゲート電圧をオン状態に固定することで、例えばノイズキャンセルモードの 10 倍の $450 ke^-$ の飽和信号が達成される。この単位面積あたりの飽和信号は、従来のグローバルシャッタ機能と高飽和構造を備えたシリコン CMOS イメージセンサよりも 10 dB 高い[21]。

本構成では、いくつかの電流源の準備は必要となるが、列毎にフィードバック増幅器を準備する必要がないため、小面積、低消費電力に構成できるといふ大きな利点をもつ。

「CCNC」と「IP-CCNC」は、各アプリケーションの要件に応じて選択して使用できる。よりロバストな動作が必要な場合は、列毎のフィードバック増幅器を使用して外部から基準値を設定できる「CCNC」を選択するとよい。高解像度、高フレームレート、小面積、低消費電力が必要な場合は、画素毎にフィード増幅器を設ける「IP-CCNC」を選択するとよい。

2.5 グローバルシャッタ技術

2.5 節では、有機薄膜の光電変換特性を使用した独自のグローバルシャッタ機能について説明する。グローバルシャッタ機能は、ローリングシャッタで高速物体を撮像した時の動体歪みやフラッシュ照射時の横帯(フラッシュバンド)によって引き起こされるイメージングの問題を解決するだけでなく、高速のインライン検査や V-SLAM (Visual-Simultaneous Localization And Mapping) による正確な 3D 地図生成などセンシングアプリケーションで

使用するための強力なテクノロジドライバとなる[22-25, 27-29]。ただし、グローバルシャッタ機能を備えた従来のシリコン CMOS イメージセンサでは、リセットノイズを抑制するために主に 2 段転送画素構造が用いられ、本構造実現のためには、2 つの蓄積ノードと転送トランジスタを設ける必要がある[23-25]。そのため、グローバルシャッタ画素では、画素サイズの縮小と飽和信号の拡大を同時に行うことが困難という課題があった。

一方、有機 CMOS イメージセンサの場合、グローバルシャッタ機能は有機薄膜に印加する電圧の変調のみで実現できる[30, 31]。したがって、追加の構成要素は必要なく、感度、画素サイズ、飽和特性などのセンサ特性を犠牲にすることができない。さらに、信号電荷は有機薄膜から分離した FD ノードに蓄積されるため、広い蓄積領域を設けることが可能となり、小さな画素サイズと高い飽和電子数の両立が可能となる[1, 2]。

ここで、グローバルシャッタ機能を実現するための有機 CMOS イメージセンサ画素の断面構造を図 2-10 に示す。

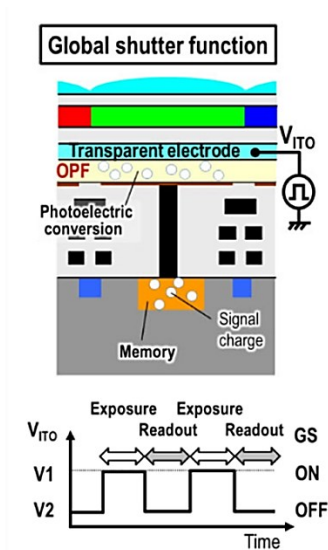


図2-10. 有機CMOSイメージセンサ画素断面構造とグローバルシャッタ機能のための電圧印加

© 2018 The Japan Society of Applied Physics (発表論文[1])

有機薄膜の光電変換効率は、透明電極(ITO電極)に印加される電圧 V_{ITO} を変調することによって制御可能であるため、光電変換特性制御型グローバルシャッタが実現できる。 V_{ITO} 電圧が高い場合は、シャッタが開いた状態と同等であり、光学的に生成された電子と正孔は電界によって分離され、正孔は

画素電極によって収集される。 V_{IT0} 電圧が低い場合、シャッタが閉じた状態と同等であり、光学的に生成された電子と正孔が再結合し、すぐに消滅する。光電変換特性制御型グローバルシャッタの動作中、信号電荷は FD ノードに格納されたままになるため、画素に追加のメモリや転送回路を追加する必要はない。

さらに、有機 CMOS イメージセンサの構造は、グローバルシャッタ特性においてもひとつ大きな利点をもつ。光電変換領域とメモリ領域が同じ平面に配置されておらず、垂直配置のデバイス構造となっており、また、非常に高い再結合速度を有するため、寄生光感度 (PLS:Parasitic Light Sensitivity) が -100 dB 以下の良好な値を実現できる。

2.6 8K4K センサ技術

2.2 節から 2.5 節で述べた有機 CMOS イメージセンサの構造および特長を活かすことにより、3 μm 画素サイズ、8K4K 解像度、60 fps フレームレート、450 ke⁻飽和信号を備えた、ローリングシャッタモードとグローバルシャッタモードを切り替え可能な CMOS イメージセンサの開発を行った。

近年、放送、広域監視、産業検査など、各種カメラシステムで使用する高解像度、高精細な画像への需要が高まっている。このような市場要望に対し、従来、8K 超高精細テレビ (UHDTV) システムの研究開発の推進と、8K フル解像度カメラ [26] や、高速化のためにチップ積層構造タイプのイメージセンサを搭載した 8K 解像度 240 fps カメラ [32] の開発が報告されている。これらのカメラシステムでは、ローリングシャッタ方式が採用されているため、高速イメージングや多視点イメージングに用いた場合には、シャッタ歪みの問題が発生してしまう。一方、グローバルシャッタ方式を実現しようとする 2.5 節で述べたように、光電変換領域と電荷蓄積領域の間に面積のトレードオフが生じてしまう [21, 33, 34]。

本技術検討においては、上記課題を解決したうえで、8K4K の解像度で 60 fps、広ダイナミックレンジの撮像を達成するために、1) 高解像度画素構造での高速ノイズキャンセルの実現、2) 長い垂直信号線での高速読み出しの実現、3) 高飽和モードの実現、の 3 つの取り組みを行った。

1) 高解像度画素構造での高速ノイズキャンセル

垂直信号線の時定数が大きいため、ノイズキャンセル時間が長くなる。そのため、2.4.2項で説明した画素内容量結合型ノイズキャンセル回路(IP-CCNC)を活用、さらに、有機CMOSイメージセンサの積層構造の利点を活用するため、高容量低リークのMIM容量を開発、有機薄膜とシリコン基板間に用意した。

2) 長い垂直信号線での高速読み出し

有機CMOSイメージセンサでは、上層に光電変換膜が存在するため、垂直信号線数を増やしても光電変換特性に影響がない。そのため、各画素に2対の4重垂直信号線が用意、並列読み出しをすることで高速読み出しを可能とした。

3) 高飽和モード

RSTのゲート電圧をオン状態に固定することによって、FD容量を増加させ、画素サイズを大きくすることなく、飽和容量を10倍とする高飽和モードを実現した。

2.7 評価結果

2.7節では、「1画素2セル画素(DS-Pixel)」広ダイナミックレンジ有機CMOSイメージセンサと8K4K高解像度有機CMOSイメージセンサの評価結果を報告する。またこれら2つのセンサは、ともにグローバルシャッタ機能を実現可能である。

広ダイナミックレンジセンサのチップ写真を図2-11に示す。

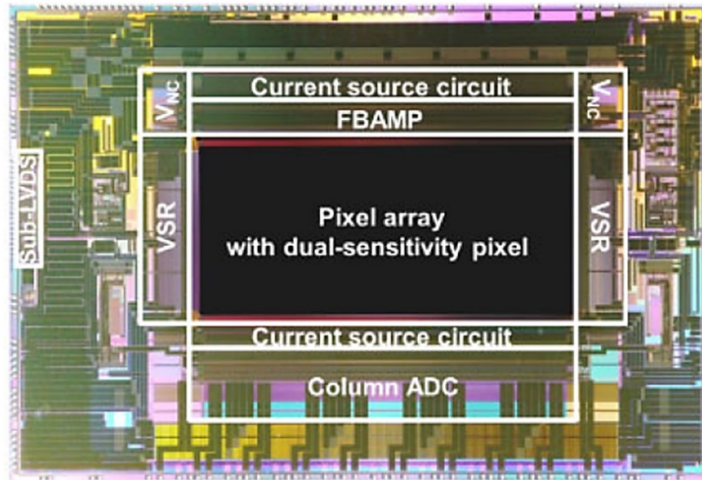


図2-11.広ダイナミックレンジを実現する有機CMOSイメージセンサチップ写真

© 2018 The Japan Society of Applied Physics (発表論文[1])

本センサは、65 nm 1P3Cu 1A1 CMOS プロセスを使用し、6 μm の画素サイズ、970(H) \times 550(V)の有効画素数で設計した。また、1.404 Gbps sub-LVDS インターフェースを使用して 60 fps のデジタル読み出しを実現している。供給電圧は、アナログ電圧 3.3 V、デジタル電圧 1.2 V である。

図 2-12 に「1 画素 2 セル 画素 (DS-Pixel)」の光電変換特性を示す。

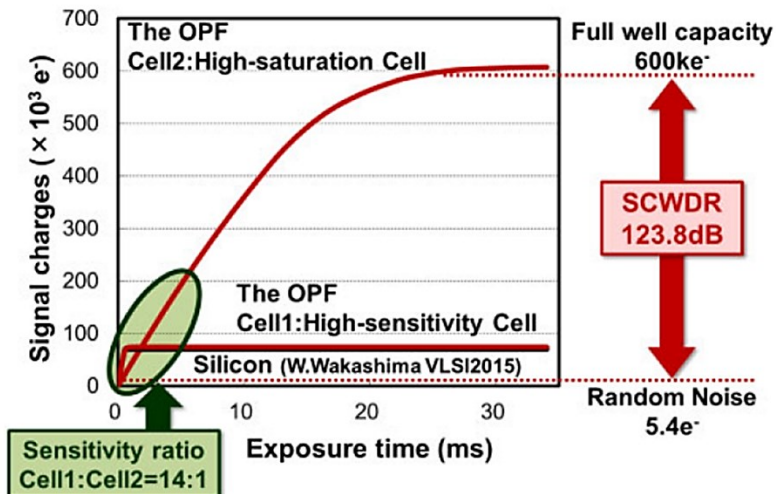


図2-12.広ダイナミックレンジを実現する有機CMOSイメージセンサの光電変換特性

© 2018 The Japan Society of Applied Physics (発表論文[1])

高飽和モードの飽和電子数は 600 ke^- で、高感度モードの 100 倍を実現している。本センサのランダムノイズは 5.4 e^- 。2つのセル間の感度比は 14:1 で、123.8 dB の一回撮像での広ダイナミックレンジが達成された。

図 2-13 に「1 画素 2 セル 画素 (DS-Pixel)」の信号対雑音比 (S/N: Signal/Noise) 特性の計算結果を示す。

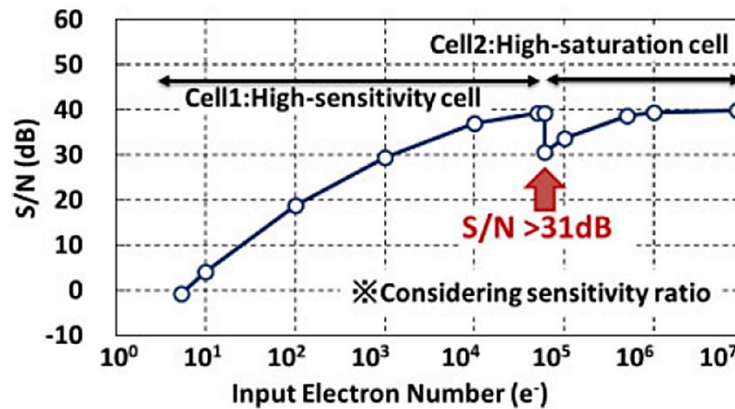


図2-13.広ダイナミックレンジを実現する有機CMOSイメージセンサのS/N特性

© 2018 The Japan Society of Applied Physics (発表論文[1])

左側は高感度セルの特性を示す。 E_{signal} は信号電荷数、 E_{noise} はノイズ電荷数であり、回路ノイズ $E_{\text{circuit-noise}}$ 、光ショットノイズ $E_{\text{shot-noise}}$ 、光応答不均一性 (PRNU: Photo Response Non-Uniformity) E_{PRNU} を考慮する。また、トータルノイズはこれらの二乗平均であり、式(5)で表される。S/Nは式(6)で表される。

$$E_{\text{noise}} = \sqrt{E_{\text{circuit-noise}}^2 + E_{\text{shot-noise}}^2 + E_{\text{PRNU}}^2} \quad (5)$$

$$S / N_{\text{高感度}} = 20 \times \log (E_{\text{signal}} / E_{\text{noise}}) \quad (6)$$

右側は高飽和セルの特性を示す。2つのセルの感度比は 14:1 となっている。したがって、この比率を考慮すると、高飽和セルの特性は 14 倍に増加する。S/N は式(7)で表される。

$$S / N_{\text{高飽和}} = 20 \times \log (E_{\text{signal}} / E_{\text{noise}} \times 14) \quad (7)$$

有機 CMOS イメージセンサでは、飽和レベルが高く、感度比が 14:1 しかないため、スイッチングポイントでの S/N は最小 31 dB に保たれる。この S/N 特性の保持により、イメージングおよびセンシングにおける広ダイナミックレンジ全範囲において良好な撮像が実現できる。

図 2-14 に、容量結合型ノイズキャンセル回路 (CCNC) と画素内容量結合型ノイズキャンセル回路 (IP-CCNC) の 2 種類のノイズキャンセル回路を使用したノイズキャンセル特性の比較を示す。

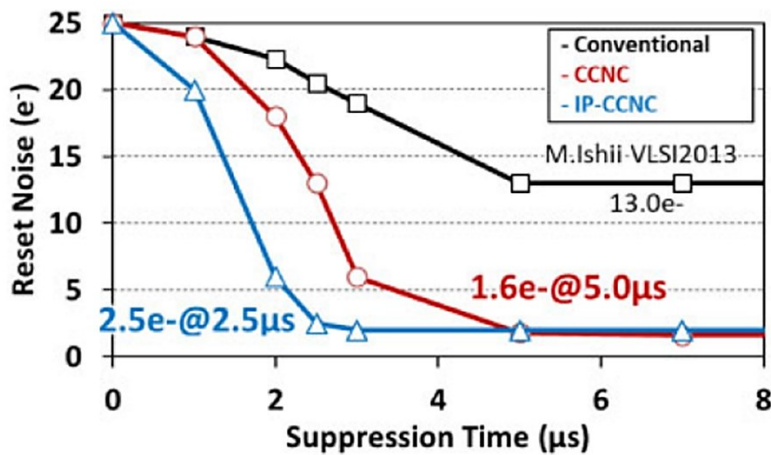


図2-14.ノイズキャンセル特性

© 2018 The Japan Society of Applied Physics (発表論文[1])

広ダイナミックレンジセンサ (2M 解像度) の画素リセットノイズは、CCNC 技術を使用して 5.0 μs で 1.6 e^- まで抑制された。また、8K4K 高解像度センサ (32M 解像度) の画素リセットノイズは、IP-CCNC テクノロジーを使用して 2.5 μs で 2.5 e^- まで抑制された。特に 8K4K 高解像度センサでは、4 倍の時定数にもかかわらず、CCNC の半分の時間で 2.5 e^- までのノイズ抑制を実現可能とした。

図 2-15 は、有機 CMOS イメージセンサによって撮像された、1 回撮像での広ダイナミックレンジ撮像画像を示している。

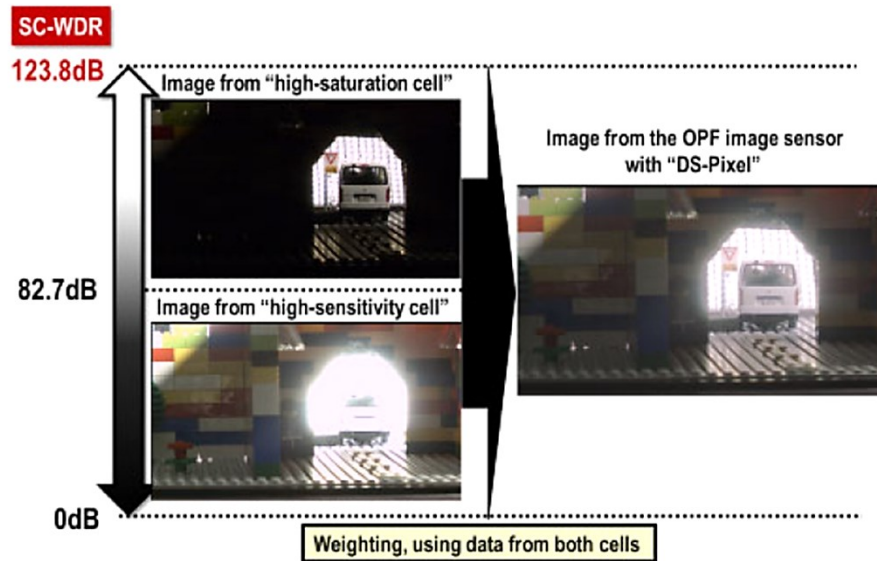


図2-15.広ダイナミックレンジを実現する有機CMOSイメージセンサによる撮像

© 2018 The Japan Society of Applied Physics (発表論文[1])

図 2-15 の左上の画像は、高飽和セルでの撮像画像を示し、高輝度の LED ライト 1 つ 1 つとその前の車が鮮明に映し出されている。図 2-15 の左下の画像は高感度セルでの撮像画像を示し、薄暗い周辺の壁の様子が正確に撮像されている。そして、図 2-15 の右の画像は、高飽和セルと高感度セルから同時読み出した合成画像であり、全輝度範囲において正確な色調が再現されている。

図 2-16 に 2 種類のイメージセンサで撮影した高速動体の撮像画像を示す。左の画像はシリコン CMOS イメージセンサで撮影され、右の画像は有機 CMOS イメージセンサで撮影されている。

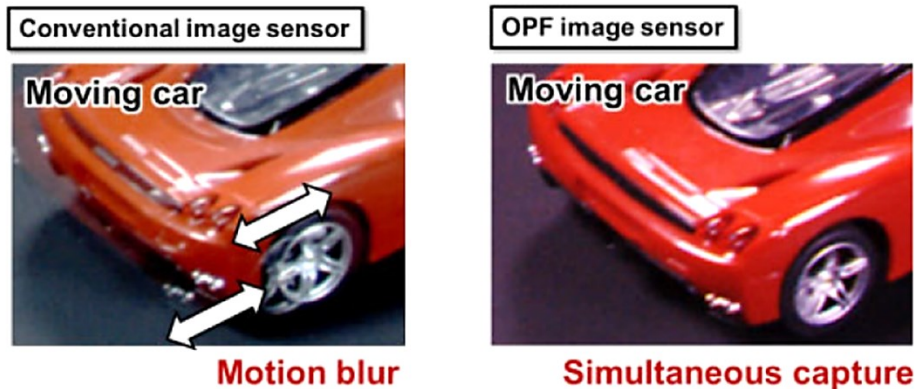


図2-16.高速動体撮像

© 2018 The Japan Society of Applied Physics (発表論文[1])

従来のシリコン CMOS イメージセンサによる撮像では、複数露光期間の画像を合成することで広いダイナミックレンジを実現していた。しかし、複数露光期間の画像の露光タイミングのずれが、高速イメージング、特に本画像では、高速に移動するタイヤやリアバンパー部において動作ぶれを引き起こしている。一方、有機 CMOS イメージセンサによる撮像では、2つのセル間で露光時間、タイミングが同じであるため、動作ぶれが完全に防止される。さらに、本構造では、複数露光期間の画像データを格納するためのフレームメモリが不要であり、これにより後段の論理回路領域を縮小することができる。

また、有機 CMOS イメージセンサでは、広ダイナミックレンジ性能が高いため、高輝度部の白飛びと高速物体の動作ぶれの両方が防止されている。

有機 CMOS イメージセンサの広ダイナミックレンジを実現するための構造は、車載カメラ、監視カメラ、放送カメラにおいて最近課題となっている LED フリッカ問題を解決するための効果的なソリューションでもある。図 2-17 に、LED 信号機撮像時の比較画像を示す。

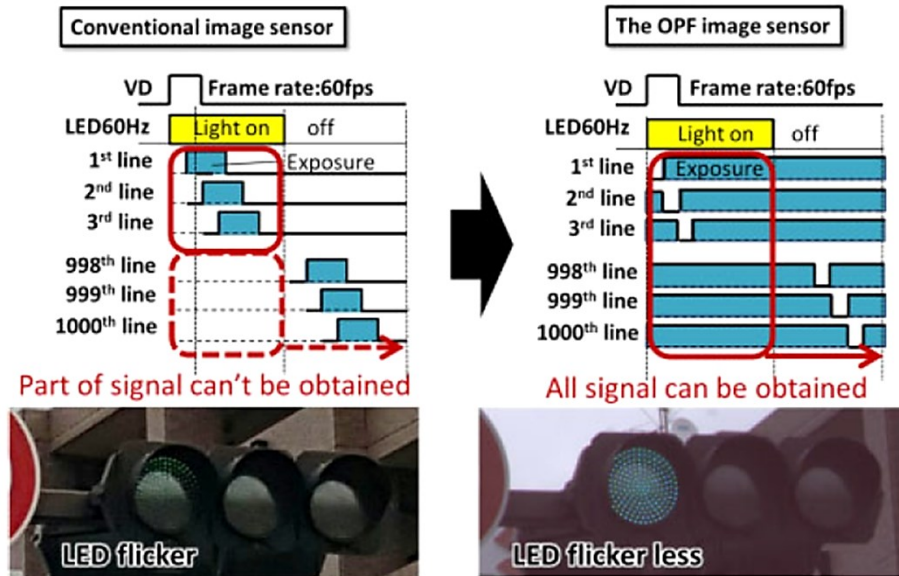


図2-17. LED信号機撮像(LEDフリッカ課題の抑制)

© 2018 The Japan Society of Applied Physics (発表論文[1])

一般的なシリコン CMOS イメージセンサの場合、画素の一部の行が露光されている間、LED ライトのオン時間と重複せず、そのため、信号の一部を画像化できず、LED のちらつきが発生するという課題が生じる。一方、有機 CMOS イメージセンサの場合、高飽和セルは、飽和特性が高く、超短時間となる読み出し期間を除いて、常に低感度で露光する構成のため、すべての信号を捕獲できる。したがって、LED フリッカの課題は構造的に防止される。

図 2-18 に、ローリングシャッターモードとグローバルシャッターモードで撮影した画像をそれぞれ示す。

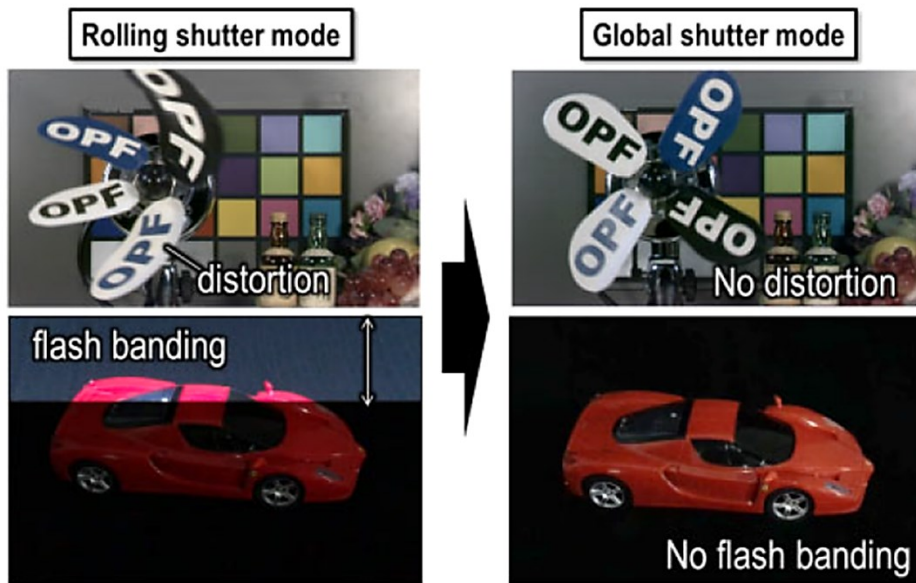


図2-18.ローリングシャッターモードとグローバルシャッターモードでの撮像

© 2018 The Japan Society of Applied Physics (発表論文[1])

2つの画像は同一の有機 CMOS イメージセンサによって撮像されたものである。駆動方法のみが変更されている。図 2-18 の上図の高速動体は、1000 rpm で回転するファンである。ローリングシャッターモードでは、上から下へスキャンするためシャッター歪みが発生している。一方、グローバルシャッターモードでは全行同時撮像するためシャッター歪みが発生していない。図 2-18 の下図では、シャッター照射時の撮像結果を示す。ローリングシャッターモードでは、フラッシュを照射した部分のみ画像が明るくなり、フラッシュバンドが発生している。一方、グローバルシャッターモードでは、全画素が同時に撮影されるため、全画面明るく（または、全画面暗く）撮像され、このような問題は発生しない。

次に、8K4K 高解像度センサのチップ写真を図 2-19 に示す。

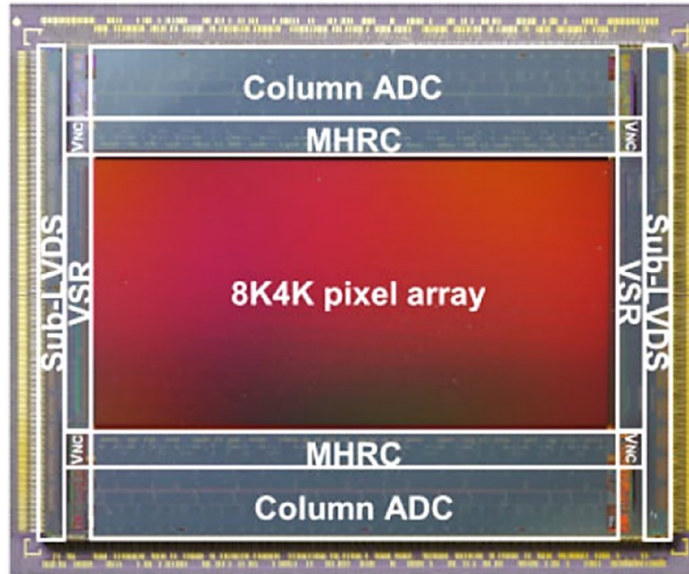


図2-19. 8K4K高解像度を実現する有機CMOSイメージセンサチップ写真

© 2018 The Japan Society of Applied Physics (発表論文[1])

8K4K 高解像度センサは、65 nm 1P5 4Cu 1A1 CMOS プロセスを使用し、3 μm の画素サイズ、8,800(H)×4,548(V)のトータル画素数、8,192(H)×4,320(V)の有効画素数で設計した。また、1.404 Gbps sub-LVDS インターフェースを使用して 60 fps のデジタル読み出しを実現している。供給電圧は、アナログ電圧 3.3 V、デジタル電圧 1.2 V である。

図 2-20 に光電変換特性を示す。

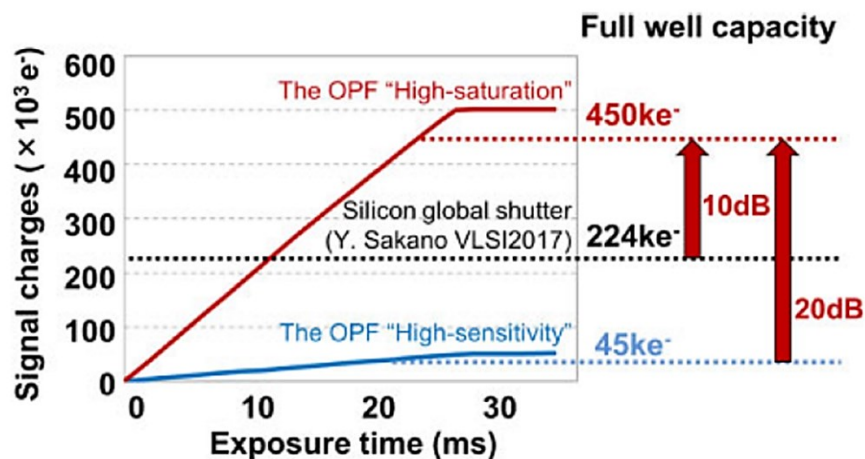


図2-20. 8K4K高解像度を実現する有機CMOSイメージセンサの光電変換特性

© 2018 The Japan Society of Applied Physics (発表論文[1])

RST のゲート電圧の変更により、高感度モードにおいては 45 ke^- の飽和電子数、高飽和モードにおいては 450 ke^- の飽和電子数が達成された。この飽和電子数は、ローリングシャッタモードとグローバルシャッタモードの両方で実現可能である。高飽和モードにおける単位面積あたりの飽和電子数は、有機 CMOS イメージセンサの高感度モードよりも 20 dB 高く、高飽和構造に特化したグローバルシャッタ用シリコン CMOS イメージセンサよりも 10 dB 高くなっている。

図 2-21 に、8K4K 高解像度センサによる撮像画像の一例を示す。



図2-21. 8K4K高解像度を実現する有機CMOSイメージセンサによる撮像

© 2018 The Japan Society of Applied Physics (発表論文[1])

上図に示すように、8K4K 高解像度の画像が得られた。また、高飽和モードオン/オフの画像、ローリングシャッタモードとグローバルシャッタモードの画像も同時に示す。高飽和モードでは、ランプフィラメントの微細な巻線構造まで明確に捉えることができる。グローバルシャッタモードでは、回転ファンの文字を歪みなくシャープに読み取ることができる。

これらすべての機能を同時に実現できることは、さまざまな環境下で制約

のないイメージングおよびセンシングが可能になることを意味する。

2.8 まとめ

表 2-1 に、開発した広ダイナミックレンジ有機 CMOS イメージセンサと 8K4K 高解像度有機 CMOS イメージセンサの特性の概要と他社技術との特性比較を示す。

表2-1.特性比較 NC:ノイズキャンセルモード HS:高飽和モード

	OPF sensor for WDR	OPF sensor for 8K4K	Ref.[26]	Ref.[32]	Ref.[33]	Ref.[34]	Ref.[21]
Process technology	65 nm 1P3Cu1Al CMOS	65 nm 1P4Cu1Al CMOS	180nm 1P4M CMOS	45 nm 1P4M stacked CMOS	180 nm CMOS	130nm 1P4M CMOS	180nm/90nm CMOS
Number of pixels total	—	8,800 × 4,548	15,488 × 8,776	9,600 × 5,396	—	2,676 × 2,200	—
Number of pixels effective	970 × 550 1,940 × 1,100 ^{a)}	8,192 × 4,320	15,360 × 8,640	7,728 × 4,368	7,920 × 6,004	2,592 × 2,054	(1.3 Mpixel)
Pixel size (μm × μm)	6.0 × 6.0 3.0 × 3.0 ^{a)}	3.0 × 3.0	2.45 × 2.45	1.1 × 1.1	4.6 × 4.6	3.4 × 3.4	3.875 × 3.875
Frame rate (fps)	60	60	60	240	30	120, 60	—
ADC resolution (bit)	12	12	14	12	12	12	—
Full well capacity (e ⁻)	600k 489k ^{a)}	45k at NC 450k at HS	10k	5.7k	14.1k	8k at 120fps 16k at 60fps	224k
Full well capacity per unit square (e ⁻ /μm ²)	16.7k 54.3k ^{a)}	5k at NC 50k at HS	1.7k	4.7k	0.7k	0.7k at 120fps 1.4k at 60fps	14.9k
Random noise (e ⁻)	5.4 6.2 ^{a)}	8.6	7.68	4.5 at gain1 3.6 at gain4	8.8	1.8	—
Global shutter function	Available	Available	Unavailable	Unavailable	Available	Available	Available
Global shutter speed (s)	1/400000	1/65000	—	—	—	—	—
PLS (dB)	-100	-110	—	—	-86	-89	-83
Power (W)	—	8.4	11.0	3.0	—	0.45	—

a) In the case using MIM capacity

© 2018 The Japan Society of Applied Physics (発表論文[1])

広ダイナミックレンジ有機 CMOS イメージセンサは 65 nm CMOS プロセスで製造され、画素サイズ 6 μm、画素数 970(H) × 550(V) で、600 ke⁻高飽和と 123.8 dB 1 回撮像広ダイナミックレンジを達成できた。画素リセットノイズは 5.0 μs の抑制時間で 1.6 e⁻まで抑制することができた。また、駆動方法を変えるだけで、ローリングシャッターモードとグローバルシャッターモードの両方を実現可能であり、グローバルシャッターモードでは、1/400000 秒のグローバルシャッタースピードと -100 dB の寄生光感度 (PLS) が達成できた。さらに、高容量、低リーク電流の MIM を使用する場合、画素サイズ 3 μm、画素数 1,940(H) × 1,100(V) で、489 ke⁻高飽和と 121 dB 同時撮像広ダイナミックレンジを達成できた。その他のセンサ特性は、6 μm センサと同等である。

8K4K 高解像度イメージセンサは、65 nm CMOS プロセスで製造され、画素サイズ 3 μm、画素数 8800(H) × 4548(V) で、8K4K の高解像度、60 fps の高フ

フレームレート、450k e⁻の高飽和が同時に実現された。画素リセットノイズは2.5 μsの抑制時間で2.5 e⁻まで抑制することができた。また、駆動方法を変えるだけで、ローリングシャッターモードとグローバルシャッターモードの両方を実現可能であり、グローバルシャッターモードでは、1/65000秒のグローバルシャッタースピードと-110 dBの寄生光感度(PLS)が達成できた。

本章では、開発した有機 CMOS イメージセンサの、センシングに対し最も効果的となる2つの特長技術の開発と評価結果について示した。今後、イメージセンサへの要求は「正確に撮像する」から「見えないものを見る」、「状態を認識する」、「次のアクションを予測する」へとシフトしていくと考えられる。また、イメージセンサからの読み出しデータも、現在は人間が見るためのものであるが、今後は機械で読み取るためのものになると予測される。そのため、センサ仕様を向上するだけでなく、認識率や分析能力を高める機能・性能の向上は必須となる。光電変換部、電荷蓄積部、信号処理部を独自に設計できる有機 CMOS イメージセンサの構成は、今後のこうした市場ニーズに応え、さらには産業や人の生活に貢献する新たな市場の創出につながるものであると考える。

第3章

光通信用トランシーバ技術

3.1 はじめに

近年、インターネット上の情報が増加し、リアルタイム配信も増える中で、IPトラフィックは急速に増加している。そのため、高速ネットワークサービスの需要が高まっており、低コストで実現可能な光アクセスシステムの開発が活発になっている[35-39]。経済的に大容量のデータ伝送が可能なギガビットクラスのEPON(GE-PON)システムは、有力な候補の1つであり、多くの注目が集まっている。図3-1に示すようなEPONシステムでは、各家庭・ユーザー側の複数台の光回線終端装置ONUs(Optical Network Units)が光ファイバーと1:N光カップラーを介して基地局・ホスト側の1台の光回線終端装置OLT(Optical Line Terminal)に接続されている。1490 nmの波長を使用するダウンストリーム伝送は連続モードで、イーサネットフレームがそのまま送信され、1310 nmの波長を使用するアップストリーム伝送はTDMAバーストモードで実施される。したがって、このようなPONシステムのもっとも重要なコンポーネントは、アップストリーム伝送用の高速バーストモード光トランシーバとなる。

本章では、低コストの0.25 μm CMOSプロセスで製造された1.25 Gbpsのバーストモード光トランシーバ(OLT用の受信器とONUs用の送信器)の開発について説明を行う。

新しい自動利得制御技術(AGC:Automatic Gain Control)と基準電圧発生器(RVG:Reference Voltage Generator)により、光受信器は、1.25 Gbpsのバーストモード伝送で-29.0 dBmの最小光感度と-2.2 dBmのオーバーロードで26.8 dBの広いダイナミックレンジを達成した。さらに、新しい自動光出力パワーおよび消光比制御(APC:Automatic Power Control)システムを考案したことにより、光送信器は、-40 $^{\circ}\text{C}$ ~100 $^{\circ}\text{C}$ の広い温度範囲でそれぞれ ± 0.4 dBmおよび ± 0.6 dB範囲内に変動を抑制することに成功した。またこれはIEEE802.3ahPX20規格[40]の仕様に適合する世界初のCMOS光トランシーバとなっている。

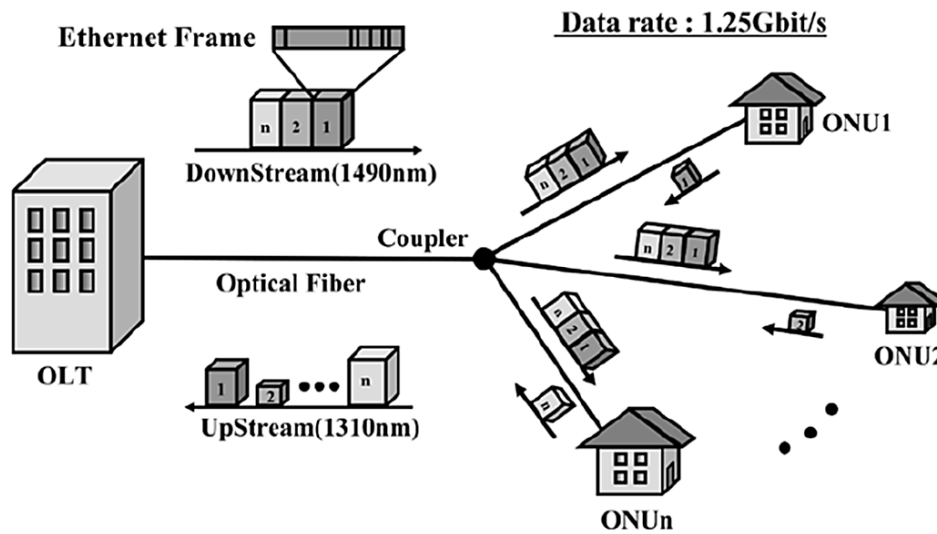


図3-1. GE-PONシステム

© 2005 IEEE (発表論文[2])

3.2 バーストモード光受信回路技術

図3-2に、ピンフォトダイオード(PIN-PD: Pin Photodiode)、プリアンプ、メインアンプで構成されるバーストモード光受信器のブロックダイアグラムを示す。プリアンプは、PIN-PDからの光電流を電圧信号に変換する。メインアンプはプリアンプから電圧信号を受信し、それを論理振幅に増幅して、LVPECL(Low-Voltage Positive Emitter-Coupled Logic)バッファを介して出力する。プリアンプとメインアンプは、バーストモード伝送用にDC結合とする。

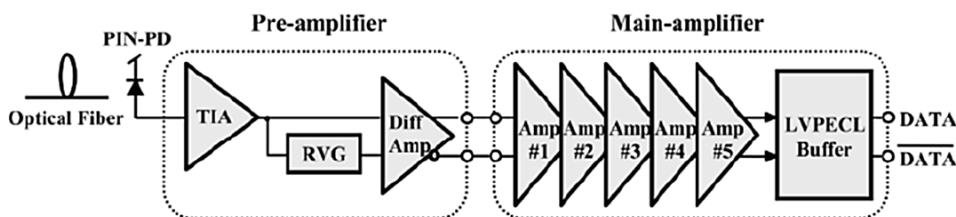


図3-2. バーストモード光受信器のブロックダイアグラム

© 2005 IEEE (発表論文[2])

3.2.1 プリアンプの設計

プリアンプは、トランスインピーダンスアンプ(TIA)、差動アンプ(Diff Amp)、および差動アンプ用の基準電圧生成回路(RVG)で構成する。バーストモードのプリアンプにおいて、高速設計のためには2つの課題がある。1点目は、さまざまな振幅の高速バースト信号を受信するためには、瞬時に応答できるAGC機能が必要であるということである。2点目は、差動アンプの基準電圧を差動アンプのために非常に高速に生成する必要があるということである。これらの問題に対応するため、2つの新しい回路技術を考案した。

3.2.2 AGC 技術

従来は、トランジスタまたはスイッチ付き抵抗器をフィードバック抵抗器と並列に接続してAGC機能を実行していた[35-38]。ただし、これらの回路では、トランスインピーダンスゲインを抑制しようとする、トランスインピーダンスアンプに使用する反転増幅器の開ループゲインが変化しないため、図3-4(a)に示すように不安定になる傾向があった。

したがって、今回は、図3-3に示すように、トランスインピーダンスアンプ出力の飽和を防ぐために、トランジスタM1を入力ノードとカスコードトランジスタM3のソースの間に挿入し、過剰な入力電流をバイパスする。このトポロジーでは、トランスインピーダンスアンプに使用される反転増幅器の開ループゲインがM1によって減少するため、安定したAGC機能を高速に実現できる。

ただし、入力電圧 V_{in} とM3のソース電圧 V_{B2} の間に大きなオフセット V_{off} がある条件下でトランジスタM1がオンになると、出力 V_{out} が図3-4(b) ($V_{off}=100\text{ mV}$)に示すようにシフトされる。この電圧シフトを回避するため、M3のゲート電圧 V_{B1} は、オペアンプとトランスインピーダンスアンプの10分の1のサイズで設計したトランスインピーダンスアンプのレプリカ回路によって、常に V_{B2} と V_{in} が等しくなるように設定する。図3-4(c)に電圧シフトの防止に成功したトランスインピーダンスアンプ出力のシミュレーション結果を示す。

レプリカ回路はトランスインピーダンスアンプの10分の1のサイズで設計することにより、消費電力とチップ面積を節約可能とする。

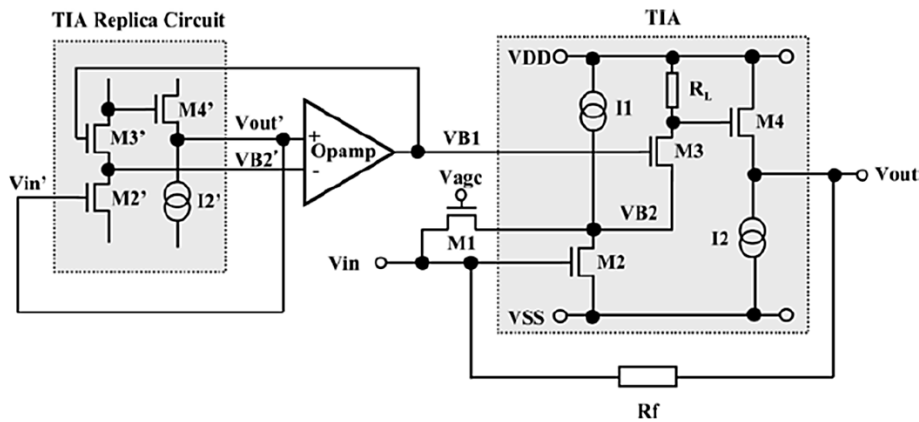


図3-3. AGC機能を搭載したトランスインピーダンスアンプ(TIA)の回路構成

© 2005 IEEE (発表論文[2])

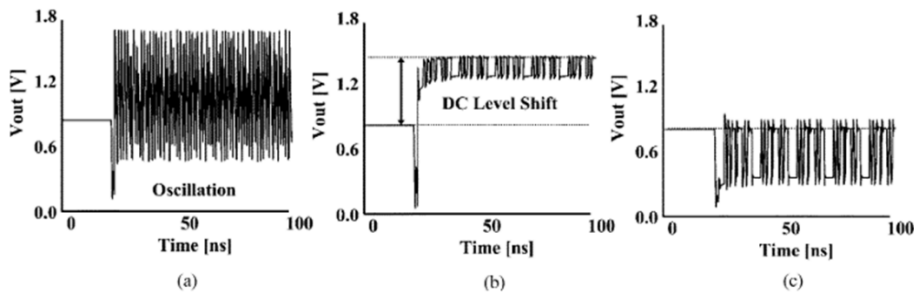


図3-4. トランスインピーダンスアンプ(TIA)出力電圧 ※シミュレーション結果
(a)従来TIA (b)今回開発したTIA (c)レプリカ回路を搭載したTIA

© 2005 IEEE (発表論文[2])

プリアンプの回路構成を図 3-5 に示す。プリアンプには、2つのコンパレータ CMP1、CMP2 を設け、さらに、広範囲の入力電流をモニタするために、PMOS トランジスタ M5 と抵抗 R_s を追加する。M5 はトランスインピーダンスアンプ出力の大きな歪みを防ぐために入力電流を引き抜き、 R_s は電流を VB3 電圧に変換する。CMP1 では、トランスインピーダンスアンプ出力電圧 V_{out} を基準電圧 V_{ref1} と比較、CMP2 では、 R_s で変換された VB3 電圧を基準電圧 V_{ref2} と比較する。

M1 のゲート電圧 V_{agc} は、比較結果に応じて、78 dB~50 dB の3つのレベルのうち最適値に変更される。したがって、トランスインピーダンスゲインの変更による信号劣化を大幅に低減できる。

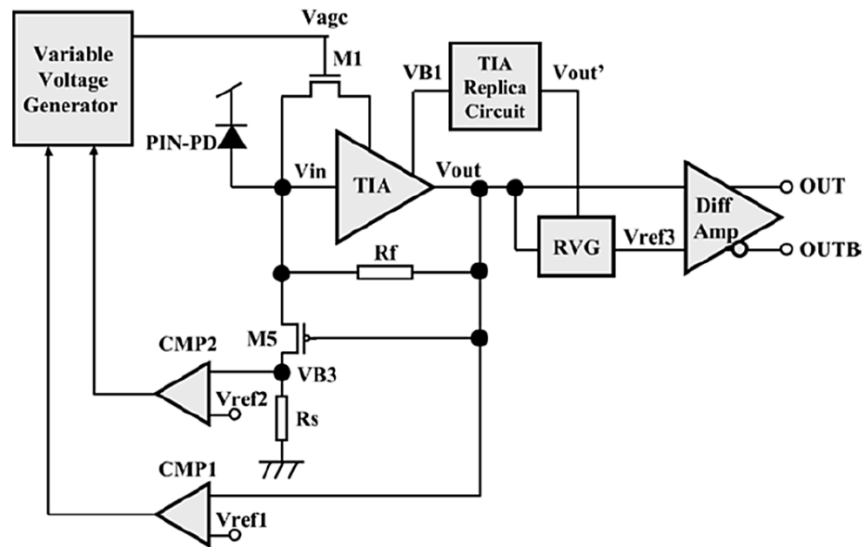


図3-5. プリアンプの回路構成

© 2005 IEEE (発表論文[2])

3.2.3 基準電圧生成回路

バーストモード伝送では、シングル差動変換の基準電圧を高速に生成する必要がある。従来は、トップホールド回路、ボトムホールド回路、直列抵抗付き分圧器を備えており、分圧器を使用して出力信号のトップレベルとボトムレベルの間で電圧を分圧することにより生成していた[38]。ただし、このトポロジーでは、基準電圧はピーク検出と分圧のシーケンシャル機能によって生成されるため、高速に応答することは非常に困難であった。さらに、2つのピークホールド回路(トップホールド回路とボトムホールド回路)を使用しているため、消費電力が大きく、チップ面積が大きくなるという課題があった。

この問題に対処するために、ボトムホールド回路と分圧器を組み合わせた新しい基準電圧生成回路を開発した。基準電圧生成回路の簡略化した回路構成を図3-6に示す。

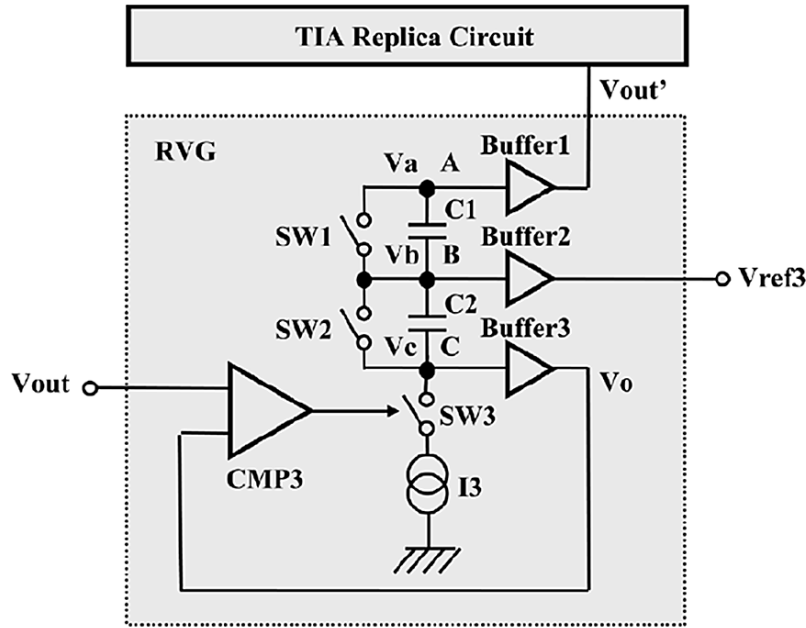


図3-6. 基準電圧生成回路の回路構成

© 2005 IEEE (発表論文[2])

ボトムホールド回路の保持容量は、リセットスイッチ SW1、SW2 が並列に接続された 2 つの同一の容量 C1、C2 に分割されている。A のノード電圧は $V_a = V'_{out} + V_{BF}$ に設定される。ここで、 V'_{out} は無入力時のトランスインピーダンスアンプの出力電圧であり、 V_{BF} はバッファでのレベルシフト電圧である。基準電圧 V_{ref3} は、バッファを介して B のノード電圧から抽出され、 $V_{ref3} = V_b - V_{BF}$ で表される。同様に、出力電圧 V_o は、バッファを介して C のノード電圧から抽出され、 $V_o = V_c - V_{BF}$ で表される。したがって、 V_{ref3} は正確に V'_{out} と V_o の中間レベルとなる。

この構成では、容量が電圧の保持と分圧の両方に使用されるため、別構造の分圧器をなくすことができる。さらに、 V'_{out} 電圧は図 3-3 の AGC 機能にも使用されたトランスインピーダンスアンプのレプリカ回路によって生成されるため、これ以上の追加回路は不要であり、トップホールド回路を排除できる。この結果、本回路は高速応答だけでなく、小面積と低消費電力も実現可能となる。

3.2.4 メインアンプの設計

メインアンプの回路構成を図 3-7 (a) に示す。

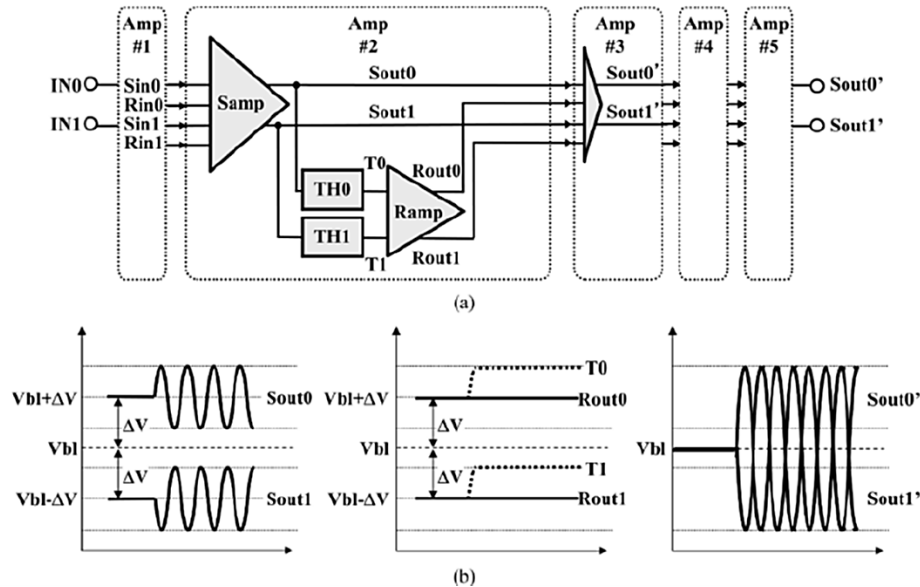


図3-7. メインアンプの回路構成と出力波形
(a)回路構成 (b)出力波形

© 2005 IEEE (発表論文[2])

本構成は、高速応答と高いノイズ耐性の両方を実現する完全差動フィードフォワードアーキテクチャとして構成されており、自動閾値制御 (ATC : Automatic Threshold Control) 技術を採用している [39]。5つのコアアンプ Amp #1~#5 は、50 dB を超えるトータルゲイン設定とし、差動入力信号間の大きなオフセット電圧をキャンセルできるようにカスコード接続されている。

各コアアンプは、2対の差動入力端子を備えた差動アンプ Samp と、差動アンプ Ramp と、2つのトップホールド回路 TH0 および TH1 で構成されている。Samp の差動出力 Sout0 と Sout1 は TH0 と TH1 に入力され、Sout0 と Sout1 のトップレベルを T0 と T1 として検出し、それらを Ramp に供給する。

ここで、Samp のゲインは A に設定し、Ramp のゲインは 0.5 に設定する。平衡差動入力での Samp と Ramp の出力レベルは、 V_{bl} と一致するように設計する。したがって、Samp と Ramp の出力電圧は、それぞれ次の式で表される。

$$Sout0 = A \times \{(Sin0 - Rin0) - (Sin1 - Rin1)\} + Vb1 \quad (1)$$

$$Sout1 = -A \times \{(Sin0 - Rin0) - (Sin1 - Rin1)\} + Vb1 \quad (2)$$

$$Rout1 = 0.5 \times (T0 - T1) + Vb1 \quad (3)$$

$$Rout1 = -0.5 \times (T0 - T1) + Vb1 \quad (4)$$

次に、4つの出力電圧 Sout0、Rout0、Sout1、Rout1 が次のコアアンプに供給され、Samp の2対の差動入力信号として使用される。

次に、オフセットキャンセルの動作を図 3-7(b)に示す。Samp の Sout0 と Sout1 の間にオフセット $2\Delta V$ があると仮定すると、それらは下記のように表される。

$$Sout0 = A \times \{(Sin0 - Rin0) - (Sin1 - Rin1)\} + Vb1 + \Delta V \quad (5)$$

$$Sout1 = -A \times \{(Sin0 - Rin0) - (Sin1 - Rin1)\} + Vb1 - \Delta V \quad (6)$$

トップホールド回路は、トップレベルを T0 および T1 として検出する。Ramp は T0 と T1 を受け取り、Sout0 と Sout1 の中間レベルを Rout0 と Rout1 として生成する。

$$Rout0 = Vb1 + \Delta V \quad (7)$$

$$Rout1 = Vb1 - \Delta V \quad (8)$$

その結果、オフセット電圧 $2\Delta V$ は次段の Samp の出力で相殺される。今回の設計では、オフセットは最大 ± 100 mV までキャンセルできる。

従来の方法では、Samp の閾値電圧はトップホールド回路とボトムホールド回路の両方を使用して生成されていた[36]。ただし、本回路では、2つの同一のトップホールド回路（またはボトムホールド回路）と、トップホールド回路から2つの出力信号を受信する差動アンプ Ramp によって生成される。2つのトップホールド回路のオフセットはほぼ同じであるため、これらのオフセットは Ramp によって正確にキャンセルすることができる。

3.3 バーストモード光送信回路技術

レーザーダイオード(LD)の光出力パワー特性は温度と経年変化に強く依存するため、平均光出力パワーと消光比を一定に保つために、LDを流れる電流を制御する必要がある。消光比が低くなると光学感度が低下するため、消光比を適切に高く保つことが望ましい。一般に、電流を制御するためにフィードフォワードまたはフィードバックシステムのいずれかが使用される。

フィードフォワードシステムでは、事前に決定されたデータテーブルに基づいて電流が制御されるため、正確に一定に保つことは非常に困難である。一方、従来のフィードバックシステムでは、光出力と消光比を監視するために、小容量のモニターフォトダイオード(MPD:Monitor Photo Diode)と高速回路が必要であり、製造コストが非常に高くなる。これらの問題に対応するために、新しいフィードバック型自動電力制御(APC:Automatic Power Control)システムを開発した。このシステムでは、通常使用の低コストMPDからの平均光電流の分散に基づいて、LD電流(変調電流とバイアス電流)をバーストごとに変更し、光出力と消光比を制御する。

3.3.1 平均光出力パワーと消光比を制御する APC システム

図3-8に、LD、LDの光出力を監視するためのMPD、ドライバブロック、制御ブロックで構成されるレーザーダイオード駆動回路(LDD:Laser Diode Driver)で構成される、APCシステムを備えたバーストモード光送信器のブロックダイアグラムを示す。

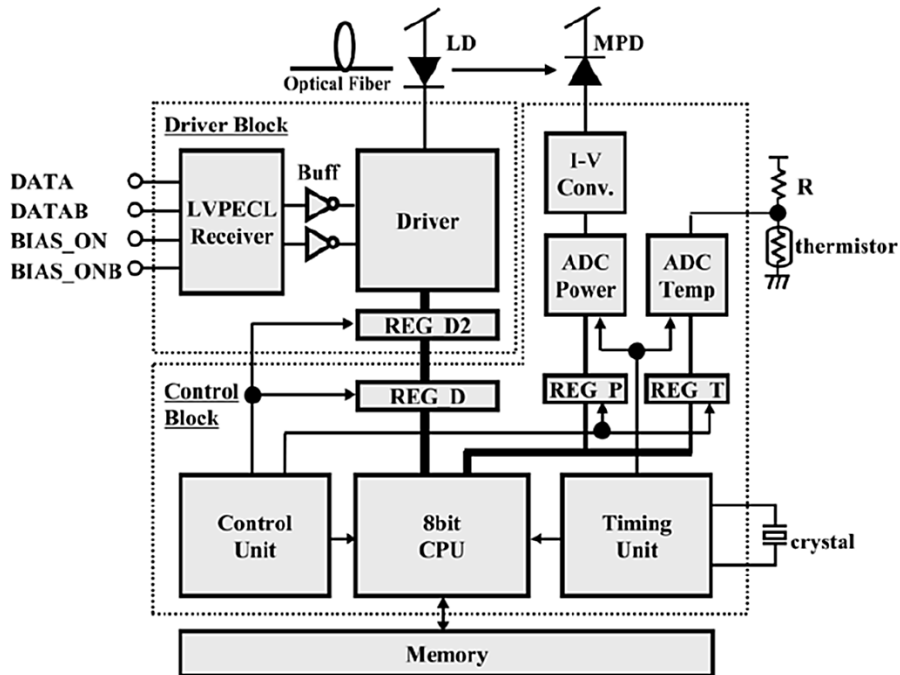


図3-8. パースモード光送信器のブロックダイアグラム

© 2005 IEEE (発表論文[2])

制御ブロックは、8 bit の CPU と 2 つのアナログ-デジタル変換器 (ADC: Analog to Digital Converter) で構成されている。サーミスタと ADC の 1 つを利用して周囲温度を測定し、8 bit の CPU が LD 温度特性のデータテーブルに従って変調電流とバイアス電流の初期値を設定する。MPD からの平均電流は他の ADC によって測定され、8 bit の CPU はその後、新しい APC システムに基づいて変調電流とバイアス電流の値を変更する。ドライバブロックは、LVPECL (Low Voltage Positive Emitter Coupled Logic) 受信器を介してデータを受信し、8 bit の CPU に従って LD に電流を出力する。

新しい APC システムのフローチャートとオペレーションをそれぞれ図 3-9 と図 3-10 に示す。

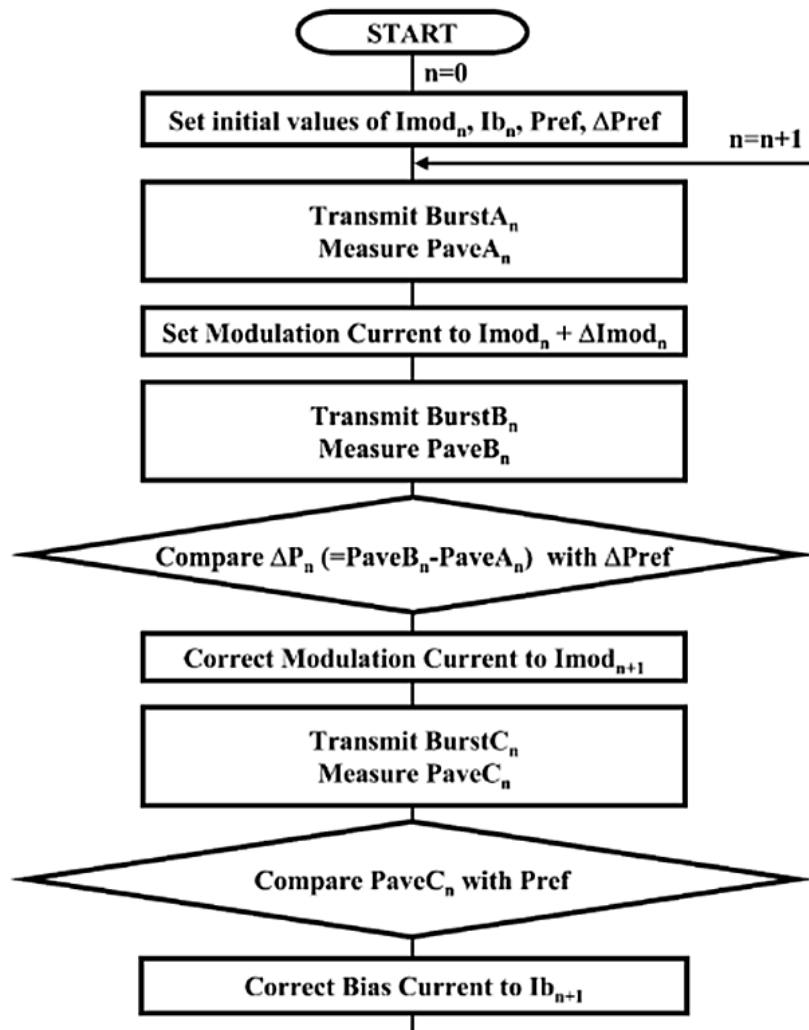


図3-9. APCシステムのフローチャート

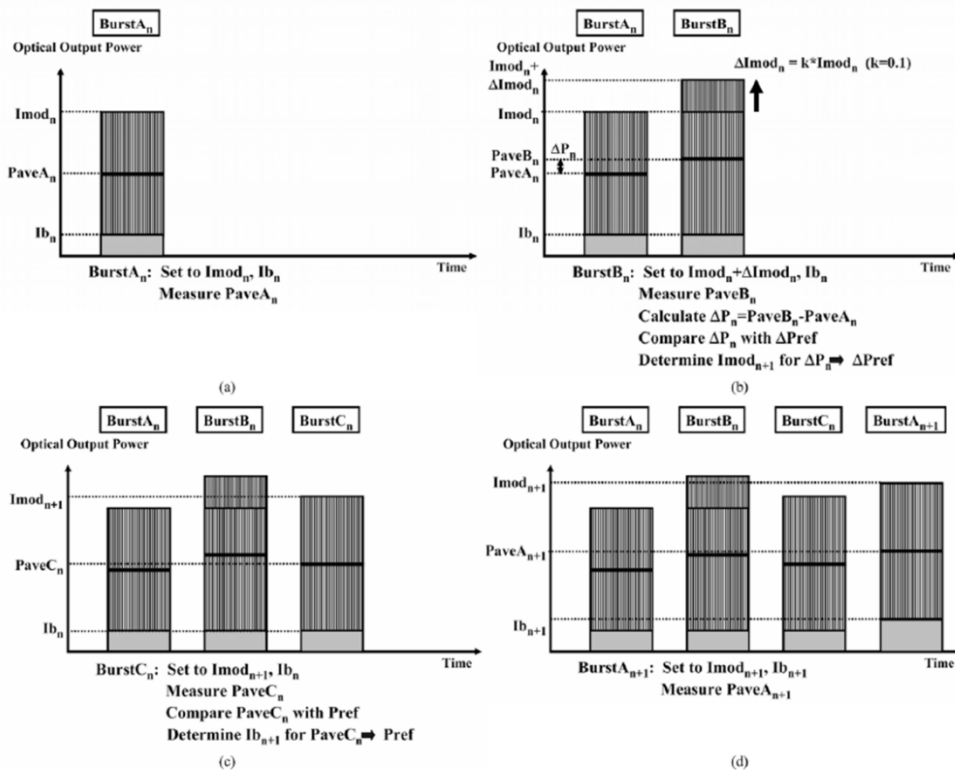


図3-10. APCシステムのオペレーション

(a)バーストA_n期間 (b)バーストB_n期間 (c)バーストC_n期間 (d)バーストA_{n+1}期間

© 2005 IEEE (発表論文[2])

この APC システムでは、変調電流とバイアス電流の設定と MPD からの平均電流の測定がバーストごとに実行され、1 つの手順が 3 つのバースト期間で完了する。詳細な操作は以下のとおりとなる。

- 0) セットアップ期間：変調電流 I_{mod_0} とバイアス電流 I_{b_0} の初期値を決定する。目標平均光出力パワー P_{ref} と、目標平均光出力パワー変動 ΔP_{ref} はあらかじめ決定しておく。
- 1) バースト A_n 期間：図 3-10(a) に示すように、変調電流とバイアス電流をそれぞれ I_{mod_n} と I_{b_n} に設定し、平均光出力パワーを P_{aveA_n} として測定する。
- 2) バースト B_n 期間：図 3-10(b) に示すように、変調電流を $I_{mod_n} + \Delta I_{mod_n}$ に変更する。ここで、 $\Delta I_{mod_n} = k \cdot I_{mod_n}$ ($k = 0.1$) であり、平均光出

カパワーは P_{aveB_n} として測定される。次に、平均光出力パワー変動 $\Delta P_n (= P_{aveB_n} - P_{aveA_n})$ を計算し、 ΔP_{pref} と比較する。 ΔP_n が ΔP_{pref} に漸近するように、新しい変調電流 $I_{mod_{n+1}}$ を決定する。

3) バースト C_n 周期：図 3-10(c) に示すように、変調電流は $I_{mod_{n+1}}$ に更新され、平均光出力パワーは P_{aveC_n} として測定される。 P_{aveC_n} は P_{pref} と比較される。新しいバイアス電流 $I_{b_{n+1}}$ が決定され、 P_{aveC_n} は P_{pref} に漸近する。

4) バースト A_{n+1} 周期：図 3-10(d) に示すように、バイアス電流は $I_{b_{n+1}}$ に更新され、平均光出力パワーは $P_{aveA_{n+1}}$ として測定される。

この手順は、図 3-11 に示すように、3つのバースト(バースト A、B、C)ごとに繰り返され、変調電流とバイアス電流は、 P_{ave} と ΔP がそれぞれ P_{pref} と ΔP_{pref} に等しくなるように制御される。

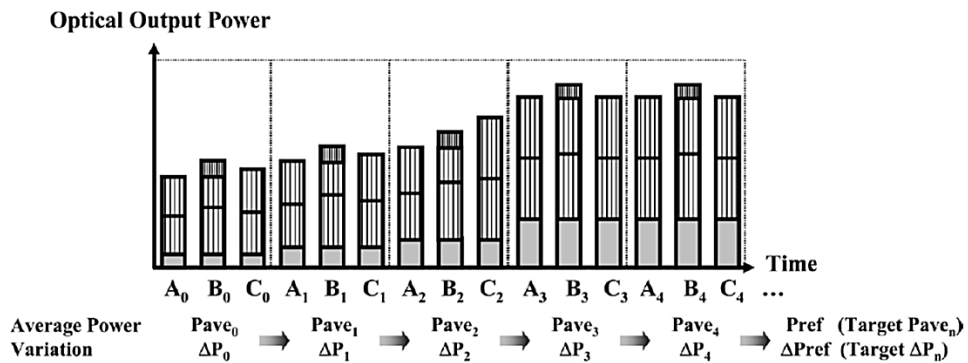


図3-11. APCシステムのオペレーション

© 2005 IEEE (発表論文[2])

ここで、平均光出力と消光比率は以下のように表される。

$$\text{平均光出力} = P_{ave_n} \quad (9)$$

$$\text{消光比} = \{P_{ave_n} + (\Delta P_n / k)\} / \{P_{ave_n} - (\Delta P_n / k)\} \quad (10)$$

したがって、最後の結果では、平均光出力パワーと消光比は、次のように目標値と等しくなる。

$$\text{平均光出力} = P_{\text{ref}} \quad (11)$$

$$\text{消光比} = \{P_{\text{ref}} + (\Delta P_{\text{ref}} / k)\} / \{P_{\text{ref}} - (\Delta P_{\text{ref}} / k)\} \quad (12)$$

このシステムでは、従来の低コストMPDを使用して、平均光出力と消光比を一定に保つことができる。したがって、経済的なLDモジュールをONUで実現できる。

また、前述のように、変調電流とバイアス電流はバーストごとに更新され、バースト期間中に変更されないため、このAPCシステムでは伝送データの品質を低下させることはない。

3.4 評価結果

3.4.1 測定環境

使用した測定環境を図3-12に示す。評価は、開発した光受信器と光送信器を組み合わせで行った。実験では、テストバーストと-6 dBmの光パワーの干渉バーストを交互に光受信器に入力した。

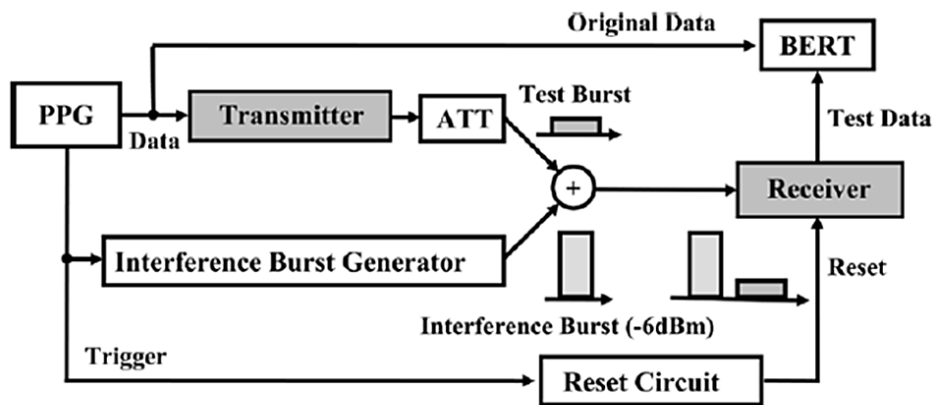


図3-12. 評価環境

3.4.2 バーストモード光受信器

図 3-13 に、受信光パワーのビット誤り率(BER:Bit Error Rate)特性を示す。テストバーストと干渉バーストは光受信器に交互に与えられ、テストバーストの BER を評価した。

PIN-PD の応答性は 0.92 A/W で、受信器は、BER < 10^{-12} で -29.0 dBm の最小光感度と -2.2 dBm のオーバーロードを実現し、26.8 dB の非常に広いダイナミックレンジの達成を示している。

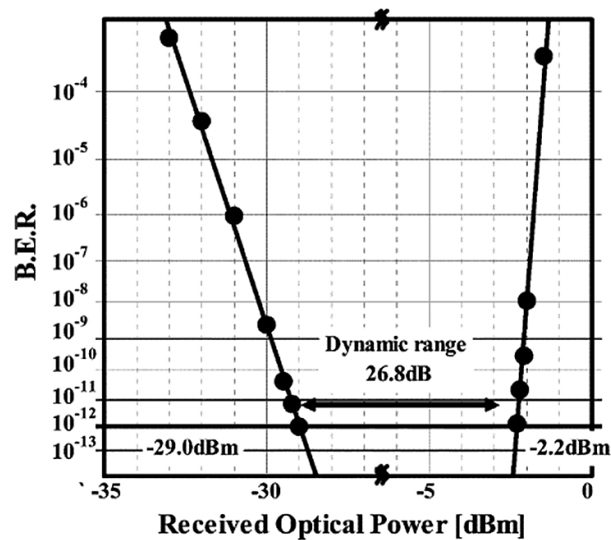


図3-13. 光受信器のBER特性

© 2005 IEEE (発表論文[2])

図 3-14 に、光パワーが -6 dBm と -29 dBm の 2 種類のバーストが光受信器に交互に入力され、また、各バーストの前に、16 ns 周期のリセット信号が提供された場合の、光受信機の入力波形と出力波形を示す。結果、両方のバーストが完全に回復できたことを示せた。

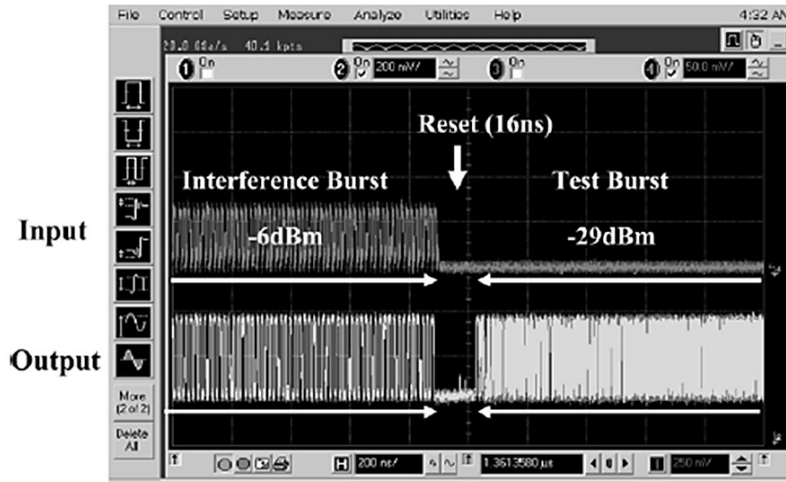


図3-14. 光受信器の入出力波形

© 2005 IEEE (発表論文[2])

3.4.3 バーストモード光送信器

図 3-15 に、平均光出力パワーと消光比の周囲温度依存性の実験結果を示す。平均光出力パワーを 0 dBm にプリセットし、消光比を室温で 9.2 dB に設定した場合、光送信器は $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ～ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ の広い温度範囲でそれぞれ $\pm 0.4\text{ dBm}$ と $\pm 0.6\text{ dB}$ の変動に抑えることに成功、本 APC システムの優位性を検証できた。

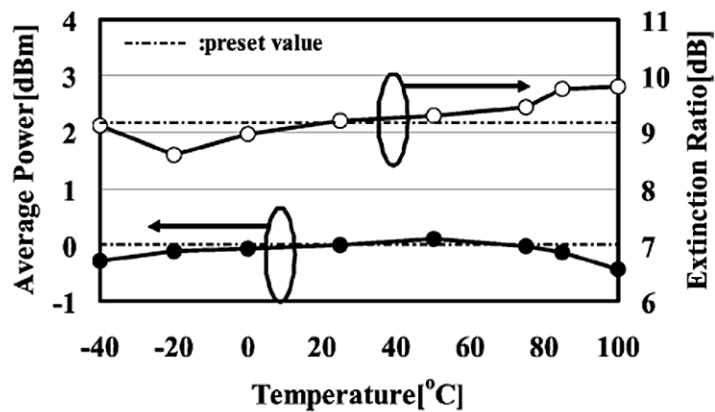


図3-15. 平均光出力パワーと消光比

© 2005 IEEE (発表論文[2])

図 3-16 に、1.25 Gbps のデータレートでの光送信機のアイパターンを示す。消光比は 9 dB に設定した。このアイパターンは、IEEE802.3ah 規格のアイマスクに準拠している。

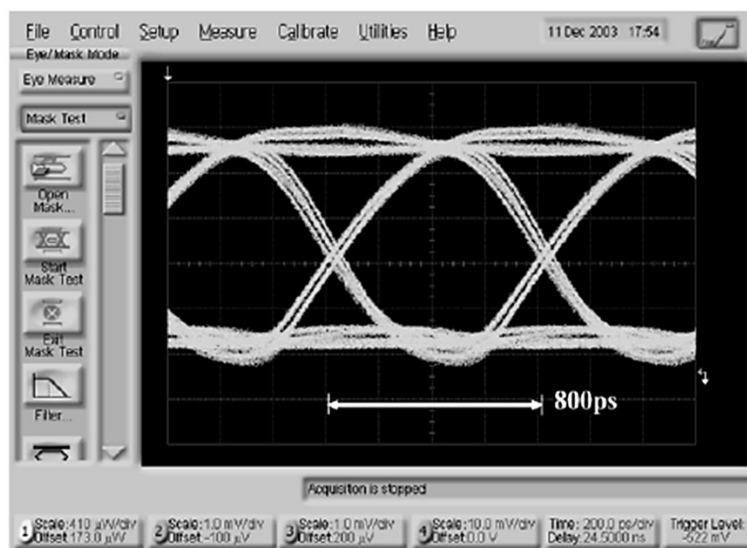


図3-16. 光出力のアイパターン

© 2005 IEEE (発表論文[2])

表 3-1 に、IEEE802.3ah PX20 の規格と光送受信器の特性概要を示す。光送受信器のすべてのチップは、低コストの 0.25 μm CMOS プロセスで製造した。受信器チップは、LVPECL バッファとレーザーダイオード駆動回路を除いて 2.5 V 電源で動作、LVPECL バッファとレーザーダイオード駆動回路は 3.3 V 電源で動作している。プリアンプ、メインアンプ、レーザーダイオード駆動回路の消費電力は、それぞれ 240 mW、570 mW (LVPECL バッファ含む)、230 mW (LD 電流除く) である。チップ写真を図 3-17 に示す。プリアンプのチップサイズは 2.1 mm \times 2.1 mm、メインアンプとレーザーダイオード駆動回路のチップサイズは 4.2 mm \times 4.2 mm である。ただし、これらはテストチップであり、チップサイズの最適化は行っていない。

表3-1. IEEE802.3ah規格と本システムの特徴

	Standard (IEEE802.3ah Draft3.3 PX20)	This Work
Bit rate	1.25Gbps	1.25Gbps
Receiver		
Sensitivity	< -27dBm (@10 ⁻¹²)	-29dBm (@10 ⁻¹²)
Overload	> -6dBm (@10 ⁻¹²)	-2.2dBm (@10 ⁻¹²)
Transmitter		
Ambient temperature	-40°C ~ +85°C (Universal Extended Class)	-40°C ~ +100°C
Average launch power	-1dBm ~ +4dBm	preset value ±0.4dBm
Extinction Ratio	> +6dB	preset value ±0.6dB

© 2005 IEEE (発表論文[2])

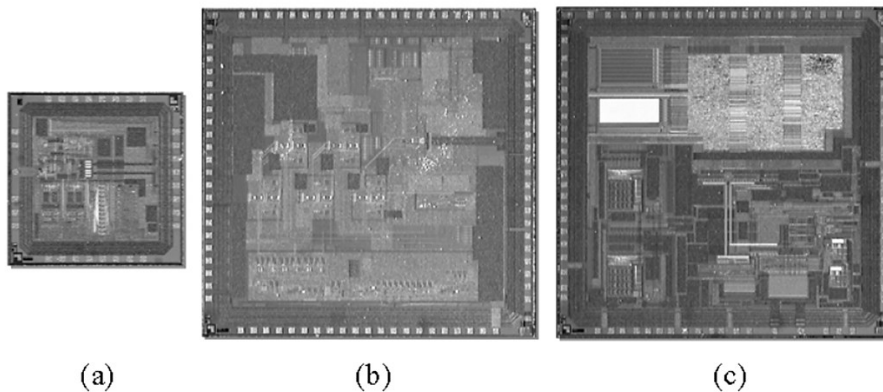


図3-17. チップ写真
(a)プリアンプ (b)メインアンプ (c)レーザーダイオード駆動回路

© 2005 IEEE (発表論文[2])

3.5 まとめ

1.25 Gbps EPON システムのバーストモード光受信機用を開発、新しい AGC 技術と基準電圧発生器を提案した。これらの手法を採用することで、-29.0 dBm の最小光感度、-2.2 dBm のオーバーロードにおいて 26.8 dB の広いダイナミックレンジを実現した。-29.0 dBm の最小光感度は、ギガビットクラスの PON システム用の CMOS 光受信器の中で最も高い感度である。また、バーストモードレーザーダイオード駆動回路用の新しい APC システムを提案した。結果、平均光出力パワーと消光比の変動は、-40 °C ~ 100 °C の広い温度

範囲において、 ± 0.4 dBm と ± 0.6 dB 範囲内に抑制された。これは、IEEE 802.3ah PX20 規格[40]の仕様を満たす最初の CMOS 光トランシーバとなる。

本章で示した光通信技術は、今後の IoT/IoE の発達した社会、また DX(デジタルトランスフォーメーション)の進化の中で、取得した大容量情報の高速伝送を行うための有効な手段となる。また特に、様々な機器が用いられ、多様なノイズが発生している現場(例えば、工場)では、従来のメタル通信技術を使用するのではなく本光通信技術を用いることで、現場の電源ノイズ、通信ノイズの影響を受けない信頼性の高い伝送を実現することが可能となる。

今後は、大容量のデータを、信頼性高く正確にリアルタイム伝送し、観測、分析、フィードバックへの活用が可能な特性を活かし、Society5.0時代の多様なシステムへ応用していきたいと考える。

第4章

高ロバストなイメージセンサを用いた高効率生産性向上システム技術

4.1 はじめに

第4章では、周辺環境変化への耐性の強いイメージセンサを用いた高ロバストなセンシングシステムによる「高効率生産性向上システム」の社会実装、事業化について提案する。本システムの目的としては、高ロバストなセンシング結果を活用し、現在または将来の生産現場およびサービス業の現場において、生産性の改善と個人の行う高精度作業の高度化を実現することを可能とする。

ここで、周辺環境変化への耐性の強いイメージセンサを用いた高ロバストなセンシングシステムとは、作業を実施する様々なシーンで、所望の精度でデータ取得が可能な高精度なイメージセンサを用い(その一例として第2章で述べた「有機 CMOS イメージセンサ」を挙げることができる)、従来、正確な連続データ取得が不可能であった「現場全体の情報」と「各々の作業情報」と「個人の状態の情報」を、どのような条件下でも(状態変化が起こっても)正確な連続データとして取得できるセンシングシステムのことであり、本取得データを解析することで、現場の状態把握と今後の改善・進化すべき方向を導き出し、現場の生産性を改善することを目指す。

ここで、具体的な「高効率生産性向上システム」の事業戦略・技術戦略・知財戦略・財務戦略の内容については、神戸大学大学院科学技術イノベーション研究科の取り組みである「イノベーション・ストラテジー研究」において詳細研究を実施、非公開となる別紙「イノベーション・ストラテジー研究成果書」にまとめた。将来のビジネス化をにらみ、本稿では、事業戦略はじめ各種戦略の詳細については述べないが、高ロバストなイメージセンサを用いたセンシングシステムを構築、活用し、最大限に顧客価値を生み出すためには、ど

のような事業とするべきか、戦略に至るまでの外部環境分析、内部環境分析を中心に述べ、「高効率生産性向上システム」を事業化することで得られる社会的価値についての考察を行う。

本章の流れとして、まず、「高効率生産性向上システム」事業の概要、社会背景、他社取り組みについて説明する。その後、生産性向上に対する取り組みのマクロ環境を、外部環境分析により把握する。提案する事業を後押しする社会的・経済的価値、そして顧客価値についての分析を行うと共に、あらかじめ考慮しておくべき事項を明らかにする。次に、提案事業を継続して行った場合の事業価値を、内部環境分析を通じて判断する。最後に、事業の体制や技術力などの内部環境に対して、市場の変化を考慮した外部環境分析を行うことで、本事業戦略の競争力を確認するためのSWOT分析を行う。その後、技術戦略の方向性と財務戦略の分析結果概要を示し、まとめる。

4.1.1 「高効率生産性向上システム」事業の概要

日本生産性本部発表の「労働生産性の国際比較（2020年度）」によると、日本の「労働生産性」（＝GDP/就業者数）はOECD(Organisation for Economic Co-operation and Development：経済協力開発機構)は、加盟国37か国中26位と非常に低迷しており、1990年以前の生産性を取り戻すことは、各企業にとって大きな使命となっている[41]。

また、近年、少子高齢化が進み、実効労働人口が減少することによる生産現場における効率化が求められている。団塊世代の退職により、高度経済成長期に技術を立ち上げた人材、高度な専門性を持った人材を一気に喪失することによる、後継者技術の向上、「匠」技術・技巧の伝承の緊急性も高い。

さらに、2019年12月より全世界に広がったCOVID-19の影響により、工場の製造ラインなど密集状態での作業や、海外での工場立ち上げなどにおいて現場での指示ができない状況となり、少人数での効率アップと遠隔指示体制の立ち上げが必要不可欠となっている。

日常生活に目を向けると、デジタル・ネットワーク社会の発達により、各家庭や職場において、多くの情報や物品の入手が容易になったため、過去とは異なる水準で個人ニーズの実現が求められている。生産側にとっては、多様な個人ニーズに対応した製品開発が必要であり、工場での生産においても、大量汎用品生産から少量多品種生産への移行が進んでいる。

このような背景のもと、生産現場における、多様化への対応と、今まで以上に高効率な生産性向上の実現が求められている。

それぞれの現場においては、1900年以降、生産性向上の取り組みが継続実施されているところも多く、有効性も実証されている。しかし、ある一定の改善がなされたあとは、頭打ち状態となり、そこからの向上が難しいという課題も大きい。

そこで本事業提案では、生産性の向上を目指している現場に対し、「現場全体の情報」と「各々の作業情報」と「個人の状態の情報」を正確な連続データとして取得。これらの取得データの状態および相関を用いて、3つの可視化を実現、現場の現状把握と今後の改善・進化すべき方向を明確化するフィードバックを実施することで、高効率な生産性の向上、継続的な改善・進化を実現する。

ここで、本事業で実現する3つの可視化の視点を示す。

1) **現場課題の可視化**：現在、データ化できていないことで認識できていないが、可視化することで抽出・対策可能な課題があるのではないかとという観点。

2) **高度作業の可視化**：今まで、高精度な作業を数値化・データ化することが技術的に困難であったため、個人依存になっている部分があったが、高精度センシングにより、また個人の状態・知識・判断情報との連携により、可視化できる部分があるのではないかとという観点。

3) **潜在的課題の可視化**：現状の構成では起こるべくして起こっているが、複数事象の相関関係を明確化することで、潜在的な課題を可視化でき、職場に進化・高度化・変革を起こすことが可能なのではないかとという観点。

しかし、これらの実現のためには、現状市場に存在する可視化技術だけでは限界があり、有効な抽出ができない。また、3つの可視化の視点に合わせたデータ取得が行われていない。そこで、新たに、あらゆる環境変化の下でも、信頼性高く、高精度にロバストなデータを取得可能なイメージセンサを活用したセンシングシステムを開発、本システムを活用し、高効率な生産性向上を目指すためのフローの生成と取り組みを実施すると共に、高効率な生産性向上を実現するためのアクションを一気通貫、統括実施する組織を新規に立ち上げる。

本考察に至った背景に、現在、筆者が、有機CMOSイメージセンサという、従来のシリコンフォトダイオードを用いたCMOSイメージセンサとは全く異なる新しい構造のイメージセンサを開発しているということがある。本

イメージセンサは、構造的長を活かすことで、従来のイメージセンサと比較し、速度変化耐性、輝度変化耐性高く、環境変化の大きい状態下においても、高精度にロバストなデータを取得可能な長を持つ。また、様々な個人の状態情報を取得する上で、観測可能な波長の自由度も高い。この有機 CMOS イメージセンサを、従来イメージセンサが活用されている市場での性能向上に使用するだけでなく、新たな価値を生み出す環境下で活用、新たな機能のシステムを作りたいという思いをもっていたため、この新しい「高効率生産性向上システム」の創案となった。

ここで、図 4-1 に「高効率生産性向上システム」事業の取り組み概要の一例を示す。本例では、生産工場での高効率生産性向上への取り組みを示している。

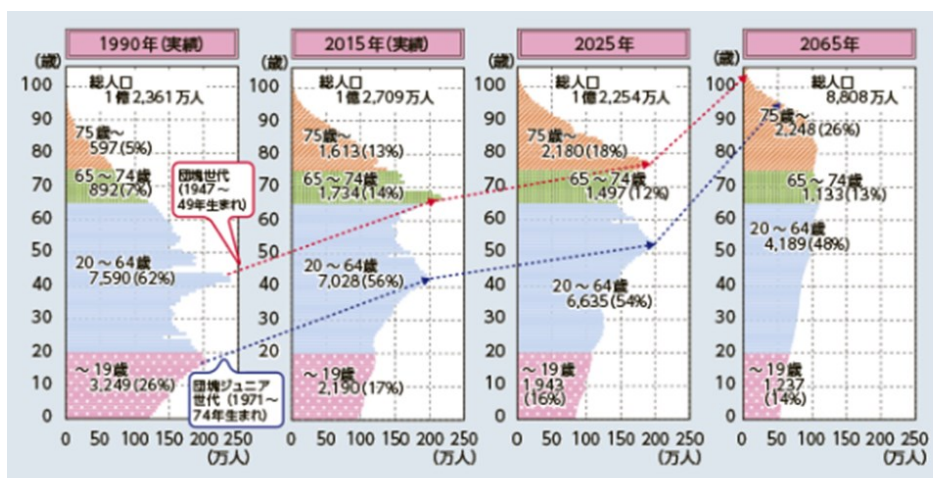


図4-1.「高効率生産性向上システム」概要の一例

「高効率生産性向上システム」事業化の価値(バリュー)は、短期的に、現場課題の可視化とその改善により生産性の向上を図ることができること。中長期的に、今まで数値化・データ化できなかった高度作業の可視化に基づき、個々の作業の高度化、目標の高度化を図ることができること。またその結果、生産性向上のゴールを高めることができること。さらに、複数事象の相関関係を明確にすることで潜在課題を明確化し、現場の働き方に变革を起こすことを可能とする点である。

4.1.2 「高効率生産性向上システム」事業提案の背景

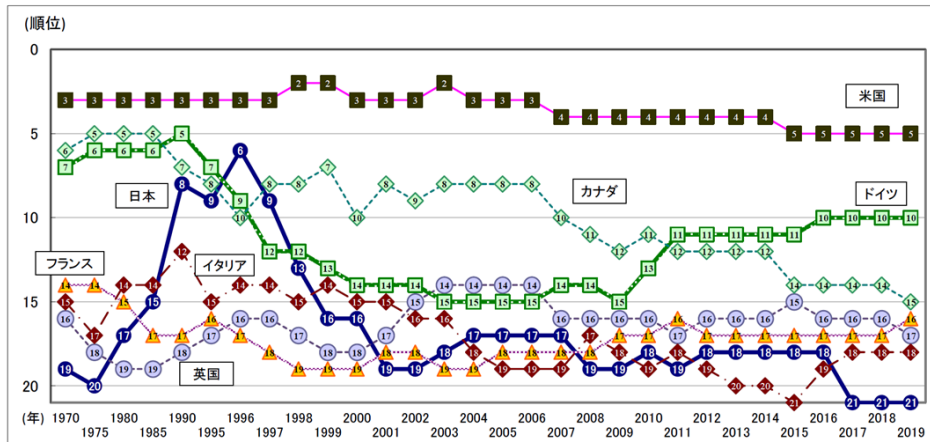
近年の社会情勢として、少子高齢化により、実効労働人口の減少により（図4-2）、生産現場における効率化、自動化への要望が高まっている[42]。また、団塊世代の引退により、後継者技術の向上、「匠」技術・技巧の伝承の緊急性も高い。また、COVID-19の影響により、少人数での効率アップと、遠隔制御技術の立ち上げが必要不可欠となっている。



出典: 厚生労働省「日本の人口ピラミッドの変化」

図4-2.少子高齢化と労働人口の減少

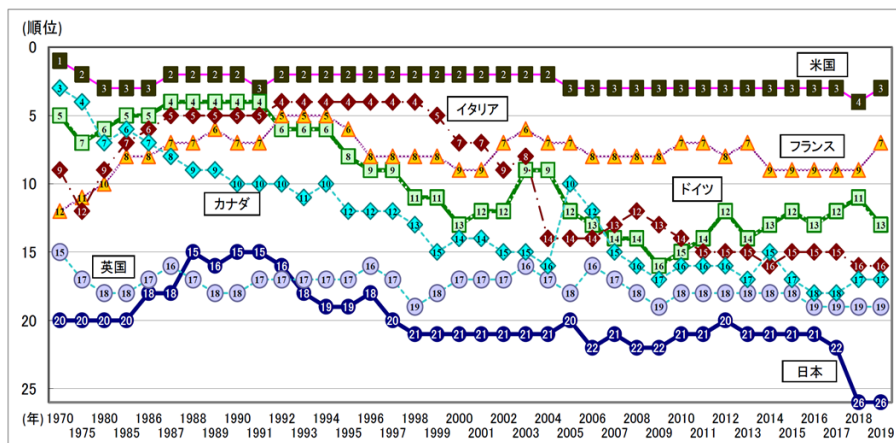
また、日本生産性本部発表の「労働生産性の国際比較(2020年度)」において、「経済的な豊かさ」を国際的に比較した、国民一人当たりの「国民総生産(GDP)」の日本の結果は、1996年のOECD加盟国37か国中6位から急激に低下、2000年以降は20位前後が定位置となっている(図4-3)。



出典：日本生産性本部「労働生産性の国際比較(2020年度)」

図4-3. 主要先進7か国の国民一人当たりのGDP順位の変遷

さらに、経済効果の指標として、より少ない労働力でより多くの経済効果を生み出すことが重要となる。その定量化指標の一つである「労働生産性」(=GDP/就業者数)の日本の一人当たりの労働生産性も OECD 加盟国 37 か国中 26 位とかなり低く、また、1991 年より常に下降傾向である(図 4-4)。



出典：日本生産性本部「労働生産性の国際比較(2020年度)」

図4-4. 主要先進7か国の就業者一人当たりの労働生産性順位の変遷

このような労働生産性低下の背景には、大きく2つの要因があると考えられる。

一つは、団塊の世代から後継者への技術の伝承がうまくいっていないことがある。労働生産性上位を実現している国々では、少子高齢化の危機感から早めの伝承が行われており、それを後押しする国策もあった。しかし日本で

は、ぎりぎりまで個人技術に頼った開発を行っていたため、結果、熟練者と若者の実力差を生み、製造業における技術の先細りを生んでいる。

また、もう一つの要因としては、日本産業が「サービス」事業の主導権を握れていないことがある。従来までは「モノ」売りを中心とした形態であったため、日本の強みでもある、モノづくり力で、「モノ」を高性能かつ高信頼性で作成する開発を行っていた。しかし、デジタル社会の進化により顧客要望が多様化し、今持っている「モノ」に付加価値を付与できる「コト」、「サービス」への要望が大きくなった。この段階で、日本の各企業は、まだまだ高性能化では負けないという自負があったがゆえに、また、その時点では利益が伸びていたため、事業方針の変革に出遅れた。特にGAFA(Google、Apple、Facebook、Amazon)などにソリューションレイヤで先行され、現時点においてもサービス、ソリューション分野でのイニチアシブを全く取れない状態となっている。

各企業は、このような労働生産性の停滞状態を見つめなおし、改めて停滞要因の解析、改善、さらに伸長するための取り組みを実施する必要がある。

ここで改めて、製造現場における、生産性向上の取り組みについて振り返りを行う。日本および世界の製造現場では、1900年ごろから、「現場改善」、「現場効率化」という名のもと、生産性向上のための多くの取り組みがおこなわれてきた。

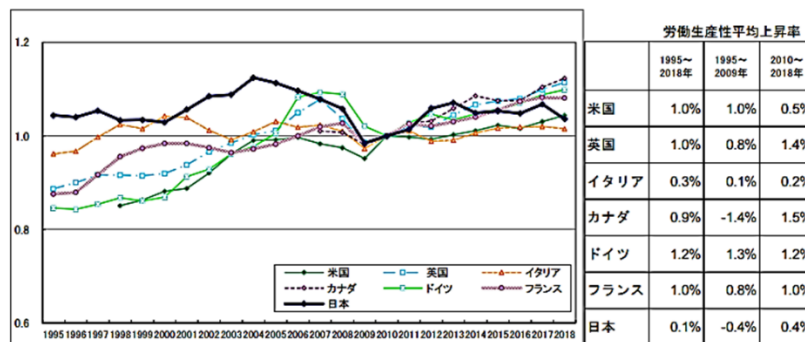
例えば、日本を中心に「5S」の取り組み、現場メンバーによる「改善アイデア提案」などがおこなわれてきた。また、トヨタ自動車では、「7つのムダ」など、「トヨタ式カイゼン」といわれる、あるべき姿実現のための改善取り組みが行われ、現在もその文化が続いている。IBMでは、部材調達の効率化、滞留部品在庫および仕掛在庫の削減に効果のある、ジャストインタイム方式「MRP生産管理パッケージ“COPICS(Communications Oriented Production Information and Control System)”」が用いられている。

このように、様々な現場改善、効率化への取り組みが行われてきたが、これまでの取り組みは、製造工程や製造環境を改善・向上するための取り組みであった。一方、それを構成する個々の作業状況(特に高度作業)や、個人の状態解析までは行われていなかった。また、近年増加傾向である少量多品種生産ラインにおいては、製造する対象物と生産量により作業が日々変化することから、各ラインの環境変化に加え、生産性向上まで行う余裕がなかったというところも要因と考える。このような背景から、全体最適化以上の効果が実現できていなかった。

本事業において、高精度なセンサを用い、正確なデータを取得・解析することに加え、新たに個々の作業状況(特に高度作業)や個人の状態の可視化を行うこと、また、個人作業・状態の全体生産性への貢献度を明確化することは、個人技術の高度化、作業目標の高度化の実現を可能とし、生産性向上、職場意識の向上に大きく貢献できると考える。

また、図4-5にサービス業の労働生産性変移を示す。サービス業の分野では、低価格競争、サービス競争が優先され、まだまだ労働生産性向上は進んでいない。そのため、本分野における労働生産性の改善、行動の変革、作業の高度化は、作業効率向上以上の効果を生み、人の行動に新しい価値を生み出す可能性がある。つまり、サービス業分野において、製造現場に続く、本事業応用展開の可能性があると考える。

さらに、各種労働やサービスに対し、ホスピタリティの高い日本での実績をよき一例として、「働き方パッケージ」という形態で、働き方・意識改善が今まさい行われている、またはこれから行われる国々をターゲットとした世界展開も可能であると考えられる。



出典: 日本生産性本部「労働生産性の国際比較(2020年度)」

図4-5. サービス業の労働生産性変移

ここで、情報を取得するためのデバイス：イメージセンサ(イメージセンサ搭載カメラ)についても述べておく。イメージセンサに求められる要望は年々変化し、近年は、対象物を正確に、臨場感高く映す「イメージングデバイス」としての性能だけではなく、様々な情報を正確に取得するための「センシングデバイス」としての機能・価値提供が求められつつある。

第1章で述べたように、イメージセンサ技術は、CCD(Charge Coupled Device)方式を用いた高感度な撮像を可能とした時代から始まり、2000年以降、低コスト、低消費電力、かつ、汎用プロセスを用いることによる後段デ

デジタル回路との融合が可能な CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 方式へ移行。さらに近年は、高解像度、高速、低ノイズ、高飽和特性などのセンサ性能そのものが著しく進化している。さらに、裏面照射 (BSI: Back Side Illumination) 型のセンサ構造や、高速・高機能化が容易となるチップ積層技術、有機薄膜など従来のフォトダイオードとは異なる光電変換材料を用いることで光電変換特性の制御が可能となるセンサなど、従来とは異なるデバイス構造のセンサ技術開発も進んでいる。市場においても、補助光なしでの暗時撮影、大型パネル検査や広域監視のための高解像度撮影、現場でのリアルタイムフィードバックの要望など高性能センサへの要望は継続して高い。

言い換えれば、近年のイメージセンサの性能が大きく向上し、様々なシーンにおける情報収集能力が十分なレベルとなってきた今だからこそ、「超高精度な情報収集デバイス」としての活用に高い期待が生まれており、今回の事業化提案においても、高精度化な情報収集を連続して行えるデバイス開発は基幹技術となる。

4.1.3 「生産性向上」他社の取り組み

4.1.2 項でも少し述べたが、生産性向上に対する、日本および世界での様々な取り組みについて示す。日本および世界の製造現場では、1900 年ごろから、「現場改善」、「現場効率化」という名のもと、生産性向上のための多くの取り組みが行われている。

例えば、日本を中心に「5S」の取り組み、現場メンバーによる「改善アイデア提案」などがおこなわれている。「5S」とは、Seiri (整理)、Seiton (整頓)、Seisou (清掃)、Seiketsu (清潔)、Sitsuke (躰) という S から始まる 5 つの言葉で構成される、日本の製造業界を中心に誕生した概念で、製造業に限らず、多くの会社が、現在においても取り組んでいる行動規範となる。不要なものがなく (整理)、いつも決まった場所にもものが置いてあり (整頓)、掃除が行き届いている現場では、工具や部品、材料を探し回る手間や時間を少なくでき、また活動しやすく (清掃)、誰もが気持ちよく、安心安全に (清潔)、最適な手順を用いて活動できるため (躰)、行効率改善の向上が期待できる (図 4-6)。



図4-6. 5S活動

「改善アイデア提案」とは、まさにその現場で働く、新人からベテランまでの各作業員が、毎日の行動の中で改善すべきアイテムを1つ1つ提案し、実行、効果あるものは取り入れていくという、地道な現場環境改善活動である。会社によっては「100提案」「創意工夫提案」活動などといわれている。現場で働く作業員自らのアイデアを積極的に取り上げることにより、職場でのコミュニケーション向上、モチベーションを高めることの可能な仕組みとなるため、職場の雰囲気改善、成長スピード向上にも貢献する。

トヨタ自動車では、「トヨタ式カイゼン」といわれる、「あるべき姿」実現のために3つのレベルを定義した改善取り組みが行われ、現在もその文化が続いている。レベル1:標準がある、レベル2:標準通りにできる、レベル3:常に標準が進化している、と3つのレベルの基準を設け、自分たちがどのレベルにいるのか、立ち位置を明らかにするところから取り組みを始める。現場業務の手順やあるべき姿や明確化し、その実現のための課題を明確化することの重要性を、日々の活動の中に叩き込んでいる。また、現状の維持だけでは進化、飛躍はないため、さらなる進化を目指し、現場と指示者が標準の状態を常に共有すると共に、問題点の把握・目標の設定・目標の達成・組織の進化というサイクルの完成を目指す。

また、「7つのムダ」という取り組みも行われている。企業のものづくりにおいては、多様化する市場ニーズに応えながら収益性を高めるために、業務を徹底的に効率化することが必要不可欠であり、そのために、付加価値を生まないムダの徹底的な排除を目指す。この付加価値を生まないムダについて、トヨタ生産方式では、①加工のムダ、②在庫のムダ、③造りすぎのムダ、④手待ちのムダ、⑤動作のムダ、⑥運搬のムダ、⑦不良・手直しのムダの7つをまとめ、「7つのムダ」と定義している(表4-1)。これらのムダをなくすために、日々議論がなされている。また特に、最悪のムダと定義されて

いる③造りすぎのムダについては、設備故障や不良などに対して安心感を得るため、ものを過剰に生産しがちであるが、売れない可能性を持つものが在庫になると、運搬車の増加、倉庫・保管スペースの増加、管理工数の増加と、どんどん新たなムダが発生し続け、キャッシュリスクとなるため、原価が継続的に下がる体質にはなれないとの考え方である[43]。

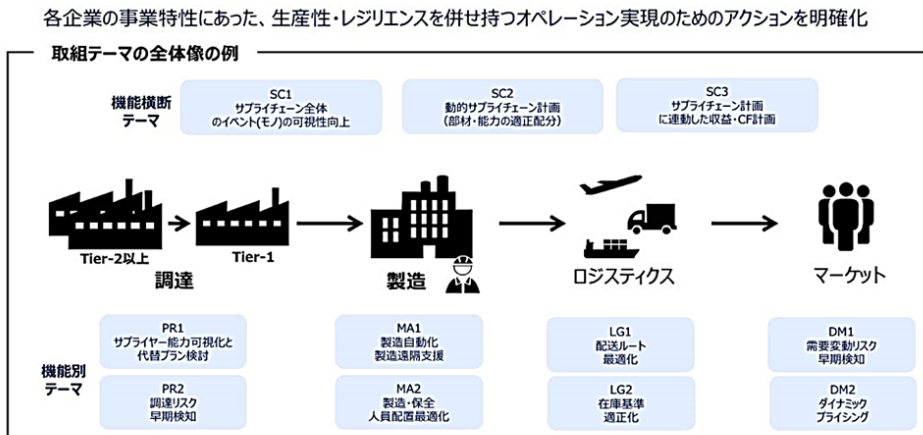
表4-1. 7つのムダ

	TOYOTA 7つのムダ	ムダの内容
1	加工のムダ	必要ない工程がないか？従来踏襲で最適化されていない工程はないか？
2	在庫のムダ	完成品・部品・材料が倉庫に保管され、使われていない状態はないか？その在庫に意味があるか？
3	造りすぎのムダ	その時点で必要ないものを余分に造っていないか？ ★安心感のために余分に造ることは、一番悪いムダである。
4	手待ちのムダ	工程間の連携は順調か？作業待ちが発生していないか？
5	動作のムダ	付加価値を生まない動きはないか？探す・調べる・持ち替えるなど。
6	運搬のムダ	必要以上の移動がないか？
7	不良・手直しのムダ	不良品の手直しが発生していないか？作業は標準化されているか？

また、IBM では、生産性向上を、作業時間の短縮ではなく、「製造イノベーション」と位置付け、自社での「働き方改革」の実施と共に、40年前から、他社へのコンサルティング、部材調達作業の効率化、滞留部品在庫および仕掛在庫の削減などに効果のあるジャストインタイム方式を実現する「MRP (Material Requirements Planning: 資材所要量計画) 生産管理パッケージ “COPICS (Communications Oriented Production Information and Control System)”」の販売を行っている。一般的な生産管理システムでは、構成部品表(BOM: Bill Of Material)を使って製品を構成する部品の必要数量を算出するが、MRP システムでは、部品数量だけでなく各構成部品の手配時期も含めて展開計算をする。結果、必要なタイミングで必要な部品のみ入手を実現、無駄な在庫をなくすことができる。この取り組みは、「稼働の見える化」ともいえ、例えば「調達」「製造」「ロジスティクス」「マーケット」といったオペレーション毎の対応能力の可視化と課題発見時の代替プランの準備を可能とする(図 4-7) [44, 45]。

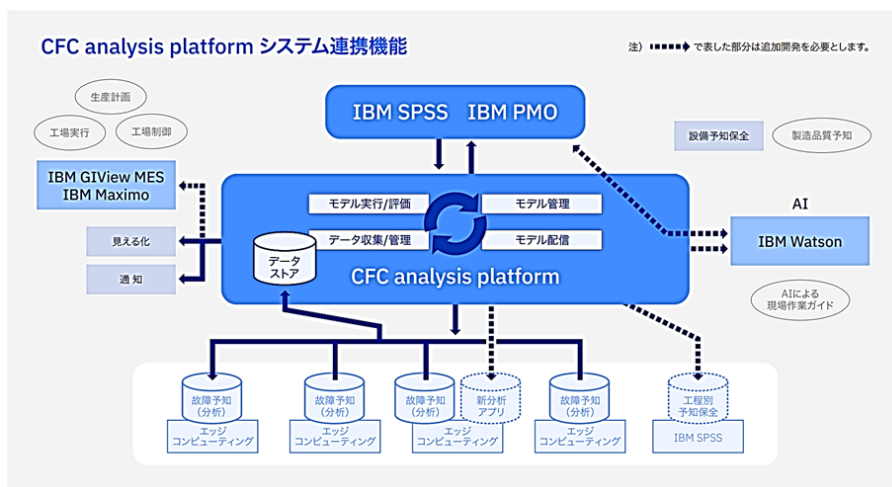
また、近年の IBM の新たな取り組みでは、IT や AI 学習を活用して様々な外部情報をクロージングしながら早期にリスクを検知、機能の最適オペレーションを実現している(図 4-8)。さらに、本活動強化のため、ここ数年「クラウド」「データアナリティクス」「AI」「デジタルマーケティング」分野について積極的に買収を行っており、販売・調達・生産・会計など企業のビジ

ネスプロセスの可視化と再構築を行うためのプロセスマイニングツールを開発、自社サービスに組み込む取り組みも行われている。



出典: IBM HP

図4-7.生産性向上のためのオペレーション最適化(IBM)



出典: IBM HP

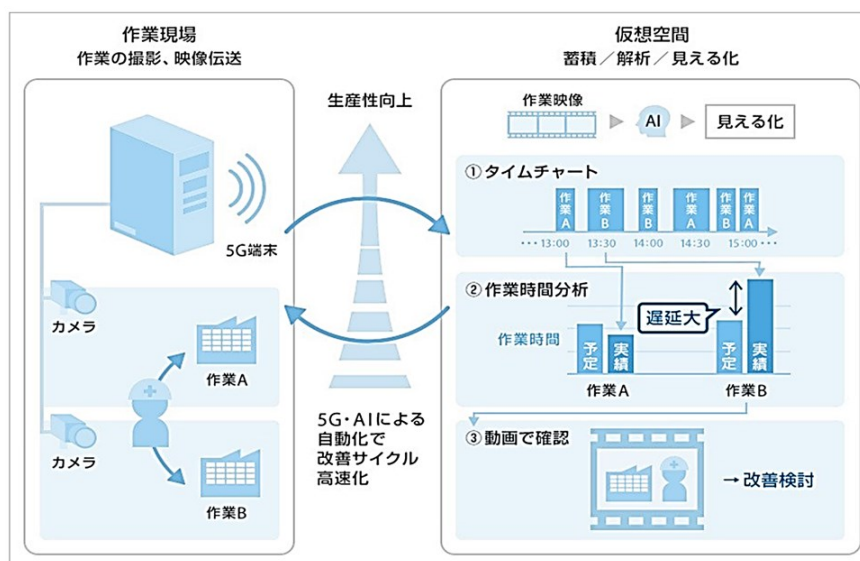
図4-8.生産現場における各装置稼働の見える化(IBM)

2020年頃からは、ローカル5G(第5世代移動通信システム)の拡がりもあり、住友電工や三菱電機において、データ伝送の低遅延と多数同時接続が可能な特性を有効活用、工場稼働全体を監視するスマートファクトリへの取り組みも開始されている(図4-9、図4-10)[46, 47]。



出典: 三菱電機Biz Timeline

図4-9.ローカル5G活用によるスマートファクトリーの実現(三菱電機)



出典: ZD Net Japan

図4-10.ローカル5G活用によるスマートファクトリーの実現(住友電工)

このように、様々な現場改善、効率化への取り組みが行われており、近年では、現場のデジタル化・DX化も進みつつある中で、ある一定の効果も出つつある。その一方で、取り組みの主目的は、現場全体の平均的な生産性向上に対する改善取り組み、またそのための作業効率向上となっており、本事業における新たに取り組むこととなる、個々の作業状況(特に高度作業)や個人の状

態の可視化への取り組みへの着眼はまだ見られない。この点から、本事業の取り組みにより、個人技術、作業のさらなる高度化を可能とし、今までよりも最終目標高く、高効率な生産性向上を行うことは現場改善・進化、個人の技術・意識改善に大きな意義を持つと考える。

4.1.4 「高効率生産性向上システム」社会実装時の課題

ここで、4.1.2項、4.1.3項で述べた社会背景、他社取り組みのもと、4.1.1項で述べた「高効率生産性向上システム」事業を新たに開始、社会実装しようとする、以下3つの課題が発生することが想定される。

「課題①」 センサ性能の課題

カメラシステムを用いたセンシングにより現場の情報取得を行う場合、現在のセンサ技術では、環境変化が大きい条件下では、連続した高精度データが取得できず、データ欠損などが発生するという課題が生じる。

「課題②」 生産性向上システムの課題

現在実施されている生産性向上の取り組みにおいては、現場全体の生産性が優先され、個々の作業(目標)の高度化、そのための高精度な作業情報の取得、解析、フィードバックが十分にできていない。

「課題③」 取り組み主体の課題

生産性改善を実施しようとした場合、主体的に実行をする組織が存在しない。従来、イメージセンサ開発(デバイス開発)、センシングシステム開発、データ処理、また、生産性向上を行う現場は各々別であり、生産性向上ソリューションとして一括で実行する部隊がなかった。そのため、現場で真に求められるフィードバックが実施できておらず、また、各々の現場のノウハウが相互に活用されていなかった。

「高効率生産性向上システム」事業化に向けて、まず、これら3つの課題に取り組み、社会実装を進めていく。

4.2 事業戦略：外部・内部環境分析

次に、今回提案を行った高精度イメージセンサを用いた「高効率生産性向上システム」事業に対する妥当性、優位性の確認のために、外部環境分析および内部環境分析を行う。

ここで、4.1.4項の社会実装時の課題への取り組みは、本事業において基軸となる取り組みであるため、外部環境分析・内部環境分析においては、これらの取り組みの実施を前提としたうえでの分析とする。

4.2.1 外部環境分析：PEST 分析

提案する事業を後押しする社会的・経済的価値、そして顧客価値についての分析を行うと共に、あらかじめ考慮しておくべき事項を明らかにするために、外部環境分析である PEST 分析を行った(表 4-2)。

まず、社会課題として、少子高齢化が進み、実効労働人口が減少、生産現場における自動化、効率化が求められている。団塊世代の退職により、高度経済成長期に技術を立ち上げた人材、高度な専門性を持った人材を一気に喪失することによる、後継者技術の向上、「匠」技術・技巧の伝承の緊急性も高い。さらに、2019年12月より全世界に広がった COVID-19 の影響により、工場の製造ラインなど密集状態での作業、海外での工場立ち上げなどにおいて、現場での指示ができない状況となり、少人数での効率アップと、遠隔指示体制の立ち上げが必要不可欠となっている。

また、デジタル・ネットワーク社会の発達により、各家庭や職場において、多くの情報や物品の入手が容易になったため、過去とは異なる水準で個人ニーズの実現が求められている。生産側にとっては、多様な個人ニーズに対応した製品開発が必要であり、工場での生産においても、大量汎用品生産から少量多品種生産への移行が進んでいる。

このような中で、人による作業の自動化(機械への置き換え)が大きく推進される一方、自動化にかかるコスト面から、また、少量多品種生産時の短期間での最適化の困難さから、まだまだ多くの作業工程において、人による作業が推進されている。また、将来的にも、特に高精度な作業において、一定量の人による作業が残ると考えられる。

本事業提案は、現場全体と各々の作業の両方の可視化、相関の可視化を行った状態で生産性向上を図るため、上記社会課題である自動化(機械による

汎用作業)および人による高度作業の生産性向上の両方に貢献できると考える。また、今後、人がすべき作業のさらなる高精度化が求められるようになると考えられる中で、個人作業、高度作業に注目した可視化は、今以上に重要度が増すと考えられる。

次に、経済的視点においては、日本の、経済効果の指標となる一人当たりの「労働生産性」がOECD加盟国37か国中26位と非常に低迷しており、国家においても、各企業においても生産性向上が求められている。それを受け、各社、生産性向上の様々な取り組みを開始しており、CPS(Cyber-Physical System)の活用や、作業の「自動化」「最適化」の観点から、IoT(Internet of Things)、ビッグデータ、AI(Artificial Intelligence)、ロボットなどへの投資が進んでいるといわれている。一例として、ここ数年、住友電工や三菱電機では、ローカル5G(第5世代移動通信システム)を活用した、工場稼働全体を監視するスマートファクトリへの取り組みを開始させている。また、IBMでは、一般的な生産管理システムを用い、構成部品表(BOM: Bill of Material)を使って製品を構成する部品の必要数量を算出するだけでなく、IBM主導のMRP(Manufacturing Resource Planning)システムを用い、部品数量だけでなく各構成部品の手配時期も含めて展開計算を実施。結果、必要なタイミングで必要な部品のみの入手を実現、無駄な在庫をなくすことを目指している。さらに、近年の新たな取り組みとして、IT(Information Technology)やAI学習を活用して様々な外部情報をクロウリングしながら早期にリスクを検知、個々の機能の最適オペレーションの具現化している。

このように、様々な現場改善、効率化方式への取り組みが行われているが、従来、また、現在の他社の取り組みは、現場や工程に対する改善取り組みを主目的に据えており、それを実現する各作業や各作業をつなげた一連の動き、作業を行う個人の状態との連携までは実現されていない。それに対し、本事業提案では、現場全体の生産性向上に加え、各個人の作業生産性の向上をはかることにより、当初目標よりもさらに伸ばした生産性向上目標を設定できる可能性をもつ。

また、海外の経済に目を向けると、中国・東南アジアなどでは、COVID-19の影響はあるが、需要に大きな伸びがあり、そのような経済状況の中で、現場の生産性向上への意識が今後必要とされる市場が存在する。日本における高品質な生産性向上システムをモデルケースとし、将来的に、海外への事業展開も考えられる。

政治面においては、内閣各省より、種々の取り組み指針が出されており、各企業の取り組みを後押しする。

総務省から発信された「未来投資戦略『Society5.0』『データ駆動型社会』への変革」においては、日本は、大学・研究所などの研究開発能力、企業の優れた技術力、ポテンシャルの高い人材、ものづくり現場から得られる豊富で精度の高いリアルデータを持っているものの、経済社会システムの革新や、新ビジネスの創出を戦略的かつスピード感をもって活用できているとはいいがたく、今のままでは、国際競争の大きな潮流の中で埋没する。その危機感を持ち、現場のデジタル化と生産性向上を徹底的に進め、少子高齢化、エネルギー・環境制約などの社会課題を解決できる持続可能でインクルーシブな経済社会システム「Society5.0」を実現できる取り組みを行うことを推奨している。特に、「人材が変わる」という項目もあり、従来行ってきた単純作業や反復作業はロボットが実施、人は多様なリカレント教育とデジタル技術を活用した個別学習を行うことにより、活躍する場を飛躍的に広げ、個々の人材が各々のライフスタイルやライフステージに応じて最も生産性を発揮できる働き方を行うことの推奨がうたわれている。

経産省から発信された「生産性向上特別措置法」においては、近年のIoT、ビッグデータ、人工知能など、ICT(Information and Communication Technology)分野における急速な技術革新の進展に対応し、日本が世界に先駆けて「生産性革命」を実現するための指針が示されている。また本指針においては、特に、中小企業も新しい製造装置を導入し、データ化を推進していくことを推奨しており、今まではコスト的に取り組みが困難であった、生産のための装置の刷新、生産性向上のための取り組みへの費用負担が軽くなる仕組みとなっている。

厚生労働省から発信された「働き方改革」においては、個人のライフワークバランスを考えた指針となっている。本指針は、個人の健康と生活を一番に考えたものであるが、個人の身体と心の充実のためには、仕事と生活両方の充実が必要になる。その点においても、短時間で、高効率に、モチベーション高く仕事をこなし、会社・社会に貢献するという、「真の生産性向上」への取り組みが必要になると考える。

このように、政府の様々な方針は、今回の事業取り組みと同一の方向を目指しており、近年大きく進化しているデジタル技術を積極的に活用し、会社・社会への貢献と個人満足度を共に高める「真の生産性向上」への取り組みを進めていくことが重要と考える。一方、経済面でも述べたように、各社が生産性向上に対しての取り組みを行うため、同一の目的を実現するための同志で

もあり、また、外部展開を始めた場合には、コンペティタともなりうる。

技術的には、近年の、裏面照射型イメージセンサやチップ積層型イメージセンサの開発による高速化、低ノイズ化の実現、フォトダイオードではない有機薄膜など他光電変換材料を用いたセンサによる高機能化の実現、ToF (Time of Flight) などの測距技術進化など、センサ・センシング技術の向上があげられる。また、5G・6G(第5・第6世代移動通信システム)規格に沿った高速通信技術の進化による低遅延・大容量データ通信の開始による、リアルタイム制御も可能になりつつある。さらに、IoT/IoE(Internet of Things/Internet of Everything)発達による大容量データ蓄積環境も充実し、CPS(Cyber-Physical System)やデジタルツインなどの検討が容易に可能となっている。このような技術進化に伴い、社会課題、経済的要望を実現可能な高精度センシングシステムを構築できる可能性が高まってきている。

一方、現状のイメージセンサによる撮像においては、大きく輝度の変わる環境においてデータ欠損が発生するなど、実シーンにおいて不足となる性能もあり、今後の事業対象に応じた技術開発の必要性がある。

また、人の行動や健康モニタリングの観点から、日常生活におけるバイタルモニタに使用されている、スマートウォッチやスマートフォンと連携したウェアラブル機器の急速な発達がある。現在は、カメラによる情報取得を主に検討しているが、今後カメラがウェアラブル機器と統合される、複数のセンシング手法を融合することでより高機能になる可能性もあり、継続的な市場トレンドのウォッチが重要と考える。

最後に、総合的判断を行う。生産性向上にむけ、取り組む社会的・経済的意義は高く、また技術的にも、各分野の技術が共に伸びてきている中、機能実現の可能性は高いと考えられる。また、事業展開性という観点でも、複数事業への展開可能性があり、さらに、日本で立ち上げたのち、新たに成長著しい海外市場への展開可能性も持つ。これらのポイントは、本事業にプラスに働くと考える。一方、政府指針の下、各社取り組みを行うため、コンペティタが増加する可能性がある。また、データ取得の手段において、小型ウェアラブル機器の進化があり、有効なデータとは何か、そのデータをどのように取得すべきかは、常に考慮・進化させていく必要があると考える。これらのポイントは、本事業にマイナスまたは今後の検討が必要な項目となると考える。

結論として、生産性向上に対する社会的需要の大きい中で、今後の市場変化に応じての進化は必要であるが、現場可視化、高度技術の可視化、および、取得したデータそのものに価値を感じ、現在および将来に対する投資と、本

事業の必要性を感じていただける市場は存在すると考える。

表4-2. PEST分析

解析項目	有利な環境	不利な環境
Politics(政治)	・総務省「未来投資戦略Society5.0 データ駆動型社会への変革」 ・経産省「生産性向上特別措置法」 ・厚生労働省「働き方改革」	・政府指針の下、各社取り組みが 盛んになり、コンペティタが増加
Economy(経済)	・日本の労働生産性26位と停滞 (中国・東南アジアなど成長著しい) ・IoT・ビッグデータ・AI・ロボット市場が 急激に成長	・各社 IoT・ビッグデータ・AI・ロボット 関連に投資を行い、技術成長、 コンペティタの増加
Society(社会)	・少子高齢化で労働人口不足 ・COVID-19で効率化・遠隔制御必要 ・個人要望の多様化が進む	・COVID-19対策で、遠隔支援企業 (スタートアップ含む)増加
Technology(技術)	・イメージセンサ技術の向上 ・高速通信(5G,6G)の進化	・スマートウォッチ・ウェアラブル機器の進化 ・多数のセンシング手法の開発が進む

4.2.2 内部環境分析：VRIO分析

次に、当事業の持続可能性を確認するために、内部環境分析である VRIO 分析を行った。

表 4-3 に示すように、まず、経済価値 (Value)としては、現場全体における課題に基づく視点と、各々の作業の高度化の両面から生産性向上が図れる。結果、今までより個人間で作業のばらつき少なく、かつ、高い目標に対しての生産性向上が目指せる。この効果は、現在の経済活動において強く求められているものであり、大きな事業価値になりうる。

次に、希少性 (Rareness)としては、可視化を実現するためには、取得・蓄積するセンシング精度が重要となる。ここで、一例として、現在技術開発を行っている「有機 CMOS イメージセンサ」では、グローバルシャッター機能と広いダイナミックレンジ性能を同時実現できる特長を活かし、輝度差や動作速度の大きく変化するシーンにおいても高精度なデータを、データ欠損なく、ロバスト性高く取得可能となる。このデータ精度は、他社センサでは実現できないため、希少性が高いといえる。また、センシングシステム観点においても、コストやセット規模などを無視すれば、複数のセンサを用意することで、類似のシステムを構築することは可能となるが、センサ間に視差が発生するなど、精度まで同一にすることは不可能であり、この点からも希少性が高いといえる。

模倣困難性(Inimitability)としては、本システムでは、技術知財、システム知財を先行的に取得するため、先行知財による参入障壁構築が可能である。また、データ分析、フィードバック部にノウハウが存在することになるため、他社が後発で開発を実施した場合には、同様事象の効果実現、課題対策には時間がかかり、先行の利が生じると考える。

組織(Organization)としては、高効率な生産性向上を目指すための統合的組織を新規に立ち上げることで、現場と連携した、現場に必要な生産性改善活動が実施できる。また、同一部門が複数事業を行うことで、ノウハウの蓄積が可能となり、複数事業の同時立ち上げ・遂行を可能とする。

表4-3. VRIO分析

視点	状況	内容
Value (経済価値)	⊕	・全体最適化に加え、従来マニュアル伝達、口承であった作業の可視化を行うことで、現場と作業の両面から生産性向上が図れる。結果、今までより個人ばらつき少なく、高い目標の生産性向上を目指す。
Rareness (希少性)	⊕	・グローバルシャッタ機能と広ダイナミックレンジ性能による欠損のない正確なデータ取得が可能のため、他社では同一精度は実現できない。 ・コストやセット規模などを無視した場合、複数センサ活用などで類似システムの模倣は可能。ただし複数センサ間で視差が発するため、精度では劣る。
Inimitability (模倣困難性)	⊕	・コア技術に関して参入障壁となる特許群を取得、侵害することなしに模倣は困難。 ・データ解析に関し、先行開発によるノウハウ蓄積により、他社での実現には時間がかかる。
Organization (組織)	○	・高効率な生産性向上を目指すための統合的組織を構築することで、現場に真に効果的な生産性改善が図れる。また事業展開のためのノウハウ蓄積が可能となる。

4.2.3 競争力分析：SWOT分析

最後に、社内の体制や技術力などの内部環境に対して、市場の変化を考慮した外部環境分析を行うことで、本事業戦略の競争力を確認するためのSWOT分析を行った。

表4-4に示すように、内部環境として、イメージセンサ技術、カメラ開発技術、ソフト開発技術、各々の基本技術力は高い。一方、生産性向上事業において必要となる、イメージセンサに求められるスペックから現場へのフィードバックまでを一気通貫統括で行う組織は現時点存在しない。ただし、4.1.4項で示したように、新規に統合組織の構築を行うことで、現場と連携した生

産性改善活動が実施でき、また、同一部門が複数事業を行うことで、ノウハウの蓄積が可能となり、複数事業手の展開が可能となる。一方、本事業の一番の差別化ポイントは、いかに効果的な解析を行い、可視化し、フィードバックを行うか、顧客価値を生み出すかの手法構築である。本事業戦略では、この部分に強みをもつように差別化を図っていく必要がある。

外部環境としては、PEST分析でも述べたように、政治的、経済的に実現要望の高い状態であり、市場機会は大きいと考える。一方、脅威としては、IBM、住友電工、三菱電機などが組織および装置の連携稼働の可視化による効率化を行っている点があげられる。現時点、これらの会社では、全体最適に主眼を置いており、高精度作業の再現などは実施されていないため、本事業の効果・競争力は高いと考える。ただし、将来的に、人に求められる作業がより高精度化した場合には、自社の生産性向上の取り組みだけでなく、他社の生産性向上コンサルティングを行っている IBM や、他社に生産・加工装置を統合的システムとして収めている KEYENCE といった企業が、同様のサービスを始める可能性があると考えられる。また、サービス・ソリューションレイヤでの先導・推進力を持つ GAFA (Google, Apple, Facebook, Amazon) なども、近年、家庭内機器と連携した個人データの取得に乗り出してしており、現時点はプライベート動作中心の事業展開をおこなっているが、将来的に生活・産業のあらゆるシーンへ事業領域を広げてくることも考えられる。

最後に、総合的判断としては、我々は、社会・市場の求める生産性向上要望に対し、高い技術力(高精度なセンサ技術と効果的な解析力)と新たな統合組織の構築を活かし、競争力のある事業推進が可能であると考えられる。その一方で、将来的には、今後の人の行動変革に対する社会要望の変化、種々解析技術の進化により、コンペティタの増加、新たな手法の社会実装が予測される。このような場合にも、常に市場において他社優位性のある地位を築き、顧客への価値を提供し続けるためには、先行開発の利を活かし、堅牢な参入障壁の構築と、多事業展開のナレッジを蓄積、実証・提示可能な仕組みづくりをしておくことが重要になると考える。

表4-4. SWOT分析

内部環境	外部環境
Strength (自社の強み)	Opportunity (市場機会)
<ul style="list-style-type: none"> ・各々の分野における差別化技術を保有しており、技術の融合が可能 ・イメージセンサ技術：広ダイナミックレンジ&グローバルシャッタ、波長拡張性 ・カメラ開発技術：BtoC, BtoBのカメラ技術 ・ソフト開発技術：BtoC, BtoBの制御ソフト技術 ・先行開発の利：ノウハウ蓄積 	<ul style="list-style-type: none"> ・Society5.0活動でCPS活用が進む ・クラウド活用が進む データをどう使うかは各社模索中 ・センサ、5G通信技術が進む ・少子高齢化の影響で効率化、自動化要望増 ・社会ニーズの多様化 働き方の多様化 ・COVID-19の影響でリモート、自動化要望増
Weakness (自社の弱み)	Threat (脅威)
<ul style="list-style-type: none"> ・イメージセンサ開発、カメラ開発、デバイス開発を、統括するチーム構築が必要 ・本サービスの社外展開先(顧客開発)検討必要あり ・現場、高度作業、作業連携の可視化技術の立ち上げ ・現場に最も効果のある解析手法、フィードバック手法の検討途上 	<ul style="list-style-type: none"> ・基本となるセンシング能力において、センサ性能向上 (物理限界、先行開発優位性は有) ・コンペティタは、個々のデバイスメーカーだけではなく、各社製造工場の取り組みと、IBMなどの生産性向上サポート企業、GAFAなどのソリューション推進企業

4.2.4 事業におけるコアコンピタンス

内部・外部環境分析的を通じ、社会・顧客に対し価値提案が可能であり、また継続的な事業価値を保持できると判断できた。

一方、今後の社会要望の変化時にも、常に市場において他社優位性のある地位を築き、顧客への価値を提供し続けるためには、先行開発の利を活かし、堅牢な参入障壁の構築と、多事業展開のナレッジを蓄積、実証・提示可能な仕組みづくりをしておくことが重要になることがわかった。

ここで重要となるのは、本事業は、事業規模や事業展開先を拡げること
で、大きく成長していくと考えているが、それと同時に、本事業の中核をなすコアコンピタンスを大きく変化させていく点が重要なポイントとなる。事業開始時には、特長技術となるセンサを用いたセンシングシステムが差別化ポイントでコアコンピタンスとなるが、事業立ち上げと共に、センシングシステムを用いて取得したデータと、このデータを用いた現場の可視化情報がコアコンピタンスとなる。また、事業展開に伴い、複数分野の複数現場で取得されたデータとそのデータを用いた解析アルゴリズムに加え、蓄積されたナレッジがコアコンピタンスとなる。このコアコンピタンスを強化することが、他社差別化となり、本事業の長期的成長につながると考える。

4.3 技術戦略

4.3.1 技術戦略の方向性

「高効率生産性向上システム」を支え、社会・顧客に新たな価値を提供し、また他社差別化を図れる基幹技術を構築するために、大きく6つの技術開発を行う。ここでは、その方向性のみを示す。

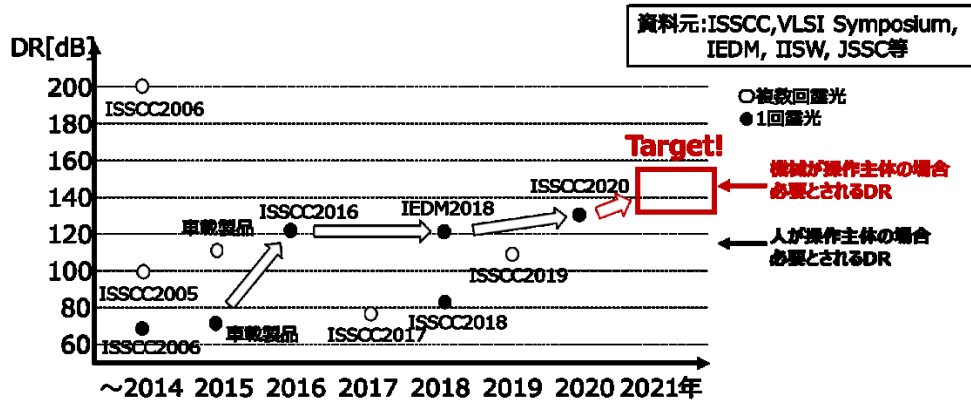
1点目は、他社には実現できない基幹技術として、現場のいかなる条件変化下においても正確にデータ取得が可能なセンサの開発を行う。

現場におけるデータ取得時、従来イメージセンサを用いてデータ取得を行った場合には、速度や輝度条件などが大きく変化した場合、また1つの撮像画面内に、複数輝度条件が存在する場合に、データの正確性の欠如や、データ欠損が発生するという課題が発生した。特に、直射日光が当たる箇所や、通路で影となる箇所では、従来のイメージング画像においては、白飛び、黒つぶれ状態となり、今回のようなデータ取得時には、データ欠損となった。また、反射状態の異なる部材作業時などにおいても、手元の正確な連続データを取得することが難しい状態であった。

そこで、高速撮像可能で、かつ、ダイナミックレンジの広い撮像の両立が可能な構成のイメージセンサの開発を行う。1つの手段として、従来のフォトダイオードを用いて光電変換を行うイメージセンサとはデバイス構造の異なる、有機薄膜を用いて光電変換を行い、電荷蓄積を行うシリコン部とは独立の積層構造とした有機CMOSイメージセンサがあげられる。有機CMOSイメージセンサでは、その構造的長を活かし、広ダイナミックレンジ性能とグローバルシャッタ機能を同時実現可能であり、また、構造上さらなるダイナミックレンジ性能を伸長するポテンシャルを持つ。基本技術については第2章に記載した内容となるが、輝度変化が大きく変化する現場での活用に十分な技術とするため、広ダイナミックレンジ性能の向上を目指す。

参考までに、ここ数年の自社・他社の広ダイナミックレンジ性能の進化と市場要望値を示す(図4-11)。センシング分野におけるダイナミックレンジ性能の伸長は市場要望も大きいため、各社、直近5年で大きく伸ばしてきている。今後、自動自律制御に用いられることも増える中で、さらなる性能向上が求められる可能性が高い。

CMOSイメージセンサのダイナミックレンジ性能

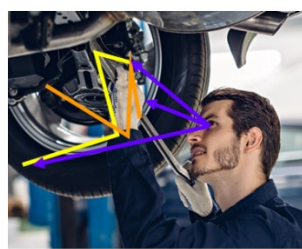


2点目は、1点目の取り組みで開発した高精度高ロバストなイメージセンサを用いて情報を取得するセンシングシステムの構築を行う。本センシングシステムにおいては、①現場全体の俯瞰データと、②各作業の連続データと、③個人の状態情報が取得できるようにカメラ(イメージセンサ)の配置を行う。特に高度作業、例えば、現在機械による自動化ができず、人による判定を行っている官能検査や、精密な仕上げ作業を、高精度センサを搭載したカメラを用いて、位置・動きをモニタする。

一例として、個人の身体、手、指、視線の動き・速度、作業時の判断、また、体勢、体動、顔の表情やバイタル情報から疲労度などの状態をモニタするためのセンシング技術を立ち上げる(図4-12)。



(a)作業時の体勢



(b)手・指や視線の動き



(c)疲労度

図4-12.作業状態の取得

本取り組みにおいては、実施場所および作業者の詳細なデータ取得を行うため、個人情報取得に対するプライバシー問題、各部を可視化することによるセキュリティ問題が付随する。この点に関して、本稿で詳細議論は行わないが、データ取得の目的と取り扱いの明確化を全員に徹底すると共に、実施

していることの明示、データの使用・管理方法に対する十分な対策が必要となる。

また、本センシングシステム開発において、機器間の自律協調制御技術も検討する。初期段階としては、各々の機器(センサ)でデータ取得を行い、工程、時間、作業者のフラグを付与しておき、“事後に”解析を行うことになるが、センシングシステム制御の進化として、データ取得と共に“リアルタイムに”機器間で通信を行い、相互制御を行う構成を検討する。指示者が入力したマスター制御だけでなく、ローカルの相互制御を行うことで、作業の無駄をなくすと共に、安全性の向上が可能になると考える。

そのためには、取得した大容量の情報の伝送を、センシング機器間、現場間で高速で行わねばならず、光通信技術および無線通信技術の開発が必要となる。また、センシング現場(例えば、工場)では、多くの機器で様々な電気信号が用いられているため、多様なノイズが発生する。これらのノイズの影響を受けない、高品質な通信を実現するためにも、光通信伝送は有力候補となる。光通信伝送に関しては、第3章に記載した光通信用トランシーバ技術を応用する。

3点目は、設置したセンシングシステムによって取得したデータの解析手法の開発である。特に、大量のデータを取り扱うことになるため、生産性の変化点(低下・伸長の両面)を的確に導き出すことが必要となる。各解析は、工程、時間、作業者に分けて実施し、類似の変化が発生している事象を探し出す。

図4-13に、実験環境下において測定した、生産性の変化とその要因解析の例を示す。解析事例1では、新しい作業開始時において10時台の生産性向上と16時以降の生産性低下が発生している。ここでは、個人作業の観察において、作業慣れの発生する、開始から数時間後の生産性向上と、反対に、作業が数時間続いたあとの複数作業者の疲労度向上が、生産性低下に影響を及ぼしていることが明らかになった。また、疲労が出てしばらくは、作業手順の汎用化が効果を奏し生産性低下は発生しないが、疲労の継続は作業遅延、集中力低下につながる事が明らかとなった。解析事例2では、経験が必要な業務において、各作業者の作業手順は同じであるが、生産性に差が発生した。ここでは、作業中の個人動作の複数の動き、例えば、視線・手の動きと、作業の完了の見極め判断の差により、効率差(動きロスの差)の発生が明らかとなった。

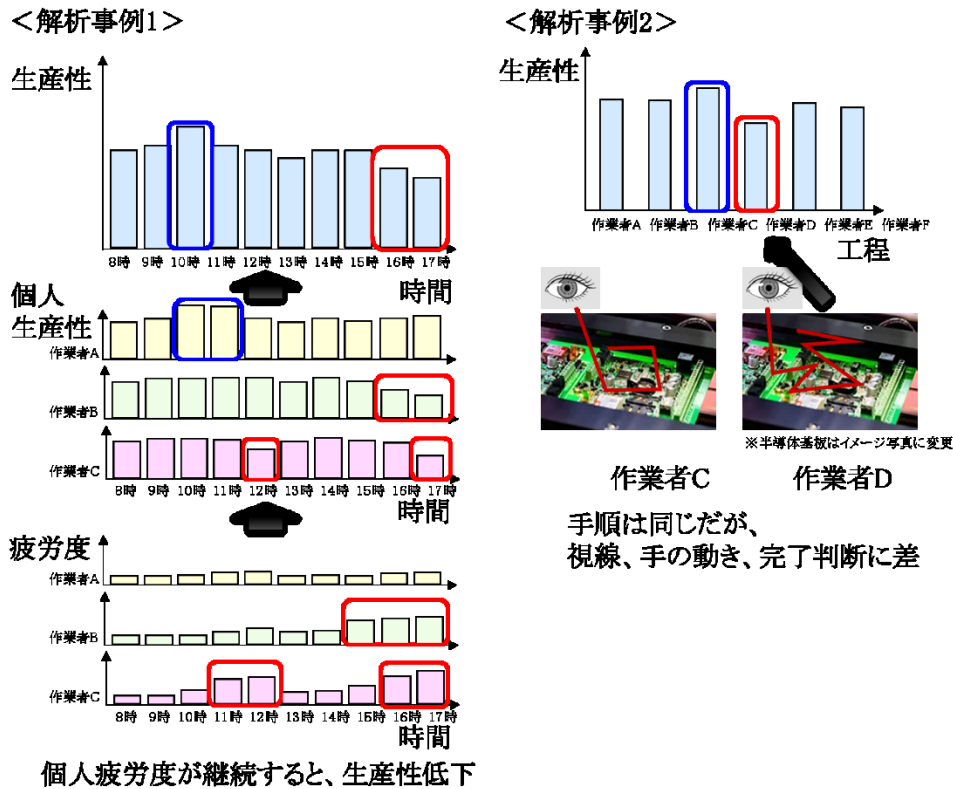


図4-13. 生産性変化とその要因解析の例

4点目は、可視化手法の開発である。現場自体が課題を認識、活用できるように提示できるかを重要視する。また、全体効率に対し、各個人作業がどのように関係しているか、各作業の貢献を明確化することにより、各作業員一人一人が自分事ととらえ、モチベーションを向上させることができるようにすることが重要であると考えられる。

5点目は、改善提案である。現場および各作業の生産性停滞の課題を明らかにし、現場へのフィードバック、具体的な改善提案を行う。

最後に、6点目は、複数場所、複数作業に対して取得したデータに対し、相関関係を、データ処理・AI解析を用いて解き明かし、潜在課題を発掘するための手法の開発を行う。

4.3.2 応用展開

対象現場において、一定の生産性向上取り組みが終わったのちも、組織と

しての継続変革を起こすことができる取り組みを継続することが重要である。

ここでの取り組みは、それまでの取り組みとは異なり、現状の各々の課題に対して、現場と作業の改善を目指すのではなく、1)現場の状態が変わった場合にも、あらかじめ課題を予測・対策できること、2)改善環境で作業を行うだけでなく、より良い姿を提案・実行できる組織の構築が目的となる。そのため、取得データとしても、現場の課題を抽出するだけでなく、新しい変革を実現するために、変革への取り組みを実施した場合のシミュレーションを事前に実施、または、仮想的に実施することで、事前予測を行う。

また、将来を考えると、自律ロボットと人の協働が当たり前になる時代がくると考えられる。このような場合、改善対策のフィードバック対象は、現場で働く作業員だけでなく、ロボットへの動作指示も必要となる。このようなフィードバックの実現により、現場の自動化が推進され、人はより高度な作業へシフトできる。また、相互にお互いの動作を理解できた状態で、最適な作業を遂行できるので、より安全で、ストレスフリーな仕事環境の構築を進めることが可能になると考える。

4.4 財務戦略

4.4.1 財務戦略

本章では、今回事業化提案した「高効率生産性向上システム」の事業戦略に基づき、大規模でかつ堅実な成長の見込まれる製造現場である対象事業1と、中規模であるが成長幅の大きいサービス業を行う対象事業2という、2分野の事業に対し、各々の想定事業数を仮定、この前提における損益計算書(P/L:Profit and Loss Statement)を作成、事業採算の妥当性を検証した。具体的内容・数字は「イノベーション・ストラテジー研究成果書」に記載、ここでは検討結果概要のみを示す。

対象事業別収益の年次推移を図4-14に示す。対象事業1ビジネスにおいては、プロフィットシェアによる寄与が最も大きくなっている。対象事業2ビジネスにおいては、生産性向上のためのコンサルティングによる収益が最も大きく、ついで、プロフィットシェア、サブスクリプションの順の寄与となる。

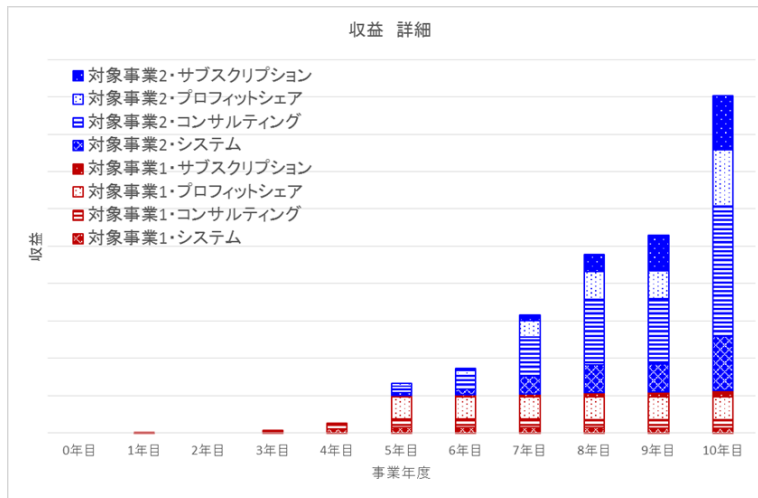


図4-14.収益詳細 (年次推移)

次に、対象事業別費用の年次推移を図4-15に示す。クラウド使用料を含めた共通費、ついで、対象事業2ビジネスのシステム費、解析費が大きくなっている。

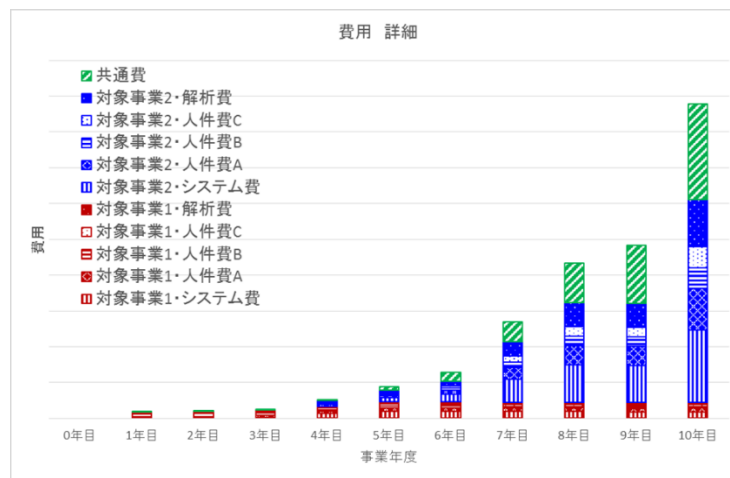


図4-15.費用詳細 (年次推移)

4.4.2 損益計算書(P/L)

事業戦略に基づいた想定事業数の展開を前提とし、損益計算書(P/L)を作成、それを元に求めた売上・当期損益・累積損益を図4-16に示す。

5年目より単年利益プラス、また、6年目より初期投資を回収し、累積利益プラスとなる見込みとなる。また、10年には、目標利益を達成できる見込みである。

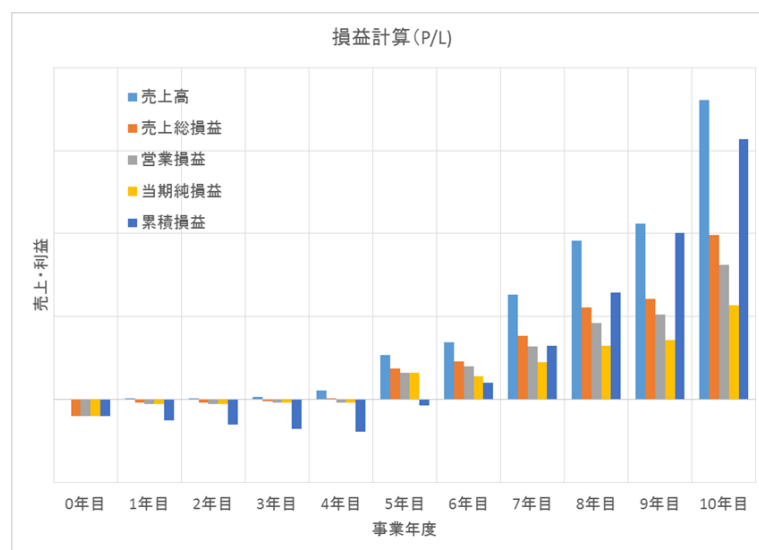


図4-16.売上・当期損益・累積損益

上記解析により、事業案件の順調な確保が得られる前提において、本事業の健全な成長性が見込まれることが示せた。

その一方で、今後の事業成長のためには、継続的な案件確保が必須となるため、また、さらなる拡大に向けて対象分野を拡げていくためにも、継続・新規顧客に提示していくための事業実績(生産性向上効果)の明確な提示に加え、システム費および解析費の抑制、多分野展開の効率UPなど、高効率かつ低コスト化の取り組みを実施していくことが必要となる。

4.5 まとめ

高精度センサデバイスを用いた「高効率生産性向上システム」開発およびその事業化についてまとめる。

「高効率生産性向上システム」事業では、高性能、高ロバストなイメージセンサを用い、高効率に生産性を向上することが可能なソリューションを提供することにより、現在また将来の生産現場およびサービス業の現場において、生産性の改善と個々の作業の高度化を実現、職場および個人の作業能力を最大化することを目的とする。

その中では、「現場全体の情報」と「各々の作業情報」と「個人の状態の情報」を正確な連続データとして取得。本取得データを用いて、現場課題の可視化、高度作業の可視化、潜在的課題の可視化の3つの可視化を実現、現

場の状態把握と今後の改善・進化するべき方向を明確化できるフィードバックを実施する。顧客バリューとして言い換えると、短期的に、現場課題の可視化とその改善により生産性の向上を図る。中長期的に、今まで数値化・データ化できなかった高度作業の可視化に基づき、個々の作業の高度化、目標の高度化を図る。またその結果、生産性向上のゴールを高める。さらに、複数事象の相関関係を明確にすることで潜在課題を明確化し、現場の働き方に改革を起こすことを可能とする。

また、高効率な生産性向上を目指すための統合的組織を新規に立ち上げる。生産性向上のための統合的組織を新規に立ち上げることで、現場と連携した、現場に必要な生産性改善活動が実施できる。また、同一部門が複数事業を行うことで、ノウハウの蓄積が可能となり、複数事業の同時立ち上げ・遂行を可能とする。

本事業の事業性、継続的成長性を判断するため、外部環境分析、内部環境分析を行った。結果、社会・市場の求める生産性向上要望に対し、新しい技術（高精度なセンシング技術、高速光通信技術、効果的な解析力、可視化技術など）と新たな統合組織の構築を活かし、競争力のある事業推進が可能であると判断できた。一方、将来的には、今後の人の行動変革に対する社会要望の変化、種々解析技術の進化により、コンペティタの増加、新たな手法の社会実装が予測される。そのような場合にも、常に市場において他社優位性のある地位を築き、顧客への価値を提供し続けるためには、先行開発の利を活かし、堅牢な参入障壁の構築と、多事業展開のナレッジを蓄積、継続・新規顧客に実証・提示可能な仕組みづくりをしておくことが重要になると考える。

また、事業戦略に基づいた想定事業数の展開を前提とし、損益計算書(P/L)の作成行い、事業案件の順調な確保が得られる前提において、本事業の健全な成長性が見込まれることを示した。

さらに、将来を考えると、様々な働く現場において人と自律ロボットの協働が当たり前になる時代がくると考えられる。この場合において、生産性向上のフィードバックが人とロボットの両方に実施されれば、現場の自動化が推進され、人はより高度な作業へシフトできる。また、より安全でストレスフリーな仕事環境の構築が可能になると考える。

また、本事業は、今後の海外(特に発展中の国々)での生産需要の伸び、生産性向上への取り組み途上という環境を考えると、各種労働やサービスに対し

ホスピタリティの高い日本での実績をよき一例として、「働き方パッケージ」という形態での展開も可能であると考える。

筆者は、本事業の推進により、「真の生産性向上」が実現できると考えている。各現場において、そこで働く作業者が中心という考え方が浸透し、高効率に生産性向上を実現する背景に、自分の行う作業がどれだけ会社・社会に貢献しているかを現場データに基づいて認識し、モチベーション高く仕事をこなす人材が仕事をしている姿がある。DXに裏付けされた、働く全作業者と働く環境の充実が、会社と個人の Win-Win の関係を構築すると信じる。

第5章

結論

5.1 本研究まとめ

近年の産業活動、生活のデジタル化、IoT化の中で、人に一番近いエッジ部で情報収集可能なイメージセンサのセンシング活用に対して要望が高まっている。また、近年のイメージセンサ特性の高性能化に伴い、高精度な情報収集に対して期待と要望がより高まっているといえる。一方、センシング性能という観点では、必要とされる現場での使用に対し、広ダイナミックレンジ性能、高速撮像性能などにおいて、さらなる性能向上要望がある。さらに今後、産業機械、ドローンや車など動体の自動自律制御が進化すると考えられており、データ取得と同時に、リアルタイムに信頼性高く、高速大容量伝送できることが必要とされる。今回の技術研究、事業化検討を通じ、これらの技術を進化させることは、大きな意義がある。

上記市場要望に対し、第1章では、近年のイメージセンサを取り巻く概要、および、イメージセンサ技術の進化と課題について紹介した。

第2章では、市場要望に対する課題を解決する高精度イメージセンサの有効な一方式として、有機CMOSイメージセンサの特長的なデバイス構造、および、その独自のデバイス構造を活かした技術開発について述べた。特に、ロバスト性の高いセンシングシステムを支える技術として、同時撮像時に120 dBを超える広ダイナミックレンジ性能を実現する技術と、画素面積や飽和電子数など、その他のセンサ特性を犠牲にすることなく、従来のシリコンCMOSイメージセンサよりも10 dB高い単位面積あたりの高飽和特性を実現しつつ、グローバルシャッタを実現する技術を実現した。

第3章では、低コストで信頼性高く、高速大容量通信が可能なギガビットクラスのEPONシステムの開発と、それを支える高精度な光通信用トランシーバ技術について述べた。新しい自動利得制御技術(AGC)と基準電圧発生器(RVG)の開発により、光受信器は、1.25 Gbpsのバーストモード伝送で-29.0 dBmの最小光感度と-2.2 dBmのオーバーロードで26.8 dBの広いダイナミックレンジを達成した。また、新しい自動光出力パワーおよび消光比制御(APC)

システムの考案により、光送信器は、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ の広い温度範囲で、光出力パワーと消光比それぞれの変動を $\pm 0.4\text{ dBm}$ および $\pm 0.6\text{ dB}$ のとても小さな範囲内に抑制可能とした。本システムで用いた光通信システムおよび光通信用トランシーバ技術は、高精度センシングシステムで取得した大容量情報の伝送時に、センシング機器間、現場間で、ノイズ耐性高く、高速データ通信を可能とする。また、機器間のリアルタイム自律制御の実現を支える技術となる。

第4章では、第2章、第3章で述べた技術を応用した、高ロバストなセンシングシステムを用いた新しいソリューション提案を行った。本事業提案では、変化の大きい環境下でも、高精度なデータを連続取得可能な高機能イメージセンサを用い、高効率に生産性改善を推進することを目的とする。本ソリューションの提供により、生産現場およびサービス業の現場において、現在または将来に向けての生産性の改善と個々の作業の高度化、作業能力の最大化を図る。その中では、現場課題の可視化、高度作業の可視化、潜在的課題の可視化の3つの可視化を実現、現場の状態把握と今後の改善・進化すべき方向性のフィードバックを実施する。また、本ソリューションでは、高効率な生産性向上を推進する統合的組織を新規に立ち上げる。統合的組織を新規に立ち上げることで、現場と連携した、現場に必要な生産性改善活動が実施できるようになる。また、同一部門が複数事業を行うことで、ノウハウの蓄積が可能となり、多事業の同時立ち上げ・遂行を可能とする。本事業の価値(バリュー)は、短期的に、現場課題の可視化とその改善により生産性の向上を図ることができること。中長期的に、今まで数値化・データ化できなかった高度作業の可視化に基づき、個々の作業の高度化、目標の高度化を図ることができること。またその結果、生産性向上のゴールを高めることができること。さらに、複数事象の相関関係を明確にすることで潜在課題を明確化し、現場の働き方に改革を起こすことを可能とする点である。

また、本事業の事業性検討により、高精度なイメージセンサを基幹技術としたセンシングシステムを活用したソリューション事業の可能性を示せた。本事業は、人の行動および状態に対するセンシングを基軸にしているため、今回提案した生産性向上システムだけではなく、人の能力の高機能化を行う分野に対して広く応用が可能であると考えられる。

5.2 今後の展望

イメージセンサの高精度化、高機能化に対する要求は、今後も続くことが予想される。広ダイナミックレンジ性能については、リアルタイムに行われる自動自律制御のために、現在の要望をさらに上回る性能が求められると予測される。また、広いダイナミックレンジを表現する分解能が必要となるため、拡張された分解能を高速に出力する方式の検討が必要になる。高速化については、自動自律制御時の誤判断をなくすために、動作ぶれのない撮像が要求される。また、様々な事象のセンシングに対し、計測や認識精度向上への要望が高まる。今後も更なる高性能化を実現するための開発継続が必要となる。

センシングにおいて処理速度のキーファクタとなる、インターフェース部の回路技術、高速通信技術の開発が必要となる。ここでも、センシング時の高信頼性が重要となるため、ノイズ耐性、低遅延、低損失伝送技術の開発が必要となる。

センシングシステムとしては、複数データの相関から、高精度な出力が、高効率かつリアルタイムに得られることが求められる。特に、複数条件の高精度なデータを取得することで、データ量が莫大となり、処理スピード、規模(コスト)面での負担が大きくなる。解析・学習ノウハウを蓄積し、効果的なデータを効率的に取得・蓄積・解析できるようになることは、顧客価値の実現、事業拡大の両面において大きなメリットとなる。また今後、リアルタイム処理の割合が増加していく中でも、大きなアドバンテージを持つといえる。

さらに今後は、働く現場や生活のあらゆる場面において人と自律ロボットとの協働が当たり前になる時代がくると考えられる。高度な技能の可視化・データ化は、ロボットが実現できる技術範囲を拡げることに繋がり、人による作業の軽減、さらなる高度作業への移行、または、ゆとり時間の創出につながる。また、高精度なセンシングによるフィードバックが人とロボットの両方に実施されることにより、相互にとってより効率的でかつ安全・安心な環境の構築が可能になると考える。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、多くの方々に御指導、御協力いただきましたことに心より感謝申し上げます。

本研究の前半は、筆者がパナソニック株式会社で取り組んだイメージセンサと光通信に関する技術成果をまとめたものであり、後半は、神戸大学大学院科学技術イノベーション研究科でこれらの技術の今後の効果的な技術進化と社会実装の検討を行ったものです。

本研究の機会を与えて頂き、研究に対し終始適切な御指導、御助言を賜りました神戸大学大学院科学技術イノベーション研究科・永田真教授に深く感謝致します。

イノベーション・ストラテジー研究成果書をまとめるにあたり、事業的な視点、複数業界にまたがる俯瞰的な視点、バイオをはじめ多くの異分野情報など、貴重な御助言、御指導を賜りました神戸大学大学院科学技術イノベーション研究科・山本一彦教授、尾崎弘之教授、幸田徹教授、福家信洋准教授に深く感謝致します。

パナソニック株式会社テクノロジー本部において、常に我々を先導、チャレンジする場を与えてくださり、また、今回の取り組みの後押しを頂きました相澤将徒氏、吉岡俊彦氏に深く感謝致します。

イメージセンサ開発チームでは、常に新しいことにチャレンジする創造性に溢れたメンバーが集結し、充実した開発を行っています。村上雅史氏、原田充氏、山崎雅之氏、井上恭典氏はじめ、開発メンバーに深く感謝致します。

また、イメージセンサ開発におきまして、技術的に多くの御指導を賜りました、現オムニビジョンテクノロジージャパン株式会社の松永誠之氏、現ヌヴォトンテクノロジージャパン株式会社の藤中洋氏、阿部豊氏はじめ、開発メンバーに深く感謝致します。

筆者が入社した当時から現在に至るまで、半導体アナログ回路設計につきまして多くの御指導を賜りました現株式会社テックイデアの松澤昭氏、現ソシオネクスト株式会社の木村博氏、現株式会社シンコム of 道正志郎氏、現神戸大学大学院科学技術イノベーション研究科の三木拓司氏に深く感謝致します。

最後に、学位取得にあたり、温かく見守ってくれた友人と家族に心より感謝致します。

参考文献

- [1] M. Mori, Y. Hirose, M. Segawa, I. Miyanaga, R. Miyagawa, T. Ueda, H. Nara, H. Masuda, S. Kishimura, T. Sasaki, Y. Kato, Y. Imada, H. Asano, H. Inomata, H. Koguchi, M. Ihama, and Y. Mishima, “Thin organic photoconductive film image sensors with extremely high saturation of 8500 electrons/ μm^2 ”, Symp. VLSI Circuits, pp. T22-T23, 2013.
- [2] M. Ishii, S. Kasuga, K. Yazawa, Y. Sakata, T. Okino, Y. Sato, J. Hirase, Y. Hirose, T. Tamaki, Y. Matsunaga, and Y. Kato, “An Ultra-low Noise Photoconductive Film Image Sensor With a High-speed Column Feedback Amplifier Noise Canceller”, Symp. VLSI Circuits, pp. C8-C9, 2013.
- [3] K. Nishimura, Y. Sato, J. Hirase, R. Sakaida, M. Yanagida, T. Tamaki, M. Takase, H. Kanehara, M. Murakami, and Y. Inoue, “An over 120 dB simultaneous-capture wide-dynamic-range 1.6 e^- ultra-low-reset-noise organic-photoconductive-film CMOS image sensor”, Dig. Tech. Pap. Int. Solid-State Circuits Conf., pp. 110-112, 2016.
- [4] H. Seo, S. Aihara, T. Watabe, H. Ohtake, T. Sakai, M. Kubota, N. Egami, T. Hiramatsu, T. Matsuda, M. Furuta, and T. Hirao, “A 128 x 96 pixel stack-type color image sensor with B-, G-, R-sensitive organic photoconductive films”, Int. Image Sensor Workshop, pp. 236-239, 2011.
- [5] S. Machida, S. Shishido, T. Tokuhara, M. Yanagida, T. Yamada, M. Izuchi, Y. Sato, Y. Miyake, M. Nakata, M. Murakami, M. Harada, and Y. Inoue, “A 2.1 Mpixel organic-film stacked RGB-IR image sensor with electrically controllable IR sensitivity”, Dig. Tech. Pap. Int. Solid-State Circuits Conf., pp. 78-80, 2017.
- [6] A. Y. Chiou, and C. Hsieh, “A 0.4 V self-powered CMOS imager with 140 dB dynamic range and energy harvesting”, Symp. VLSI Circuits, pp. C86-C87, 2015.

-
- [7] W. Wakashima, F. Kusuhara, R. Kuroda, and S. Sugawa, "A linear response single exposure CMOS image sensor with $0.5 e^-$ readout noise and $76 ke^-$ full well capacity", Symp. VLSI Circuits, pp. C88-C89, 2015.
- [8] N. Akahane, R. Ryuzaki, S. Adachi, K. Mizobuchi, and S. Sugawa, "A 200 dB Dynamic Range Iris-less CMOS Image Sensor with Lateral Overflow Integration Capacitor using Hybrid Voltage and Current Readout Operatio", Dig. Tech. Pap. Int. Solid-State Circuits Conf., pp. 1161-1170, 2006.
- [9] M. Mase, S. Kawahito, M. Sasaki, and Y. Wakamori, "A 19.5 b dynamic range CMOS image sensor with 12 b column-parallel cyclic A/D converters", Dig. Tech. Pap. Int. Solid-State Circuits Conf., pp. 350-352, 2005.
- [10] M. Loose, K. Meier, and J. Schemmel, "A self-calibrating single-chip CMOS camera with logarithmic response", IEEE J. Solid-State Circuits, Volume 36, Number 4, pp. 586-596, 2001.
- [11] K. Hara, H. Kubo, M. Kimura, F. Murao, and S. Komori, "A linear-logarithmic CMOS sensor with offset calibration using an injected charge signal", Dig. Tech. Pap. Int. Solid-State Circuits Conf., pp. 354-356, 2005.
- [12] S. Sugawa, N. Akahane, S. Adachi, K. Mori, T. Ishiuchi, and K. Mizobuchi, "A 100 dB dynamic range CMOS image sensor using a lateral overflow integration capacitor", Dig. Tech. Pap. Int. Solid-State Circuits Conf., pp. 352-354, 2005.
- [13] N. Akahane, S. Sugawa, S. Adachi, K. Mori, T. Ishiuchi, and K. Mizobuchi, "A sensitivity and linearity improvement of a 100 dB dynamic range CMOS image sensor using a lateral overflow integration capacitor", Symp. VLSI Circuits, pp. 62-65, 2005.
- [14] P. Vu, B. Fowler, S. Mims, C. Liu, J. Balicki, H. Do, W. Li, and J. Appelbaum, "Low Noise High Dynamic Range 2.3 Mpixel CMOS Image Sensor Capable of 100 Hz Frame Rate at Full HD Resolution", Int. Image Sensor Workshop, pp. 161-164, 2011.
- [15] Y. Chen, Y. Xu, Y. Chae, A. Mierop, X. Wang, and A. Theuwissen, "A $0.7 e^-_{rms}$ -temporal-readout-noise CMOS image sensor for low-light-level imaging", Dig. Tech. Pap. Int. Solid-State Circuits

- Conf., pp. 384–386, 2012.
- [16] S. Adachi, W. Lee, N. Akahane, H. Oshikubo, K. Mizobuchi, and S. Sugawa, “A 200 $\mu\text{V}/e^-$ CMOS image sensor with 100 ke^- full well capacity”, Symp. VLSI Circuits, pp. 142–143, 2007.
- [17] J. Lee, B.-S. Choi, S.-H. Kim and J.-K. Shin, “Wide Dynamic Range CMOS Image Sensor Using Dual-Sensitivity Photodiodes and Switching Circuit”, Int’l Conf. IP, Comp. Vision, and Pattern Recognition, p. 143, 2017.
- [18] M. Takase, S. Isono, Y. Tomekawa, T. Koyanagi, T. Tokuhara, M. Harada and Y. Inoue, “An Over 120 dB Wide - Dynamic - range 3.0 μm Pixel Image Sensor with In - pixel Capacitor of 41.7 $\text{fF}/\mu\text{m}^2$ and High Reliability Enabled by BEOL 3D Capacitor Process”, Symp. VLSI Technology, pp. 71–72, 2018.
- [19] T. Takahashi, Y. Kaji, Y. Tsukuda, S. Futami, K. Hanzawa, T. Yamauchi, P. W. Wong, F. Brady, P. Holden, T. Ayers, K. Mizuta, S. Ohki, K. Tatani, T. Nagano, H. Wakabayashi, and Y. Nitta, “A 4.1 Mpix 280 fps Stacked CMOS Image Sensor with Array-Parallel ADC Architecture for Region Control”, Symp. VLSI Circuits, pp. C244–C245, 2017.
- [20] K. Nishimura, S. Shishido, Y. Miyake, M. Yanagida, Y. Sato, M. Shouho, H. Kanehara, R. Sakaida, Y. Sato, J. Hirase, Y. Tomekawa, Y. Abe, H. Fujinaka, Y. Matsunaga, M. Murakami, M. Harada, and Y. Inoue, “An 8K4K-Resolution 60 fps 450 ke^- -Saturation-Signal Organic-Photoconductive-Film Global Shutter CMOS Image Sensor with In-Pixel Noise Canceller”, Dig. Tech. Pap. Int. Solid-State Circuits Conf., pp. 82–84, 2018.
- [21] Y. Sakano, S. Sakai, Y. Tashiro, Y. Kato, K. Akiyama, K. Honda, M. Sato, M. Sakakibara, T. Taura, K. Azumi, T. Hirano, Y. Oike, Y. Sogo, T. Ezaki, T. Narabu, T. Hirayama, and S. Sugawa, “224 ke saturation signal global shutter CMOS image sensor with In-pixel pinned storage and lateral overflow integration capacitor”, Symp. VLSI Circuits, pp. C250–C251, 2017.
- [22] T. Ohmaru, T. Nakagawa, S. Maeda, Y. Okamoto, M. Kozuma, S. Yoneda, H. Inoue, Y. Kurokawa, T. Ikeda, Y. Ieda, N. Yamada, H. Miyairi, M. Ikeda, and S. Yamazaki, “25.3 μW at 60 fps 240 \times 160-pixel

- vision sensor for motion capturing with in-pixel non-volatile analog memory using crystalline oxide semiconductor FET”, Dig. Tech. Pap. Int. Solid-State Circuits Conf., pp. 118–120, 2015.
- [23] M. Sakakibara, Y. Oike, T. Takatsuka, A. Kato, K. Honda, T. Taura, T. Machida, J. Okuno, A. Ando, T. Fukura, T. Asatsuma, S. Endo, J. Yamamoto, Y. Nakano, T. Kaneshige, I. Yamamura, T. Ezaki, and T. Hirayama, “An 83 dB-dynamic-range single-exposure global-shutter CMOS image sensor with in-pixel dual storage”, Dig. Tech. Pap. Int. Solid-State Circuits Conf., pp. 380–382, 2012.
- [24] B. Wolfs, J. Bogaerts, and G. Meynants, “3.5 μm Global Shutter Pixel With Transistor Sharing And Correlated Double Sampling”, Int. Image Sensor Workshop, pp. 397–400, 2013.
- [25] T. Kondo, Y. Takemoto, K. Kobayashi, M. Tsukimura, N. Takazawa, H. Kato, S. Suzuki, J. Aoki, H. Saito, Y. Gomi, S. Matsuda, and Y. Tadaki, “A 3D stacked CMOS image sensor with 16Mpixel global-shutter mode and 2 Mpixel 10000 fps mode using 4 million interconnections”, Symp. VLSI Circuits, pp. C90–C91, 2015.
- [26] R. Funatsu, S. Huang, T. Yamashita, K. Stevulak, J. Rysinski, D. Estrada, S. Yan, T. Soeno, T. Nakamura, H. Shimamoto, and B. Mansoorian, “133 Mpixel 60 fps CMOS image sensor with 32-column shared high-speed column-parallel SAR ADCs”, Dig. Tech. Pap. Int. Solid-State Circuits Conf., pp. 112–114, 2015.
- [27] Y. Oike, K. Akiyama, L. D. Hung, W. Niitsuma, A. Kato, M. Sato, Y. Kato, W. Nakamura, H. Shiroshita, Y. Sakano, Y. Kitano, T. Nakamura, T. Toyama, and H. Iwamoto, “An 8.3 M-pixel 480 fps global-shutter CMOS image sensor with gain-adaptive column ADCs and 2-on-1 stacked device structure”, Symp. VLSI Circuits, pp. 222–223, 2016.
- [28] P. Centen, S. Lehr, S. Roth, J. Rotte, F. Heizmann, A. Momin, R. Dohmen, K. H. Schaaf, K. J. Damstra, R. V. Ree, M. Schreiber, A. Lahav, A. Birman, and A. Fenigstein, “A 4 e^- noise 2/3-inch global shutter 1920x1080 P120 CMOS-Imager”, Int. Image Sensor Workshop, p. 12.06, 2013.
- [29] J. Solhusvik, S. Velichko, T. Willassen, S. Yaghmai, J. Olsson, A. Rosnes, T. Martinussen, P. O. Pahr, S. Eikedal, S. Shaw, R.

- Bhamra, D. Pates, S. Smith, L. Jiang, D. Wing, J. Bai, S. Nagaraja, and A. Chilumula, "A 1.2 MP 1/3" global shutter CMOS image sensor with pixel-wise automatic gain selection", Int. Image Sensor Workshop, p. R53, 2011.
- [30] M. Takase, Y. Miyake, T. Yamada, T. Tamaki, M. Murakami, and Y. Inoue, "First demonstration of 0.9 μm pixel global shutter operation by novel charge control in organic photoconductive film", IEDM Tech. dig., pp.775-778, 2015.
- [31] S. Shishido, Y. Miyake, Y. Sato, T. Tamaki, N. Shimasaki, Y. Sato, M. Murakami, and Y. Inoue, "210 ke^- Saturation signal 3 μm -pixel variable-sensitivity global-shutter organic photoconductive image sensor for motion capture", Dig. Tech. Pap. Int. Solid-State Circuits Conf., pp. 112-114, 2016.
- [32] T. Arai, T. Yasue, K. Kitamura, H. Shimamoto, T. Kosugi, S. Jun, S. Aoyama, M. Hsu, Y. Yamashita, H. Sumi, and S. Kawahito, "A 1.1 μm 33 Mpixel 240 fps 3D-stacked CMOS image sensor with 3-stage cyclic-based analog-to-digital converters", Dig. Tech. Pap. Int. Solid-State Circuits Conf., pp. 126-128, 2016.
- [33] G. Meynants, B. Wolfs, J. Bogaerts, P. Li, Z. Li, Y. Li, Y. Creten, K. Ruythooren, P. Francis, R. Lafaille, P. D. Wit, G. Beeckman, J. and M. Kopfer, "A 47 MPixel 36.4 x 27.6 mm^2 30 fps Global Shutter Image Sensor", Int. Image Sensor Workshop, pp. 410-413, 2017.
- [34] M. Kobayashi, Y. Onuki, K. Kawabata, H. Sekine, T. Tsuboi, Y. Matsuno, H. Takahashi, T. Koizumi, K. Sakurai, H. Yuzurihara, S. Inoue, and T. Ichikawa, "A 1.8 erms temporal noise over 110 dB dynamic range 3.4 μm pixel pitch global shutter CMOS image sensor with dual-gain amplifiers, SS-ADC and multiple-accumulation shutter", Dig. Tech. Pap. Int. Solid-State Circuits Conf., pp. 74-76, 2017.
- [35] S. Yamashita, S. Ide, K. Mori, A. Hayakawa, N. Ueno and K. Tanaka, "Novel cell-AGC technique for burst-mode CMOS pre-amplifier with wide dynamic range and high sensitivity for ATM-PON system", IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. 37, No.7, pp. 881-886, July 2002.
- [36] M. Nakamura, N. Ishihara and Y. Akazawa, "A 156 Mb/s CMOS optical receiver for burst-mode transmission", IEEE J. Solid-State

- Circuits, Vol. 33, No.8, pp. 1179-1187, August 1998.
- [37] S. Brigati, P. Colombara, L. D' Ascoli, U. Gatti, T. Karakes and P. Malcovati, "A SiGe BiCMOS burst-Mode 155 Mb/s Receiver for PON", IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. 37, No.7, pp.887-894, Jul. 2002.
- [38] Q. Le, S.-G. Lee, Y.-H. Oh, H.-Y. Kang and T.-H. Yoo, "Burst-mode receiver for 1.25 Gb/s Ethernet PON with AGC and internally created reset signal", IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. Dig. Tech. Papers, pp. 474-540, 2004.
- [39] H. Asano, H. Kimura, H. Uno and K. Utsumi, "High performance optical receiver IC for PON systems", Proc. IEICE Society Conf., IEICE B-10-72, 1998.
- [40] IEEE Draft P802.3ah/D3.3.
- [41] 日本生産性本部, 労働生産性の国際比較 (2020 年度)
<https://www.jpc-net.jp/research/detail/005009.html>
(Accessed: January 2022)
- [42] 厚生労働省, 日本の人口ピラミッドの変化
<https://www.mhlw.go.jp/wp/hakusyo/kousei/17/backdata/02-01-01-01.html>
(Accessed: January 2022)
- [43] KAIZEN BASE, 7つのムダとは: トヨタ生産方式
<https://www.kaizen-base.com/contents/tps-42422/>
(Accessed: January 2022)
- [44] IBM HP, 先進的なデジタル製造技術ソリューション
<https://www.ibm.com/jp-ja/industries/manufacturing>
(Accessed: January 2022)
- [45] IBM HP, 生産性向上とリスク対応力を併せ持つ業界変革の実現
<https://www.ibm.com/think/jp-ja/business/dx-covid19-aftercorona-industry/>
(Accessed: January 2022)
- [46] 三菱電機 Biz Timeline,
5G×ものづくり 無線で製造業はこう変わる
<https://www.mitsubishielectric.co.jp/business/biz-t/contents/synergy/local5g.html>
(Accessed: January 2022)

-
- [47] ZD Net Japan, 住友電工、
5G と AI による向上可視化で業務改善効果など確認
<https://japan.zdnet.com/article/35172085/>
(Accessed: January 2022)

発表論文一覧

本研究に関する発表論文

学術論文

- [1] Kazuko Nishimura, Sanshiro Shishido, Yasuo Miyake, Hidenari Kanehara, Yoshiaki Sato, Junji Hirase, Yoshihiro Sato, Yuko Tomekawa, Masayuki Yamasaki, Masashi Murakami, Mitsuru Harada, Yasunori Inoue, “Advanced features of layered-structure organic-photoconductive-film CMOS image sensor: Over 120 dB wide dynamic range function and photoelectric-conversion-controlled global shutter function”, Japanese Journal of Applied Physics (JJAP), Volume 57, Number 10, pp. 1002B4-1 - 1002B4-11, September 2018.
- [2] Kazuko Nishimura, Hiroshi Kimura, Manabu Watanabe, Tetsuya Nagai, Kazuhiro Nojima, Kazumasa Gomyo, Masato Takata, Mitsuhiro Iwamoto, and Hiroaki Asano, “A 1.25 Gbit/s CMOS Burst-Mode Optical Transceiver for Ethernet PON System”, IEEE Journal of Solid-State Circuits (JSSC), Volume 40, Number 4, pp. 1027 - 1034, April 2005.

その他の発表

国際会議

- [3] Yoshihiro Sato, Takayoshi Yamada, Kazuko Nishimura, Masayuki Yamasaki, Masashi Murakami, Keiichiro Urabe, Koji Eriguchi, “Evaluation of Plasma-Induced Stochastic Damage Creation in the Lateral Direction Using pn Junction Structures”, International Workshop on Junction Technology (IWJT), pp. 21 - 24, June 2021.
- [4] Yoshihiro Sato, Takayoshi Yamada, Kazuko Nishimura, Masayuki Yamasaki, Masashi Murakami, Keiichiro Urabe, Koji Eriguchi, “Characterization Scheme for Plasma Induced Defect Creation due to Stochastic Lateral Stragglings in Si Substrates for Ultra low Leakage Devices”, IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), pp. 187 - 190, December 2020.
- [5] Kazuko Nishimura, “An Organic-Photoconductive-Film CMOS Image Sensor’s Advanced Technologies”, Image Sensor Europe, March 2019.
- [6] Kazuko Nishimura, Sanshiro Shishido, Yasuo Miyake, Masaaki Yanagida, Yoshiaki Sato, Makoto Shouho, Hidenari Kanehara, Ryota Sakaida, Yoshihiro Sato, Junji Hirase, Yuko Tomekawa, Yutaka Abe, Hiroshi Fujinaka, Yoshiyuki Matsunaga, Masashi Murakami, Mitsuru Harada, Yasunori Inoue, “An 8K4K-Resolution 60 fps 450 ke⁻-Saturation-Signal Organic-Photoconductive-Film Global-Shutter CMOS Image Sensor with In-Pixel Noise Canceller”, IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), pp. 82 - 84, February 2018.

- [7] Kazuko Nishimura, Yoshihiro Sato, Junji Hirase, Ryota Sakaida, Masaaki Yanagida, Tokuhiko Tamaki, Masayuki Takase, Hidenari Kanehara, Masashi Murakami, Yasunori Inoue, “An Over 120 dB Simultaneous-Capture Wide-Dynamic-Range 1.6 e- Ultra-Low-Reset-Noise Organic-Photoconductive-Film CMOS Image Sensor”, IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), pp. 110 - 112, February 2016.
- [8] Kazuko Nishimura, Hiroshi Kimura, Manabu Watanabe, Tetsuya Nagai, Kazuhiro Nojima, Kazumasa Gomyo, Masato Takata, Mitsuhiro Iwamoto, Hiroaki Asano, “A 1.25 Gbit/s CMOS Burst-Mode Optical Transceiver for Ethernet PON System”, IEEE Symposium on VLSI Circuits, pp. 414 - 417, June 2004.
- [9] Takefumi Yoshikawa, Tadahiro Yoshida, Tsuyoshi Ebuchi, Yukio Arima, Toru Iwata, Kazuko Nishimura, Hiroshi Kimura, Yoshihide Komatsu, Hiroyuki Yamauchi, “An 800 Mb/s physical layer LSI with hybrid port architecture for consumer electronics networking”, IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), pp. 74 - 76, February 2002.
- [10] Kouji Sushihara, Hiroshi Kimura, Youichi Okamoto, Kazuko Nishimura, Akira Matsuzawa, “A 6 b 800 MSample/s CMOS A/D converter”, IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), pp. 428 - 429, February 2000.

国内会議および国内論文

- [11] 佐藤好弘・山田隆善・西村佳壽子・山崎雅之・村上雅史・占部継一郎・江利口浩二 「プラズマプロセスにより形成される3次元欠陥分布が暗電流特性に及ぼす影響評価」 映像情報メディア学会 ITS2021-9 pp. 5-8, March 2021.

- [12] 佐藤好弘・山田隆善・西村佳壽子・山崎雅之・村上雅史・占部継一郎・江利口浩二 「Characterization Scheme for Plasma-Induced Defect Creation due to Stochastic Lateral Stragglings in Si Substrates for Ultra-low Leakage Devices」 電子情報通信学会 シリコン・デバイス研究会 (SDM) 応用物理学会 SDM2020-53 pp. 17 - 20, January 2021.
- [13] 布施彰一・西村佳壽子・元田一真・千秋久子・三鼓正則・打井裕基一 「8K イメージングソリューションー有機積層型イメージセンサを用いたマルチパーパスカメラの開発と ROI 切り出し機能ー」 Panasonic Technical Journal, Vol. 50, No.2, pp. 21 - 26, 2019.
- [14] 町田真一・西村佳壽子・宍戸三四郎・三宅康夫・徳原健富・柳田真明・中田学・村上雅史・原田充・井上恭典 「有機 CMOS イメージセンサの開発動向」 映像情報メディア学会 論文誌 72 巻, 3 号, pp. 198 - 203, 2018.
- [15] 西村佳壽子・宍戸三四郎・三宅康夫・柳田真明・佐藤嘉晃・荘保信・金原旭成・境田良太・佐藤好弘・平瀬順司・留河優子・阿部豊・藤中 洋・松長誠之・村上雅史・原田 充・井上恭典 「画素内ノイズキャンセル機能を備えた 8K4K 解像度 60 fps フレームレート 45 万電子高飽和 有機 CMOS グローバルシャッターイメージセンサ」 映像情報メディア学会 pp. 43 - 46, 2018.
- [16] 村上雅史・西村佳壽子・宍戸三四郎・高瀬雅之・三宅康夫・玉置徳彦 「有機積層型イメージセンサー完全同時広ダイナミックレンジ技術, 光電変換グローバルシャッター技術の開発ー」 Panasonic Technical Journal, Vol. 63, No.1, pp. 34 - 39, 2017.
- [17] 村上雅史・西村佳壽子・宍戸三四郎・高瀬雅之・三宅康夫・玉置徳彦・佐藤好弘・井上恭典 「有機 CMOS イメージセンサ ~120 dB ワイドダイナミックレンジ, 光電変換制御グローバルシャッター~」 映像情報メディア学会 pp. 53 - 56, 2016.

- [18] 澤田享・西村佳壽子・柴田修・辛島靖治 「情報家電における装置内光伝送技術の検討」 電子情報通信学会 ソサイエティ大会 2007, エレクトロニクスソサイエティ 1号, p. 166, 2007.
- [19] 後明一聖・長井哲也・野嶋一宏・浅野弘明・西村佳壽子 「バーストモード消光比制御方式の開発」 電子情報通信学会総合大会, p. 476, 通信 2号, 2004.
- [20] 西村佳壽子・木村博・渡邊学・長井哲也・野嶋一宏・後明一聖・高田正人・岩本光浩・浅野弘明 「0.25 μm CMOS を用いた 1.25 Gbit/s バーストモード光送受信 LSI の開発」 電子情報通信学会集積回路研究会(ICD), ICD104, pp. 55 - 60, 2004.
- [21] 高田正人・野嶋一宏・浅野弘明・長井哲也・後明一聖・西村佳壽子・木村博 「0.25 μm CMOS を用いた 1.25 Gbit/s バーストモード光受信 IC の開発」 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2003 巻, ソサイエティ 2号, p. 358, 2003.
- [22] 江淵剛志・吉河武文・吉田忠弘・有馬幸生・岩田徹・西村佳壽子・木村博・小松義英・山内寛行 「ハイブリッドポートアーキテクチャを備えた民生ネットワーク向け 800 mb/s 対応物理層 lsi の開発」 電子情報通信学会 集積回路研究会(ICD), 102 巻, 83 号, pp. 1 - 6, 2002.
- [23] 浅野弘明・道正志郎・西村佳壽子・木村博・宇野均・内海邦昭 「先頭検出機能を備える 50 Mb/s バースト信号用 PLL 回路とそれを用いた高感度光受信器」 電子情報通信学会ソサイエティ大会, ソサイエティ C2 , p. 86, 1999.
- [24] 松澤昭・西村佳壽子・林錠二・下村浩・木村博 「アナログ回路設計に適した CMOS デバイス特性の表記法-動作電流によるアナログ特性の記述と応用を中心として-」 電子情報通信学会集積回路研究会(ICD) , ICD96, pp. 71 - 78, 1996.

受賞

- [25] Image Sensor Europe, The Biggest Innovator in the Image Sensor Industry Award: An Organic-Photoconductive-Film CMOS Image Sensor' s Advanced Technologies, 2019.
- [26] International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), 2016 Demonstration Session Award: An Over 120 dB Simultaneous-Capture Wide-Dynamic-Range 1.6 e-Ultra-Low-Reset-Noise Organic-Photoconductive-Film CMOS Image Sensor, 2017.
- [27] The Institute of Image Information and Television Engineers, Excellent Research Presentation Award: OPF Image Sensor with Wide Dynamic Range and Global Shutter, 2016.

招待講演

- [28] IEEE SSCS Distinguished Lecturer, Japan chapter, “An Organic-Photoconductive-Film CMOS Image Sensor' s Advanced Technologies” December 2021.
- [29] IEEE SSCS Distinguished Lecturer, Delhi chapter, “An Organic-Photoconductive-Film CMOS Image Sensor' s Advanced Technologies” December 2021.
- [30] IEEE SSCS Distinguished Lecturer, Taipei chapter, “An Organic-Photoconductive-Film CMOS Image Sensor' s Advanced Technologies” December 2021.
- [31] IEEE SSCS Distinguished Lecturer, Malaysia chapter, “An Organic-Photoconductive-Film CMOS Image Sensor' s Advanced Technologies” September 2021.

-
- [32] IEEE SSCS Distinguished Lecturer, Israel ACRC Webinar, “An Organic-Photoconductive-Film CMOS Image Sensor’ s Advanced Technologies” July 2021.
- [33] IEEE SSCS Distinguished Lecturer, SSCS DL Webinar, “An Organic-Photoconductive-Film CMOS Image Sensor’ s Advanced Technologies” May 2021.
- [34] IEEE SSCS Distinguished Lecturer, Switzerland chapter, “An Organic-Photoconductive-Film CMOS Image Sensor’ s Advanced Technologies” March 2021.
- [35] IEEE SSCS Distinguished Lecturer, Tainan chapter, “An Organic-Photoconductive-Film CMOS Image Sensor’ s Advanced Technologies” October 2020.
- [36] Panel Session “Rising Stars 2020” , Women in Circuits Workshop, IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), February 2020.

図一覽

図 1-1. 人の五感.....	1
図 1-2. 人の五感と機械(各種センサ)による認識.....	2
図 1-3. 現在のイメージセンサ活用例.....	2
図 1-4. 今後のイメージセンサ活用による価値創造.....	3
図 1-5. CCD 開発者と CCD 構造、世界最初のカメラ・ビデオ.....	4
図 1-6. CCD イメージセンサ 画素サイズ.....	5
図 1-7. CCD イメージセンサと CMOS イメージセンサの構造比較.....	6
図 1-8. CMOS イメージセンサ 画素サイズ.....	8
図 1-9. 各シーンに必要なダイナミックレンジ.....	9
図 1-10. ダイナミックレンジ不足によるデータの欠損.....	10
図 1-11. 高速撮像.....	10
図 1-12. 波長を活かしたセンシング.....	12
図 1-13. CMOS イメージセンサ産業の伸び.....	13
図 1-14. CMOS イメージセンサ分野別成長率.....	13
図 1-15. イメージセンサ市場の変化.....	14
図 1-16. イメージセンサの高性能化と本論文の構成.....	19
図 1-17. 高ロバストなセンシングシステムを用いた 高効率生産性向上事業と本論文の構成.....	20
図 2-1. 画素断面構造.....	23
図 2-2. 有機薄膜(OPF)の光電変換特性.....	24
図 2-3. 不十分なダイナミックレンジでの撮像特性.....	25
図 2-4. 有機 CMOS イメージセンサの広ダイナミックレンジターゲット...	26
図 2-5. 有機 CMOS イメージセンサ 1画素2セル画素 (DS-Pixel) 断面構造.....	27
図 2-6. 有機 CMOS イメージセンサ MIM搭載 1画素2セル画素 (DS-Pixel) 断面構造.....	28
図 2-7. 有機 CMOS イメージセンサ 1画素2セル構造 (DS-Pixel) 感度と飽和特性.....	29
図 2-8. 容量結合型ノイズキャンセル回路 (CCNC)構成.....	31
図 2-9. 画素内容量結合型ノイズキャンセル回路 (IP-CCNC)構成.....	33

図 2-10. 有機 CMOS イメージセンサ画素断面構造と グローバルシャッタ機能のための電圧印加	35
図 2-11. 広ダイナミックレンジを実現する有機 CMOS イメージセンサ チップ写真	38
図 2-12. 広ダイナミックレンジを実現する有機 CMOS イメージセンサ の光電変換特性	38
図 2-13. 広ダイナミックレンジを実現する有機 CMOS イメージセンサ の S/N 特性	39
図 2-14. ノイズキャンセル特性	40
図 2-15. 広ダイナミックレンジを実現する有機 CMOS イメージセンサ による撮像	41
図 2-16. 高速動体撮像	42
図 2-17. LED 信号機撮像(LED フリッカ課題の抑制)	43
図 2-18. ローリングシャッタモードとグローバルシャッタモードでの 撮像	44
図 2-19. 8K4K 高解像度を実現する有機 CMOS イメージセンサ チップ写真	45
図 2-20. 8K4K 高解像度を実現する有機 CMOS イメージセンサ の光電変換特性	45
図 2-21. 8K4K 高解像度を実現する有機 CMOS イメージセンサ による撮像	46
図 3-1. GE-PON システム	50
図 3-2. バーストモード光受信器のブロックダイアグラム	50
図 3-3. AGC 機能を搭載したトランスインピーダンスアンプ(TIA) の回路構成	52
図 3-4. トランスインピーダンスアンプ(TIA) 出力電圧	52
図 3-5. プリアンプの回路構成	53
図 3-6. 基準電圧生成回路の回路構成	54
図 3-7. メインアンプの回路構成と出力波形	55
図 3-8. バーストモード光送信器のブロックダイアグラム	58
図 3-9. APC システムのフローチャート	59
図 3-10. APC システムのオペレーション	60
図 3-11. APC システムのオペレーション	61
図 3-12. 評価環境	62
図 3-13. 光受信器の BER 特性	63

図 3-14. 光受信器の入出力波形	64
図 3-15. 平均光出力パワーと消光比	64
図 3-16. 光出力のアイパターン	65
図 3-17. チップ写真	66
図 4-1. 「高効率生産性向上システム」概要の一例	72
図 4-2. 少子高齢化と労働人口の減少	73
図 4-3. 主要先進7か国の国民一人当たりの GDP 順位の変遷	74
図 4-4. 主要先進7か国の就業者一人当たりの労働生産性順位の変遷	74
図 4-5. 卸小売業、飲食・宿泊業の労働生産性変移	76
図 4-6. 5S 活動	78
図 4-7. 生産性向上のためのオペレーション最適化 (IBM)	80
図 4-8. 生産現場における各装置稼働の見える化 (IBM)	80
図 4-9. ローカル 5G 活用によるスマートファクトリの実現 (三菱電機)	81
図 4-10. ローカル 5G 活用によるスマートファクトリの実現 (住友電工)	81
図 4-11. 広ダイナミックレンジ性能の進化	92
図 4-12. 作業状態の取得	92
図 4-13. 生産性変化とその要因解析の例	94
図 4-14. 収益詳細 (年次推移)	96
図 4-15. 費用詳細 (年次推移)	96
図 4-16. 売上・当期損益・累積損益	97

表一覧

表 1-1. CCD イメージセンサ実用化のための重要技術.....	4
表 1-2. CCD イメージセンサと CMOS イメージセンサの性能比較.....	6
表 1-3. CMOS イメージセンサ実用化のための重要技術.....	7
表 2-1. 特性比較.....	47
表 3-1. IEEE802.3ah 規格と本システムの特性.....	66
表 4-1. 7つのムダ	79
表 4-2. PEST 分析	87
表 4-3. VRIO 分析	88
表 4-4. SWOT 分析	90

神戸大学博士論文「イメージセンサを用いた新機能センシングシステムに関する研究」全 129 頁

提出日 2022 年 01 月 26 日

本博士論文が神戸大学機関リポジトリ Kernel にて掲載される場合、掲載登録日（公開日）はリポジトリの該当ページ上に掲載されます。

©西村 佳壽子

本論文の内容の一部あるいは全部を無断で複製・転載・翻訳することを禁じます。