

論文内容の要旨

博士論文題目 「分散型眼内撮像方式人工視覚デバイスに関する研究」

氏名 上原 昭宏

(論文内容の要旨)

加齢性黄斑変性症および網膜色素変性症などの網膜疾患により視細胞の受光機能が損なわれるために生じる視力低下あるいは失明は、効果的な治療方法がないため問題となっている。このため網膜組織の電気刺激により視覚を再生する人工視覚デバイスの開発は差し迫った課題である。本論文は、広い視野角かつ自然な視覚の再生可能な人工視覚デバイスを目的として刺激点数および撮像方式に着目して進めた画期的な研究成果をまとめたものである。

【分散型人工視覚デバイスの研究】

人工視覚デバイスは、網膜組織の電気刺激で生じる光覚と呼ばれる光に似た感覚を用いて視覚を再生する。光覚による再生視覚で画像を認識するには 1000 点以上の刺激点数が必要と言われているが、従来のデバイスでは集積回路と刺激電極をそれぞれ配線で 1 対 1 接続する構成であるため、最大刺激点数は実装の制約によって高々 100 点であった。この課題克服のために新規のデバイス構成として「分散型人工視覚デバイス」を提案し、その機能実現の鍵となるマイクロサイズの集積回路(マイクロノード)を設計し、試作および評価した。マイクロノードに通信、受光、および刺激電流制御などの機能を持たせることによって 1 対の配線に多数のマイクロノードを接続でき、刺激点数 1000 点を可能にする新しい眼内埋植型人工視覚デバイスとその実装技術を開発した。0.6- μm CMOS プロセスで試作したマイクロノードはサイズ 500 μm \times 500 μm 、消費電力 12 μW 、画素レベルのアナログ-デジタル変換画素回路のダイナミックレンジ 60dB 以上と、目標通りの撮像動作および電気刺激動作を確認し、本研究で提案した分散型人工視覚デバイスの基本概念とその有効性を実証した。

【分散型人工視覚デバイスの高機能化】

上記のマイクロノードの研究から分散型人工視覚デバイスの長期埋植のために 3 つの技術課題が明らかになった。(1) より暗所での撮像可能な高感度化、(2) 埋植状態でのデバイス特性の計測・モニタ機能、および(3) 網膜上に埋植する眼内撮像方式分散型人工視覚デバイスの開発である。これらの課題解決のためにマイクロノードの高機能化を目指した。まず 1 つ目の課題について、暗所での撮像を可能にするために受光回路の人間の視覚に近い高感度化に取り組んだ。これは回路技術による解決が難しいため、MOS 界面準位を介した電荷移動を利用した新しい PFM 方式受光回路を考案し、この回路を設計・試作し、評価した結果、数百個程度の電子まで光電流を制御することによって従来の受光回路と比べて 2 桁以上の高い感度が得られた。2 つ目の課題では、長期間埋植される人工視覚デバイスの正常動作を保証する上で極めて重要な電極経時変化を体外から計測・モニタする機能がマイクロノードの回路構成の工夫によって実現可能なことを示した。3 つ目の課題として、網膜上への埋植に必須の裏面入射型受光回路を用いた新規の分散型人工視覚デバイスを提案し、実際に SOS (Silicon-on-Sapphire) CMOS テクノロジーを用いて透明基板上に裏面入射型受光回路を設計・試作し、室内動作時に必要な受光感度には足りなかったが、網膜上埋植のための裏面入射受光機能をもつ新しい人工視覚デバイスの原理実証を行った。 以上

(論文審査結果の要旨)

高齢化社会の到来により、今後、加齢性黄斑変性症などの中途失明患者数の増加が予測されている。現在まで、これらの疾患の医学的治療法がなく、そのため視覚機能の回復を目指した網膜神経組織の電気刺激による視覚再生デバイス、いわゆる人工視覚デバイスの実現が待望されており、その研究開発が精力的に進められている。

本博士論文は、著者が患者の眼内埋植負担が軽く、広い視野角で十分な刺激点数を有する自然な視覚再生が可能なデバイスの実現を目指して、パルス周波数変調(PFM)方式ビジョンチップをベースにした新しい分散型眼内撮像方式の人工視覚デバイスを提案し、その設計・試作および機能実証を行うとともに、実際に患者の眼内に埋め込む時に生じる新たな三つの課題を明らかにし、その解決を目指した画素回路の高機能化に関する独創的な研究に取組み、以下に示すような優れた先端技術や新しい知見を得た結果を纏めたものである。

1. マイクロサイズの CMOS デバイス(マイクロノードと呼ぶ)の集合体で構成され、分散センサネットワークを適用した新しい分散型眼内撮像方式人工視覚デバイスを考案・提案した。受光通信および刺激電流制御などの機能を $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ の1チップに集積したマイクロノードを設計し、 $0.6\text{-}\mu\text{m}$ CMOS プロセスを用いて試作し、その評価を行った結果、ノード1個当たりの消費電力 $12 \mu\text{W}$ 、画素回路のダイナミックレンジ 60dB 以上の性能と期待した撮像動作および電気刺激動作(刺激点数 1000 点以上の見込み)を実証した。この結果に基づき、網膜組織中に長期間安定して埋め込む際に必要な画素回路の高機能化技術の開発に取り組んだ。
2. 第一に、暗い屋内動作のために、MOS 界面準位を介した電子のチャージポンピング機構を用いる新規の微少電流源回路を組み込んだ超高感度の PFM 方式受光回路を考案し、試作・評価した結果、従来に比べて約二桁高い感度が得られることを明らかにした。
3. 第二に、長期間の埋植動作状態では人工視覚デバイスの劣化や障害進行をモニタする必要があるため、マイクロノードに3チャンネルのアナログ・マルチプレクサ回路を組み込んで正確に刺激電極インピーダンスを計測する方式を発想し、この計測回路を組み込んだ 16×16 チャンネルの人工視覚デバイスを設計・試作し、 $0.1 \sim 100\text{kHz}$ の範囲において誤差 0.05% 以内で刺激電極の特性計測とモニタが可能であることを実証した。
4. 第三に、網膜上埋植方式に適用できる人工視覚として SOS (Silicon-on-Sapphire)-CMOS 技術を採用して裏面入射光の検出可能なマイクロノード用受光回路を設計・試作・評価し、室内光環境下の動作に必要な 1.3Hz/lux の感度が得られた。

以上のように、本論文は、新しい分散型眼内撮像方式人工視覚デバイスとその画素回路の高機能化の研究開発に関するもので、得られた独創的技術および新しい知見は学術上極めて有意義であるばかりでなく、工学的にも高い価値を有しており、失明患者への早期の適用が期待される。

よって、博士学位論文審査および最終試験の結果、審査員一同は、上原 昭宏 の本論文が博士(工学)の博士学位論文として高い価値を有するものであると評価し、合格と認めた。 以上