

氏名	今井義人		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博甲第9014号		
学位授与年月日	平成31年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	システム情報工学研究科		
学位論文題目	光学スキャナとイメージセンサを用いる可視光通信システムの構築に関する研究		
主査	筑波大学 准教授	博士(工学)	海老原 格
副査	筑波大学 教授	工学博士	水谷 孝一
副査	筑波大学 准教授	博士(工学)	若槻 尚斗
副査	筑波大学 教授	工学博士	伊藤 雅英 (数理物質科学研究科)
副査	防衛大学校 准教授	博士(工学)	小笠原 英子

## 論文の要旨

本研究は、情報を LED (Light emitting diode) や有機 EL (electro-luminescence) 等に代表される発光素子の高速点滅として送信し、カメラで受信する可視光通信システムに関するものである。受信機にイメージセンサを用いる可視光通信システムは、離れた距離に存在する複数の情報源を同時に認識しつつ、それらと選択的な通信が実現できる等、電波無線通信にはない特徴を有している。一方、一般的に普及しているイメージセンサを利用しつつ、高速な変調光に対応可能で、かつ、遠距離に存在する情報源との通信を実現できる通信システムは、著者の知る限り、これまで確立されていない。仮に、そのような通信システムを実現することが出来れば、カメラを搭載したスマートフォンなど、遍在するデバイスを活用して、遠距離に存在する情報源との高速通信が可能になることから、可視光通信の幅を大きく拡げることが期待される。

そこで、本研究は、これまで可視光通信に用いられてこなかった光学スキャナをイメージセンサと組み合わせて利用することで、一般的に普及しているイメージセンサを利用しつつ、高速な変調光に対応可能で、かつ、遠距離に存在する情報源との通信を実現する、新しい可視光通信システムの確立に挑戦している。そして、光学スキャナとイメージセンサを利用する可視光受信機を設計するとともに、屋外環境での運用に適した信号変復調方式や、データ伝送方式などの周辺技術を確立している。さらに、それらを可視光通信システムとして実装すると共に、屋外における実験を実施することで、提案システムが一般的に普及しているイメージセンサを利用しつつ、高速な変調光に対応可能で、かつ、遠距離に存在する情報源との通信を実現できることを明らかにしている。

本論文は全5章で構成されており、各章の概要は以下のとおりとなっている。

第1章では、序論として、本研究の背景、及び、目的を説明している。まず、背景として、先行研究の調査に基づく、可視光通信システムの発展の歴史をまとめている。そして、一般的に普及しているイメージセンサを用いつつ、遠距離に存在する情報源から送信された高速な変調光の受信を可能とする技術が必要とされている一方、そのような技術がいまだ確立されていないことを示している。そこで、カメラを搭載したスマートフォンなど、遍在するデバイスを活用して、遠距離に存在する情報源との高速通信を可能にする可視光通信システムの確立を、本研究の目的として定めている。

第2章では、本研究で提案する可視光通信システム（送信機、および、受信機）の概要と、その基本的な原理を説明している。そして、先行研究との相違点を踏まえつつ、本研究で提案する可視光通信システムは、原理的には、一般的に普及しているイメージセンサを利用しつつ、高速な変調光に対応可能で、かつ、遠距離に存在する情報源との通信が実現できることを示している。

第3章は、光学スキャナとイメージセンサを利用する可視光通信システムを設計している。まず、光学系（発光素子、光学スキャナ、および、イメージセンサ）に必要な条件を整理した上で、実際に送信機と受信機を構築している。そして、最も基本的な変復調方式である PWM (Pulse width modulation) を用いて、通信システムの性能評価実験を行っている。そして、実験の結果、屋外環境での運用に適した信号変復調方式や、データ伝送方式などの周辺技術が、提案システムには不可欠であることを明らかにしている。

第4章は、屋外環境での運用に適した信号変復調方式や、データ伝送方式を検討している。そして、PSK (Phase shift keying)、および、ブロック伝送が、屋外環境での運用に適していることを明らかにすると共に、それらを可視光通信システムとして実装している。そして、屋外における実験を実施し、提案システムが一般的に普及しているイメージセンサを利用しつつ、高速な変調光に対応可能で、かつ、遠距離に存在する情報源との通信を実現できることを明らかにしている。

第5章は、本研究の総括を行っている。第2章から第4章までの研究を通じて、これまで可視光通信に用いられてこなかった光学スキャナをイメージセンサと組み合わせて利用することで、一般的に普及しているイメージセンサを利用しつつ、高速な変調光に対応可能で、かつ、遠距離に存在する情報源との通信を実現する、新しい可視光通信システムの構築に成功し、可視光通信の幅を拡げることにより貢献できたと結論づけている。

## 審査の要旨

### 【批評】

ヒトの目に見える光（可視光）を用いてワイヤレスに情報を伝送する可視光通信は、屋内外に広く普及している照明インフラや、スマートフォンなどに搭載されているイメージセンサを通信デバイスとして利活用することで、電波に続く新しい無線通信技術として着目を集めている。一方、可視光通信は、そのパフォーマンスが照明やイメージセンサのスペックによって制約されることが多い。特にフレームレートの小さな汎用イメージセンサを利用して可視光通信を行うためには、イメージセンサ全体で信号を受光する必要があるなど、通信距離が著しく制限されていた。

そこで、本研究は、汎用イメージセンサを利用する可視光通信における通信距離の問題を解決するために、光学スキャナとイメージセンサを組み合わせた、新しい可視光通信システムを提案している。この技術は、遠距離に存在する情報源から送信される高速な変調光を、光学スキャナを用いてイメージセンサ上に時間-空間マッピングすることで、フレームレートの小さな汎用イメージセンサを用いつつ、遠距離に存在する情報源から送信される高速な変調光が受光できるようになっている。著者は、この仕組みを独自に提唱するとともに、実際に通信システムを構築し、最適な変復調方式やデータ伝送方式を新しく見出している。そして、位相偏移変調を用いることで、通信距離が大きくなるにつれて問題となる外光の影響を大きく低減できること、また、ブロック伝送を用いることで、光学スキャナに起因する受信信号の周期欠損の問題を解決できることを明らかにしている。最終的に、新しい可視光通信システムは、20 m 遠方に存在する屋外情報源からの信号を、ビット誤り率  $10^{-3}$  程度で伝送する能力を有していることを、実験により明らかにしている。

本研究は、フレームレートの小さな汎用イメージセンサを利用する可視光通信において、通信距離の問題を初めて解決する技術を確立している。そして、可視光通信を利用した屋内ナビゲーションや車々間通信において、広く普及しているスマートフォンを通信デバイスとして利活用するために不可欠な基本技術となる可能性を大いに有している。以上より、本研究の成果は、可視光通信の発展に大きく寄与しており、高く評価できる。

### 【最終試験の結果】

平成31年2月7日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

### 【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。