

研究代表者	路 姍	名古屋大学 大学院工学研究科
共同研究者	唐 正 強	静岡大学 工学部 電気電子工学科
共同研究者	山 里 敬 也	名古屋大学 大学院工学研究科

1 研究の背景および目的

近年、IoT 機器、車載センサ、スマートモビリティ、屋内測位、スマート照明システムなどの発展に伴い、多数の端末が高信頼かつ低遅延に情報を交換する通信基盤の重要性が高まっている。従来の無線通信では、電波を用いた通信方式が広く利用されているが、周波数資源の逼迫、電磁干渉、セキュリティ、利用環境の制約などが課題となる場合がある。このような背景のもと、LED 照明や表示装置などの光源を情報送信に利用する可視光通信が注目されている。

可視光通信は、LED の高速な点滅を利用して情報を伝送する通信方式であり、人間の目には照明として認識される一方で、受信機側では光強度の変化を信号として検出することができる。特に、LED は低消費電力、高速応答、長寿命といった特徴を有しており、既存の照明インフラや車載 LED、信号機、ディスプレイ、センサノードなどを通信媒体として活用できる点に大きな利点がある。そのため、可視光通信は、電波通信を補完する新しい通信基盤として、IoT システムへの応用が期待されている。

また、近年では、フォトダイオードだけでなく、カメラやイメージセンサを受信機として利用するイメージセンサ通信も研究されている。イメージセンサを用いる場合、受信画像中の光源位置や形状、輝度分布を利用できるため、複数の光源を空間的に分離しながら通信を行うことが可能となる。さらに、ローリングシャッター方式のカメラでは、LED の点滅が画像中の縞状パターンとして記録されるため、通常のフレームレートを超えた情報取得が可能となる。近年は、イベントカメラを用いた可視光通信も注目されており、輝度変化のみを非同期的に検出することで、低遅延かつ高時間分解能な受信が可能となる。これらの技術は、車車間通信、路車間通信、協調認識、屋内 IoT、ロボット制御などへの応用可能性を有している。

一方で、実環境において可視光通信を利用する場合、単一の LED 光源のみを対象とする理想的な条件とは異なり、多数の光源が同時に存在する状況を考慮する必要がある。例えば、車載可視光通信では、複数の車両のヘッドライト、テールランプ、方向指示器、信号機、街灯などが同時に受信画像中に現れる。また、屋内 IoT 環境においても、複数の LED 照明や表示装置が同時に通信を行うことが想定される。このような多光源環境では、受信機は複数の光信号を識別し、それぞれの情報を正しく復調する必要がある。

多光源可視光通信における主要な課題の一つは、受信画像上での光源の重なりである。複数の LED が近接して配置されている場合や、送受信機の距離が大きい場合、受信画像中で光源領域が重なり、個々の LED 信号を分離することが困難になる。また、車載環境のように送信機と受信機が相対的に移動する場合、光源の位置、大きさ、輝度、形状が時間的に変化するため、固定的な画像処理パラメータでは安定した検出が難しい。

第二の課題は、光軌跡や符号間干渉の発生である。ローリングシャッターカメラや回転 LED 送信機を用いたイメージセンサ通信では、LED の点滅や運動により、受信画像上に光の軌跡や縞状信号が形成される。このとき、隣接する信号成分が重なったり、光軌跡同士が交差したりすると、符号間干渉や光軌跡干渉が発生し、ビット誤り率が増加する。したがって、光源の物理的配置、発光パターン、撮像方式、受信画像上の幾何構造を考慮した理論モデル化が不可欠である。

第三の課題は、実環境変動への適応である。可視光通信では、周囲光、反射、遮蔽、撮影距離、露光時間、焦点ずれ、送受信機の種類、移動速度などが受信品質に大きく影響する。特に IoT 応用や車載応用では、これらの条件が時間的に変化するため、事前に固定したしきい値や復調規則だけでは十分な通信信頼性を確保できない場合がある。そのため、実際の受信画像や受信信号から通信状態を推定し、検出・復調・符号化・制御パラメータを動的に調整する技術が必要となる。

上述のように、多光源 IoT 可視光通信では、物理的な光伝搬、LED の発光パターン、画像センサの撮像特性、複数光源間の干渉、受信画像処理、誤り訂正符号、通信制御が複雑に関係している。従来の通信理論に基づく解析は、個々の要因を明確に理解し、性能限界を評価する上で重要である。しかし、実環境では、モ

デル化が困難な非線形性や不確実性が多く含まれるため、理論解析のみで最適な受信処理や制御規則を設計することには限界がある。

このような問題に対して、AI および機械学習を活用することにより、受信信号や画像データに含まれる特徴を学習し、環境に応じて処理を適応化することが期待される。例えば、受信画像中の LED 領域検出、重なり光源の識別、輝度分布に基づく信号判定、しきい値の自動調整、復調信頼度の推定、誤り訂正復号との連携などにおいて、AI は有効な手段となり得る。また、多元接続環境におけるシグネチャ符号設計や、複数ユーザ・複数光源の信号分離においても、機械学習を用いた End-to-End 型の最適化は有望である。

本研究では、このような背景を踏まえ、AI を活用した多光源 IoT 可視光通信システムの最適化と制御を目的とした。具体的には、LED プロペラ送信機および回転光軌跡型イメージセンサ通信における光軌跡の理論モデル化、干渉発生条件の解析、符号間干渉モデルと BER 性能評価、さらに機械学習を用いた通信信頼性向上技術について検討した。これにより、多光源環境における可視光通信の性能劣化要因を明確化し、実環境に適応可能な AI 支援型受信処理・符号化・制御技術の基盤を構築することを目指した。

2 研究実施内容および成果

2-1 多光源 VLC システムの構成

本研究では、複数の LED 光源を送信機として用い、イメージセンサまたはイベントカメラを受信機とする多光源可視光通信システムを対象とした。一般的な可視光通信では、LED の光強度を高速に変調し、その明滅パターンを受信機側で検出することにより情報伝送を行う。本研究で扱う多光源 VLC システムでは、単一の LED ではなく、複数の LED 送信機が同時または準同時に情報を送信する状況を想定した。このような構成は、車載通信、屋内 IoT、スマート照明、センサネットワークなど、多数の光源が自然に存在する環境に適している。

送信側では、各 LED 光源が情報ビット系列に基づいて発光パターンを生成する。受信側では、カメラ画像中に現れる LED 領域または光軌跡を検出し、各光源に対応する信号系列を抽出する。イメージセンサを用いる場合、受信画像上の空間情報を利用できるため、複数の光源を位置情報に基づいて分離できる利点がある。一方で、送信機と受信機の距離が大きい場合、あるいは光源が密に配置されている場合には、受信画像上で複数の LED 領域が重なり、個々の信号を正しく識別することが困難となる。

本研究では、このような多光源環境において、光源検出、信号分離、同期、復調、誤り訂正を一連の受信処理として整理した。具体的には、受信画像中の輝度分布や幾何的特徴を利用し、LED 領域の位置、大きさ、形状、輝度変化を抽出する構成を検討した。また、ローリングシャッター方式のイメージセンサを利用する場合には、LED の明滅が画像中の縞状パターンとして記録されるため、この縞パターンを時間方向の信号系列として復元する処理を想定した。さらに、イベントカメラを用いる場合には、輝度変化が発生した画素のみを非同期に検出できるため、高速かつ低遅延な信号取得が可能となる。

多光源 VLC システムでは、通信性能を劣化させる要因が複数存在する。代表的なものとして、光源間の重なり、光軌跡間干渉、符号間干渉、周囲光の変動、送受信機の相対移動、撮像条件の変化、同期誤差などが挙げられる。これらの要因は相互に関連しており、単純な受信しきい値や固定的な画像処理だけでは安定した通信品質を確保することが難しい。そのため、本研究では、まず物理的な発光・撮像過程をモデル化し、その上で干渉条件や誤り発生要因を解析する方針を採用した。

2-2 LED プロペラ型イメージセンサ通信のモデル化

本研究の中心的な検討対象の一つとして、LED プロペラ型イメージセンサ通信を取り上げた。LED プロペラ型通信では、回転するプロペラ状の装置に LED を配置し、LED の発光パターンを制御することで、受信画像上に光の軌跡を形成する。この光軌跡を情報担体として利用することにより、通常の点状 LED とは異なる空間的な信号表現が可能となる。特に、回転運動によって形成される光軌跡は、受信画像上に連続的または離散的なパターンとして現れるため、画像処理により信号系列を抽出できる。

しかし、LED プロペラ型通信では、LED の位置、回転速度、発光タイミング、撮像時間、カメラの露光条件などが受信画像上の光軌跡形状に大きく影響する。そのため、通信性能を評価するためには、単に LED の明滅だけでなく、物理的な回転運動と撮像過程を含めたモデル化が必要となる。本研究では、LED の回転に伴って受信画像上に形成される光軌跡の幾何学的構造を整理し、発光タイミングと画像上の光軌跡位置との対

応関係を明確化した。

具体的には、LED の円運動、カメラの撮像平面、露光時間、発光パターンとの関係を考慮し、受信画像上に形成される光軌跡を理論的に記述する枠組みを検討した。このモデル化により、LED の配置や回転条件を変化させた場合に、受信画像上の信号パターンがどのように変化するかを説明できる。また、複数の光軌跡が同一画像内に現れる場合に、それらがどの条件で重なり、どの条件で分離可能であるかを解析する基盤を得た。

この検討により、LED プロペラ型イメージセンサ通信では、送信信号設計と受信画像処理を独立に考えるのではなく、発光パターン、物理運動、撮像方式、復調処理を統合的に設計する必要があることが明らかとなった。特に、多光源環境においては、各 LED または各光軌跡が受信画像上で明確に識別可能であることが通信信頼性の前提となる。そのため、物理モデル化は、干渉防止、送信パターン設計、受信処理最適化の基礎として重要である。

2-3 光軌跡干渉の解析と防止

LED プロペラ型イメージセンサ通信における重要な課題の一つは、光軌跡干渉である。光軌跡干渉とは、受信画像上で複数の光軌跡が接近または重なり、個々の信号成分を正しく識別できなくなる現象である。特に、複数 LED を用いる場合や、発光パターンが密に配置される場合、あるいは撮像条件によって光軌跡が広がる場合には、干渉が発生しやすくなる。

本研究では、光軌跡干渉の発生条件を理論的に整理した。具体的には、LED の位置関係、回転角度、発光タイミング、受信画像上での光軌跡幅、軌跡間距離などを考慮し、複数の光軌跡が互いに重なる条件を解析した。光軌跡が重なると、受信画像上の輝度分布が混合されるため、受信側ではどの光軌跡がどの送信信号に対応するかを判定することが困難になる。その結果、誤検出や復調誤りが発生し、通信品質が低下する。

この問題に対して、本研究では干渉を未然に防止するための送信設計および配置条件を検討した。光軌跡間の十分な距離を確保すること、発光タイミングを適切に制御すること、信号パターンの配置を工夫することにより、受信画像上での重なりを回避できる可能性がある。また、受信画像上での幾何的特徴を利用し、干渉が発生しやすい領域を識別することにより、復調処理の信頼度を評価することも可能である。

光軌跡干渉の解析は、多光源 VLC システムにおける干渉制御の基礎となる。従来の電波通信における干渉解析では、主に信号波形や周波数成分の重なりが問題となるが、イメージセンサ通信では、受信画像上の空間的な重なりも重要な干渉要因となる。そのため、光通信特有の空間構造を考慮した干渉モデルが必要である。本研究で得られた知見は、複数 LED を用いた可視光通信システムにおいて、送信光源配置、発光パターン、受信画像処理を設計する際の基礎指針となる。

この成果は、LED プロペラ型イメージセンサ通信における光軌跡の理論モデル化および干渉防止手法としてまとめられ、IEICE Communications Express において発表された[1]。当該成果により、光軌跡型 VLC における物理的な干渉発生メカニズムを明確化し、実システム設計に向けた理論的基盤を構築した。

2-4 符号間干渉モデルと BER 性能評価

多光源 VLC および光軌跡型イメージセンサ通信では、光信号の時間的・空間的広がりによって符号間干渉が発生する場合がある。符号間干渉とは、あるシンボルに対応する受信信号成分が隣接するシンボルの受信成分と重なり、復調判定に影響を与える現象である。特に、回転 LED 送信機を用いた場合、受信画像上に形成される光軌跡は点ではなく一定の長さや幅を持つため、隣接する発光区間の信号が重なりやすい。

本研究では、回転光軌跡型イメージセンサ通信を対象として、符号間干渉のモデル化と BER 性能解析を行った。まず、LED の発光パターンと回転運動により形成される光軌跡信号を整理し、受信画像上で隣接シンボルがどのように重なるかを記述するモデルを構築した。次に、符号間干渉が復調判定に与える影響を考慮し、ビット誤り率性能を評価するための解析枠組みを検討した。

この解析により、受信信号の誤りは単なる雑音だけでなく、光軌跡の構造やシンボル間の重なりによっても発生することが明確となった。特に、発光時間、回転速度、撮像条件、光軌跡幅などのパラメータは、符号間干渉の大きさに直接関係する。そのため、BER 性能を改善するためには、受信しきい値の調整だけではなく、送信パターン、シンボル配置、撮像条件、受信画像処理を総合的に設計する必要がある。

BER 解析は、通信システムの信頼性を定量的に評価する上で不可欠である。実験結果のみでは、どの要因が性能劣化に寄与しているかを明確に分離することが難しいが、理論モデルを用いることにより、システム

パラメータと誤り率の関係を体系的に理解できる。本研究で構築した ISI モデルおよび BER 解析は、今後の高信頼 VLC システム設計において、許容可能な発光条件、撮像条件、復調条件を決定するための指標となる。

この成果は、回転光軌跡型イメージセンサ通信における ISI モデルおよび BER 性能解析として、IEEE Communications Letters において発表された[2]。当該成果により、光軌跡型通信における符号間干渉の影響を定量的に評価し、通信信頼性を向上させるための設計指針を得ることができた。

2-5 機械学習支援型符号設計

本研究では、AI を活用した通信システム最適化の基盤技術として、機械学習支援型の符号設計についても検討した。多光源 IoT 可視光通信では、複数の LED 送信機が同時に信号を送信するため、受信側では複数信号の識別、干渉抑制、信頼度推定、復号処理を高精度に行う必要がある。この問題は、多元接続通信における信号分離や符号設計と深く関連している。

本研究では、多元接続レイリーフェージングチャネルを対象として、End-to-End 型の機械学習支援シグネチャ符号設計を検討した。従来の通信システム設計では、送信符号、チャネルモデル、受信機、復号器をそれぞれ個別に設計し、それらを組み合わせて性能評価を行うことが多い。一方、機械学習を用いた End-to-End 型設計では、送信側のシグネチャ符号と受信側の検出・復号処理を一体として最適化できる可能性がある。

このアプローチでは、複数ユーザまたは複数送信源が同時に信号を送信する環境において、受信側で識別しやすいシグネチャ構造を学習することが期待される。多光源 VLC に置き換えると、複数 LED からの信号を受信画像や受信波形上で識別するための符号設計、パイロット設計、信号分離手法に応用できる可能性がある。特に、光源間の重なりや干渉が存在する場合には、単純な直交符号や固定的な識別規則だけでは十分でない場合があり、実環境データに基づいて適応的に設計された符号や検出規則が有効となる。

本研究で検討した機械学習支援型符号設計は、可視光通信に直接限定されるものではないが、多光源 IoT 通信における AI 支援型制御の基礎となる。すなわち、複数送信源が存在する環境において、信号構造と受信処理を統合的に最適化するという考え方は、多光源 VLC における光源識別、干渉抑制、復調信頼度向上に応用可能である。また、将来的には、受信画像から得られる特徴量と符号設計を組み合わせ、通信環境に応じた送信パターンや受信処理を適応的に制御する AI 支援型 VLC システムへ発展させることができる。

この成果は、機械学習支援型シグネチャ符号設計として、IEICE Transactions on Fundamentals において発表された[3]。当該成果により、AI を用いた通信システム最適化の可能性を示すとともに、多光源 IoT 可視光通信における将来的な適応制御・信号識別技術への展開可能性を明らかにした。

2-6 多光源 IoT 可視光通信システムへの応用可能性

上記の成果により、多光源可視光通信システムにおいて重要となる三つの基盤技術を整理することができた。第一に、LED 光源の物理的配置や発光パターンが受信画像および通信性能に与える影響を理論的に解析する技術である。第二に、受信画像上で発生する光軌跡干渉や符号間干渉をモデル化し、BER 性能として評価する技術である。第三に、機械学習を用いて複数信号の識別や通信制御を最適化するための AI 支援型符号設計技術である。

これらの技術は、多数の LED 送信機が存在する IoT 環境において、通信品質を安定化させるための基盤となる。特に、車載可視光通信やスマートモビリティでは、送受信機の相対位置、移動速度、周囲光条件、遮蔽、画像センサの撮像条件などが絶えず変化するため、固定的な通信パラメータでは安定した性能を得ることが難しい。本研究で得られた干渉モデル、BER 解析、AI 支援型符号設計の知見は、このような実環境変動に適応可能な可視光通信システムの設計に貢献するものである。

3 研究成果

3-1 多光源 VLC における性能劣化要因の明確化

本研究の第一の成果は、多光源 IoT 可視光通信システムにおいて通信性能を劣化させる主要因を整理し、その発生メカニズムを明確化した点である。可視光通信では、LED 光源を情報送信に用いるため、送信信号は光の強度変化として空間中を伝搬し、受信機側ではフォトダイオード、イメージセンサ、イベントカメラ等により検出される。特にイメージセンサ通信では、受信画像上に形成される LED 領域、縞状パターン、光軌跡などを信号として利用するため、通信性能は電氣的な雑音だけでなく、光源の物理的配置、撮像条件、

画像上の幾何構造に強く依存する。

本研究では、多光源環境において問題となる要因として、光源領域の重なり、光軌跡間干渉、符号間干渉、周囲光変動、同期誤差、送受信機の相対移動、撮像条件の変化を整理した。これらの要因は独立に存在するのではなく、相互に関連して通信品質に影響を与える。例えば、複数 LED が受信画像上で近接している場合、光源領域の重なりにより個々の信号を分離することが難しくなる。また、回転 LED 送信機や LED プロペラ送信機では、光源の運動によって受信画像上に光軌跡が形成されるため、その光軌跡同士が重なると、信号判定に必要な輝度情報が混合される。さらに、ローリングシャッタ方式や光軌跡型通信では、隣接シンボルの信号が画像上で重なり、符号間干渉として現れる場合がある。

このように、本研究では、多光源 VLC の性能劣化を単なる雑音問題として扱うのではなく、物理的な発光過程、受信画像上の空間構造、時間方向の信号変化、復調処理の相互作用として捉えた。この視点により、実環境における可視光通信システムを設計する際には、通信理論、画像処理、光学的モデル化、AI による適応制御を統合的に考える必要があることを明らかにした。

3-2 LED プロペラ型イメージセンサ通信における光軌跡モデル化

第二の成果は、LED プロペラ型イメージセンサ通信における光軌跡の理論モデル化を行い、受信画像上に形成される信号構造を明確化した点である。LED プロペラ型通信では、回転する LED が発光することにより、受信画像上に光の軌跡が形成される。この光軌跡は、LED の発光タイミング、回転速度、LED 配置、カメラの露光条件、撮像タイミングなどによって決定される。したがって、受信画像上の光軌跡を正しく解釈するためには、送信信号と物理的運動、さらに撮像過程との対応関係をモデル化する必要がある。

本研究では、LED プロペラ送信機において形成される光軌跡を理論的に記述し、光軌跡の位置、長さ、幅、間隔が通信性能に与える影響を検討した。特に、LED の回転運動により、時間的な信号系列が受信画像上の空間的パターンとして記録される点に着目した。これにより、時間領域の符号系列と画像領域の光軌跡との対応関係を整理し、受信側で信号を抽出するための基礎を構築した。

この成果により、LED プロペラ型イメージセンサ通信では、送信信号設計と画像処理を別々に最適化するのではなく、発光制御、回転運動、撮像条件、復調処理を一体として設計する必要があることが示された。これは、多光源 VLC システムにおいて、物理世界の構造を反映した通信モデルを構築する重要性を示すものである。

3-3 光軌跡干渉の発生条件と干渉防止手法

第三の成果は、LED プロペラ型イメージセンサ通信における光軌跡干渉の発生条件を解析し、干渉を防止するための設計指針を示した点である。光軌跡干渉は、複数の光軌跡が受信画像上で重なり、個々の信号成分を分離できなくなる現象である。この干渉が発生すると、受信側では光軌跡の輝度情報を正しく取得できず、復調誤りが増加する。

本研究では、LED 配置、回転角度、発光タイミング、光軌跡幅、光軌跡間隔などのパラメータに基づき、光軌跡が干渉する条件を理論的に整理した。その結果、光軌跡干渉は単に LED 数が増加することによって発生するだけでなく、LED の空間配置、発光タイミング、撮像条件の組合せによって発生することが明らかとなった。したがって、多光源 VLC システムでは、LED の物理配置だけでなく、発光パターンや撮像条件も含めて設計する必要がある。

また、干渉を防止するためには、受信画像上で光軌跡間に十分な分離を確保すること、発光タイミングを調整して重なりを避けること、光軌跡の形成領域を制御することが有効であることを示した。これにより、光軌跡型 VLC における干渉抑制のための基礎的な設計指針を得た。

この成果は、Shin Asaoka, Shan Lu, Takaya Yamazato, and Zhengqiang Tang, “Theoretical Modeling and Interference Prevention of Light Trails for LED-Propeller Based Image Sensor Communication,” IEICE Communications Express, Vol. X14-B, No. 12, pp. 436–440, 2025 において発表された。本論文では、LED プロペラ型イメージセンサ通信における光軌跡の理論モデル化および干渉防止手法を示しており、本助成研究における多光源 VLC の物理モデル化に関する主要成果である。

3-4 回転光軌跡型通信における ISI モデルと BER 性能解析

第四の成果は、回転光軌跡型イメージセンサ通信における符号間干渉をモデル化し、BER 性能を解析した点である。光軌跡型通信では、受信画像上の光信号が一定の広がりを持つため、隣接するシンボル間で信号成分が重なり、符号間干渉が発生する場合がある。符号間干渉は、復調判定の誤りを引き起こす主要因の一つであり、通信信頼性を評価するためには、その影響を定量的に把握する必要がある。

本研究では、回転 LED 送信機によって形成される光軌跡信号を対象として、隣接シンボル間の重なりを考慮した ISI モデルを構築した。このモデルにより、発光時間、回転速度、撮像条件、光軌跡幅、シンボル間隔などのパラメータが符号間干渉に与える影響を解析できるようになった。さらに、符号間干渉を考慮した受信信号モデルに基づき、ビット誤り率性能を評価する枠組みを構築した。

その結果、回転光軌跡型通信では、通信性能の劣化が雑音成分だけでなく、受信画像上の信号構造に起因することが明らかとなった。特に、光軌跡の幅や隣接シンボルとの距離が復調性能に大きく影響するため、送信パターンや撮像条件を適切に設計することが重要である。この成果は、実験的に観測される誤り率の変化を理論的に説明するだけでなく、今後のシステム設計において、どのパラメータを制御すべきかを示す指標となる。

この成果は、S. Asaoka, S. Lu, T. Yamazato, and Z. Tang, “ISI Modeling and BER Performance for Rotating Light-Trail Image Sensor Communication,” IEEE Communications Letters, Vol. 30, pp. 1984–1988, 2026 において発表された。本論文は、回転光軌跡型イメージセンサ通信における符号間干渉と BER 性能の関係を明確化したものであり、本助成研究における通信品質評価に関する主要成果である。

3-5 機械学習支援型シグネチャ符号設計の成果

第五の成果は、AI を活用した通信信頼性向上技術として、機械学習支援型シグネチャ符号設計を行った点である。多光源 IoT 可視光通信では、複数の LED 送信機が同時に信号を送信するため、受信側では各光源に対応する信号を識別し、干渉を抑制しながら復調する必要がある。この問題は、多元接続通信におけるユーザ識別やシグネチャ符号設計と共通する構造を持つ。

本研究では、多元接続レイリーフェージングチャネルを対象として、End-to-End 型の機械学習支援シグネチャ符号設計を検討した。具体的には、複数ユーザが同時に通信を行う環境において、送信側のシグネチャ符号と受信側の検出処理を統合的に最適化する手法を検討した。従来の符号設計では、符号構造や復号規則を手で設計することが多いが、機械学習を用いることで、チャネル特性や干渉構造に応じた符号設計が可能となる。

この成果は、可視光通信に直接限定されるものではないが、多光源 VLC における AI 支援型信号識別・干渉抑制・受信制御の基盤技術として位置付けられる。多光源環境では、各 LED 信号を識別するためのパイロット信号、符号系列、発光パターンの設計が重要となる。機械学習支援型シグネチャ符号設計は、複数信号が重なり合う環境において、受信側で分離しやすい信号構造を学習する手段として応用可能である。

この成果は、L. Wei, S. Lu, and H. Kamabe, “End-to-End Machine-Learning-Aided Signature Code for Multi-Access Rayleigh Fading Channel,” IEICE Transactions on Fundamentals, Vol. E109-A, No. 3, pp. 414–423, 2026 において発表された。本論文は、機械学習を用いた通信システム設計の有効性を示すものであり、本助成研究における AI 活用の基礎的成果である。

3-6 研究成果の統合的意義

以上の成果を総合すると、本研究では、多光源 IoT 可視光通信システムの実現に向けて、物理モデル化、干渉解析、通信性能評価、AI 支援型符号設計という複数の側面から研究を進めた。特に、光軌跡型イメージセンサ通信において、物理的な発光・撮像過程が通信性能に与える影響を理論的に明らかにしたことは、本研究の重要な成果である。

本研究の特徴は、多光源 VLC を単なる応用システムとして扱うのではなく、実環境で発生する物理現象を通信モデルとして定式化し、その上で誤り率性能や干渉条件を解析した点にある。これにより、実験的な性能評価だけでは把握しにくい通信性能劣化の要因を明確化することができた。また、AI および機械学習を用いた符号設計を組み合わせることで、将来的な適応制御型 VLC システムへの展開可能性を示した。

これらの成果は、車載可視光通信、スマートモビリティ、屋内 IoT、センサネットワーク、光無線通信システムにおいて、複数 LED 光源を利用した高信頼通信を実現するための基盤となる。特に、通信環境が時間的に変化する実環境では、固定的なパラメータ設計だけでは十分な性能を確保できない場合がある。本研究で得られたモデル化、干渉解析、BER 評価、AI 支援型設計の知見は、環境に応じて通信パラメータを適応的に制御する次世代 VLC システムの構築に貢献するものである。

4 成果の位置づけと意義

4-1 学術的意義

本研究の学術的意義は、多光源 IoT 可視光通信システムにおける通信性能劣化の要因を、物理モデル、干渉解析、誤り率評価、AI 支援型符号設計の観点から体系的に整理した点にある。可視光通信は、LED の発光パターンを情報伝送に利用する通信方式であるが、実環境では、光源の配置、送受信機の相対位置、撮像条件、周囲光、光源間干渉などが複雑に影響する。特にイメージセンサ通信では、受信信号が画像上の空間パターンとして現れるため、従来の電波通信とは異なる形で干渉や誤りが発生する。

本研究では、このような可視光通信特有の問題を、単なる実験的観測にとどめず、LED プロペラ型通信および回転光軌跡型イメージセンサ通信を対象として理論的にモデル化した。これにより、光軌跡の形成、光軌跡間干渉、符号間干渉、BER 性能の関係を明確化することができた。特に、物理的な発光・撮像過程が通信性能に直接影響することを示した点は、多光源 VLC システムの設計理論を構築する上で重要である。

また、機械学習支援型シグネチャ符号設計の検討により、AI を用いた通信システム最適化の可能性を示した。多光源通信では、複数の送信源からの信号を受信側で識別し、干渉を抑制する必要がある。この課題に対して、送信信号構造と受信処理を統合的に最適化するという考え方は、今後の AI 支援型通信システム設計において重要な方向性を示すものである。

4-2 実用的意義

本研究成果は、車載可視光通信、スマートモビリティ、屋内 IoT、スマート照明、センサネットワークなど、複数の LED 光源が存在する実環境への応用において有用である。これらの環境では、通信対象となる光源だけでなく、周辺の照明、車両ライト、信号機、反射光などが同時に受信されるため、受信画像中から必要な信号を正確に抽出することが重要となる。

特に車載通信では、送信機と受信機が相対的に移動するため、受信画像上の光源位置や輝度は時間的に変化する。また、交通環境では複数の車両やインフラ光源が同時に存在するため、光源間干渉や信号の重なりが避けられない。本研究で得られた光軌跡モデル化、干渉発生条件の解析、ISI・BER 評価の知見は、このような動的環境において、通信性能を予測し、適切な送信パターンや受信処理を設計するための基礎となる。

さらに、AI を活用した適応制御の考え方は、実環境で変動する通信条件に対応するために重要である。固定的なしきい値や手動で設計されたパラメータのみでは、周囲光や撮像条件の変化に十分対応できない場合がある。本研究の成果は、受信画像や信号品質に応じて検出条件、復調規則、符号設計、制御パラメータを適応的に調整するシステムの構築に向けた基盤となる。

4-3 本研究成果の位置づけ

本研究は、可視光通信の中でも、特に多光源環境およびイメージセンサ受信に着目した研究である。従来の可視光通信研究では、単一 LED と単一受信機を前提とした通信速度や誤り率評価が中心となる場合が多かった。一方、本研究では、複数 LED が存在する実環境において、受信画像上で信号がどのように形成され、どのような条件で干渉が発生し、それが通信性能にどのような影響を与えるかを明らかにした。

この点において、本研究は、可視光通信を単なる光強度変調通信としてではなく、物理空間、画像センサ、信号処理、符号設計、AI 制御が結びついた統合的な通信システムとして捉えたものと位置づけられる。特に、光軌跡型イメージセンサ通信における干渉解析と BER 評価は、多光源 VLC システムの実用化に向けた設計指針を与えるものである。

また、機械学習を用いた通信信頼性向上の成果は、多光源 VLC における将来的な AI 支援型制御へ展開可能である。すなわち、本研究は、可視光通信の物理モデル化に基づく理論的研究と、AI を用いた適応的通信制御技術を接続する位置にある。これにより、今後の高信頼・低遅延・多接続型の光無線 IoT システムの実現に向けた基礎的かつ発展的な知見を提供するものである。

【参考文献】

- [1] S. Asaoka, S. Lu, T. Yamazato, and Z. Tang, "Theoretical Modeling and Interference Prevention of Light Trails for LED-Propeller Based Image Sensor Communication," IEICE Communications Express, Vol. X14-B, No. 12, pp. 436–440, 2025.
- [2] S. Asaoka, S. Lu, T. Yamazato, and Z. Tang, "ISI Modeling and BER Performance for Rotating Light-Trail Image Sensor Communication," IEEE Communications Letters, Vol. 30, pp. 1984–1988, 2026.

- [3] L. Wei, S. Lu, and H. Kamabe, “End-to-End Machine-Learning-Aided Signature Code for Multi-Access Rayleigh Fading Channel,” IEICE Transactions on Fundamentals, Vol. E109-A, No. 3, pp. 414–423, 2026.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
End-to-End Machine-Learning-Aided Signature Code for Multi-Access Rayleigh Fading Channel	IEICE Transactions on Fundamentals	March 2026
Design of an Iterative Detection and Decoding Receiver for LDPC-Coded Visible Light Communication	IEEE VTC2026-Spring	June 2026
Deep Learning-Aided Polar Coded Modulation	IEEE VTC2025-Fall	October 2025
Theoretical Performance Analysis for Image Sensor Communication Using a Propeller LED Transmitter,” International Conference on Emerging Technologies for Communications	International Conference on Emerging Technologies for Communications, ICETC 2025	November 2025
ISI Modeling and BER Performance for Rotating Light-Trail Image Sensor Communication	IEEE Communications Letters	May 2026
Theoretical Modeling and Interference Prevention of Light Trails for LED-Propeller Based Image Sensor Communication	IEICE Communications Express	Dec. 2025
Robust Detection of Overlapping LED Spots in Dense VLC via Pilot-Aided Geometric Recognition	Asia-Pacific Conference on Communications, APCC 2025	November 2025