

論文内容の要旨

博士論文題目

Development of self-reset image sensor with high signal-to-noise ratio for in-vivo imaging

(生体イメージングに向けた高信号対雑音比を有する自己リセットイメージセンサの開発)

氏名 PAKPUWADON THANET

(論文内容の要旨)

CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor, 相補型金属酸化膜半導体) イメージセンサベースのマウス脳内埋込み型イメージングデバイスは、自由行動下でのマウスの脳内神経活動をリアルタイムで計測できるデバイスである。このデバイスは強力なオンチップ処理能力とコスト優位性がある。また、埋込みに適しているだけでなく、コンパクトなサイズから完全なワイヤレスデバイスとしての可能性も秘めている。

本研究では、このイメージングデバイスにおいて、固有光信号 (IOS: Intrinsic Optical Signal) の撮像を強化するイメージセンサーの開発を行う。この方法は、蛍光イメージングのような遺伝子組み換えのための余分なステップを踏むことなく、マウスの脳における神経活動を研究するための代替方法として選択した。信号強度の変化は、脳のさまざまな状態と相関している。マウスの脳で起こる重要な反応の中には、ごくわずかな信号の変化しか起こらない場合もあります。約 0.1% の変化を検出するためには、高性能なイメージセンサーが必要となる。このような微小な信号を観測するためには、60dB 以上の SNR (信号対雑音比) と高い直線性が必要とされる。一般的なアクティブピクセルセンサー (APS) のピーク SNR は 40~50dB である。

先行研究において、高い実効 SNR を実現するためにセルフリセット方式を用いることを提案し、64dB の高 SNR を得、マウス脳からの血行動態信号を刺激とともに検出することを示している。本研究での提案画素では、画素飽和の検出回路としてシュミットトリガーインバーターを用いた、差動増幅器を用いたコンパレータやインバータチェーンなどの選択肢もあるが、回路面積の増大という代償を負うことになる。シュミットトリガーインバーターは、必要なトランジスタ数が少なく、消費電力も少ないという利点がある。

本研究では、セルフリセットイメージセンサを強化するための代替方法を 2 つ試みた。一つは、フォトダイオードの構造を変更し、FWC (Full-Well Capacity) を増加させ、SNR を改善する方法である。P-diff/N-well/P-sub は、同サイズの N-well/P-sub よりも空乏層傾

域が大きく従って FWC が大きいため、フォトダイオードとして選択した。これにより、1 回のリセットで画素はより多くの電荷を蓄積可能となり、リセットを最小限に抑え、不安定な状態を防ぐことができる。また、二つ目は、MOS キャパシタを用いて FWC を増加させる方式である。最初的方式よりもリニアリティを改善することができた。またシステムのアーチファクトを最小化するための画像処理も構築し、通常画像の復元を行うことに成功した。

氏名	PAKPUWADON THANET
----	----------------------

(論文審査結果の要旨)

CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor, 相補型金属酸化膜半導体) イメージセンサベースのマウス脳内埋込み型イメージングデバイスは、自由行動下でのマウスの脳内神経活動をリアルタイムで計測できるデバイスである。このデバイスは強力なオンチップ処理能力とコスト優位性がある。また、埋込みに適しているだけでなく、コンパクトなサイズから完全なワイヤレスデバイスとしての可能性も秘めている。

本研究では、このイメージングデバイスにおいて、固有光信号 (IOS: Intrinsic Optical Signal) の撮像を強化するイメージセンサーの開発を行う。この方法は、蛍光イメージングのような遺伝子組み換えのための余分なステップを踏むことなく、マウスの脳における神経活動を研究するための代替方法として選択した。信号強度の変化は、脳のさまざまな状態と相関している。マウスの脳で起こる重要な反応の中には、ごくわずかな信号の変化しか起こらない場合もあります。約 0.1% の変化を検出するためには、高性能なイメージセンサーが必要となる。このような微小な信号を観測するためには、60dB 以上の SNR (信号対雑音比) と高い直線性が必要とされる。一般的なアクティブピクセルセンサー (APS) のピーク SNR は 40~50dB である。

先行研究において、高い実効 SNR を実現するためにセルフリセット方式を用いることを提案し、64dB の高 SNR を得、マウス脳からの血行動態信号を刺激とともに検出することを示している。本研究での提案画素では、画素飽和の検出回路としてシュミットトリガーインバーターを用いた。差動増幅器を用いたコンパレータやインバータチェーンなどの選択肢もあるが、回路面積の増大という代償を負うことになる。シュミットトリガーインバーターは、必要なトランジスタ数が少なく、消費電力も少ないという利点がある。

本研究では、セルフリセットイメージセンサを強化するための代替方法を 2 つ試みた。一つは、フォトダイオードの構造を変更し、FWC (Full-Well Capacity) を増加させ、SNR を改善する方法である。P-diff/N-well/P-sub は、同サイズの N-well/P-sub よりも空乏層領域が大きく従って FWC が大きいため、フォトダイオードとして選択した。これにより、1 回のリセットで画素はより多くの電荷を蓄積可能となり、リセットを最小限に抑え、不安定な状態を防ぐことができる。また、二つ目は、MOS キャパシタを用いて FWC を増加させる方式である。最初の方式よりもリニアリティを改善することができた。またシステムのアーチファクトを最小化するための画像処理も構築し、通常画像の復元を行うことに成功した。

今後本技術を発展させることで、高度な脳神経活動の計測への展開が可能であり、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。