

## 論文内容の要旨

博士論文題目 生体計測に向けた高機能 CMOS イメージセンサの研究  
氏 名 宍戸 三四郎

### (論文内容の要旨)

我が国において、2050年には65歳以上の高齢者人口の割合が40%を超えると予測されており、医療・介護・健康管理サービスは産業の重要な位置付けとなる。ヘルスケアシステムでは、体表に装着するウェアラブルセンサや体内埋め込みセンサを対象にネットワークを構築するBAN (Body Area Network) が注目されている。センサデバイスに対しては、生体への負荷軽減のために小型化や低消費電力駆動であること、一度に多くの情報を収集できることなどの要求が挙げられる。本研究ではこのような用途での生体計測に向けた高機能 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) イメージセンサの開発を目的とする。

CMOS イメージセンサデバイスの生体内埋め込みや BAN への組み込みを想定した場合、デバイスに対しては(1)低電圧駆動、(2)低消費電力駆動、(3)サイズの小型化、が要求される。しかし、イメージセンサでは電源電圧の低減が信号振幅の低下に繋がり、その低下がダイナミックレンジを劣化させるため、低電圧化が難しいという問題があった。そこで、画素内で光量を電圧振幅ではなく時間幅に変調する PWM (Pulse width modulation) 方式を提案することで、イメージセンサの低電圧化を図った。センサの小型化を可能とする画素構造を提案し、128 x 96 画素 PWM-CMOS イメージセンサを 0.35  $\mu\text{m}$  CMOS プロセスを用いて試作した。そして電源電圧 1.35V での動作に成功した。また、通常駆動時に画素部消費電力の支配的要因であった定常バイアス電流を、スイッチング動作により低減するダイナミック動作を提案し、センサ性能に最も影響の大きい画素回路部分の消費電力を 97%、チップ全体で 26%削減することに成功した。

偏光計測は、生体画像分析や、糖質やアミノ酸の定量、定性的な光学純度評価に用いられる。これまでに、CMOS プロセスのメタル配線層を利用したオンチップメタルグリッド偏光子を搭載した偏光計測イメージセンサによる、コンパクトな偏光イメージングデバイスが提案されており、生体計測への応用が期待される。しかし、センサ性能として重要な偏光分離特性である消光比は、メタルグリッドピッチに大きく依存するため、0.35  $\mu\text{m}$  CMOS プロセスで作製された偏光子では、測定波長 578nm で消光比が 6.7 と低かった。そこで、消光比向上を目指し、微細メタルグリッド作製による偏光計測イメージセンサの設計・試作を 65nm CMOS プロセスを用いて行った。電磁界シミュレーションによる微細グリッドの偏光特性検討を行い、試作したセンサを用いた計測により波長 633nm で 2 桁の消光比 43.7 を達成した。

医療分野においても生体計測システムの充実は重要な課題である。開頭して患部を切除

するようなてんかん手術においては、患部特定のために脳表上に皿電極を配置したまま、電位計測が数週間行われる。このような長期間の脳機能計測において、BAN への組み込みや信頼度向上のためのマルチモーダル計測を行うことは有用である。そこで、脳神経活動の in vivo 記録法の一つであり fNIRS (functional near-infrared spectroscopy) などに代表される光計測法に注目し、開頭手術時の脳波計測に加え光計測法による脳機能イメージングを可能とする CMOS イメージセンサデバイスの提案と開発を行った。従来の fNIRS 脳機能計測では、頭皮上からの観察を行うため、空間分解能が低かったが、イメージセンサを脳表に配置することにより、高感度・高分解能な fNIRS 計測の実現が期待される。試作したデバイスは、測定対象の表面イメージの取得や、光計測対象エリアから取得した画像から必要な情報の切り出し、指定領域の信号処理による実効的な感度向上が可能である。本デバイスを用いて、血液を模擬した酸素化度の異なるメトヘモグロビンの濃度変化や混合比の検出、イメージングに基づいた模擬血管中溶液の吸光度検出、流体計測に成功した。これにより試作デバイスによる脳機能活動計測に対してその有用性と可能性を示した。

生体計測に向けた高機能 CMOS イメージセンサの実現を目的として研究を行った。イメージセンサの低電圧・低消費電力化により世界最低消費電力画素の実現に成功した。偏光計測センサにおいては、偏光分離特性をこれまでの 1 桁から 2 桁に向上することに成功した。また医療分野における脳機能計測デバイスの提案と、基礎実験による検討を行った。本研究成果により、ヘルスケアシステムの構築や生体計測技術の向上、医療分野への貢献が期待される。

## (論文審査結果の要旨)

高齢化社会の到来に際して、ヘルスケアシステム構築に向けた次世代医療デバイスの実現が望まれている。本研究では生体計測に向けた高機能 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)イメージセンサの開発を目的として研究を行った。

生体計測に向けた CMOS イメージセンサデバイスには、小型化、低電圧・低消費電力駆動が要求される。しかし、イメージセンサの電源電圧低減はダイナミックレンジを劣化させるため、低電圧化が難しかった。そこで、光量を電圧振幅ではなく時間幅に変調する PWM (Pulse width modulation) 方式を提案することで、イメージセンサの低電圧化を図った。センサの小型化を可能とする画素構造を提案したイメージセンサの設計・試作を行い、試作センサの評価により、電源電圧 1.35V での動作に成功した。また、センサ性能に最も影響の大きい画素部消費電力において、支配的要因であった定常バイアス電流を低減する駆動方法を提案し、消費電力を 97%削減することに成功した。

偏光計測は、生体画像分析や光学純度評価に用いられる。これまでに、CMOS プロセスのメタル配線層をメタルグリッド偏光子として利用する偏光計測イメージセンサが提案されており、生体計測への応用が期待される。しかし、センサ性能として重要な偏光分離特性である消光比は、偏光子ピッチに大きく依存するため、0.35  $\mu\text{m}$  プロセスで作製された偏光子では、消光比が 1 桁程度と低かった。そこで微細メタルグリッドによる消光比向上を目指して、65nm プロセスを用いた偏光計測イメージセンサの設計・試作を行った。試作センサにより計測波長 633nm で 2 桁の消光比 43.7 を達成した。

医療分野においても生体計測システムの充実は重要な課題である。てんかん手術では、患部特定のために開頭しての脳波計測が長時間行われる。そこで計測の信頼性向上のため、開頭手術時の脳波計測に加え、光計測法による脳機能計測を行う CMOS イメージセンサデバイスの提案と開発を行った。試作したデバイスは、測定対象の表面イメージの取得や、光計測対象エリアから取得した画像から必要な情報の切り出し、指定領域の信号処理による実効的な感度向上が可能である。基本特性評価により、試作デバイスによる脳機能活動計測に対してその有用性と可能性を示した。

以上のように、生体計測に向けた高機能 CMOS イメージセンサの可能性を広げることに成功した。本研究で得られた知見により、生体計測に向けた高機能 CMOS イメージセンサが生体計測技術の向上に寄与し、ヘルスケアや医療分野へ貢献することが期待される。その成果は、学術的に新しい知見を見出していると判断され、審査委員一同は、本論文が博士(工学)の学位論文として価値あるものと認めた。