

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04375

研究課題名（和文）逐次干渉キャンセラマルチアクセス可視光通信における照明環境とユーザ品質最適化

研究課題名（英文）Optimization of lighting environment and user quality in multi-access visible light communication

研究代表者

大柴 小枝子 (OSHIBA, SAEKO)

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授

研究者番号：90372599

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、病院内等の電磁波通信が制限されているような環境で、複数のIoT機器が利用されているような環境でも、安定した通信を実現するため、複数の発光ダイオード(LED: Light emitting diode)チップから構成される照明からの目に見える可視光域(波長: 380nm～780nm)の光を用いた近距離光無線通信に色多重マルチアクセス技術を導入し、通信環境と照明環境の両方のユーザ品質の最適化の確立を目的とする。波長多重信号の分離に機械学習を用いることで、各波長(色)の強度をより柔軟に設計することが可能になることを明らかにした

研究成果の学術的意義や社会的意義

無線インターネットやスマートフォン等の普及による情報伝送需要の急増やIoTによる無線利用の拡大により、既存の無線通信に割り当てられている周波数帯以外の未利用周波数帯の研究が求められている。光波を用いた通信は、ミリ波帯やテラヘルツ波帯などに比べて、高帯域幅を確保できる特徴を持つ。LEDを光源とした可視光通信については、近距離光無線(LiFi)やカメラ通信の研究が中心になされている中で、本研究のようにQoEの確保とマルチアクセス数の拡大を行う研究は独創的であり、将来、可視光通信技術の実用化のブレークスルーとなる可能性を持つ。

研究成果の概要（英文）：In this research, we will achieve stable communication even when many IoT devices are connected simultaneously in environments such as hospitals where electromagnetic communication is restricted.

We have introduced color multiplexing multi-access technology to short-range optical wireless communication using light in the visible light range (wavelength 380nm to 780nm) from lighting using LED (light emitting diode) chips. The aim is to establish the optimization of the user quality of both the environment and the lighting environment.

It has been found that by using machine learning to separate wavelength-multiplexed signals, it is possible to design the intensity of each wavelength (color) more flexibly.

研究分野：通信工学関連

キーワード：可視光通信 MIMO 逐次干渉キャンセラ ユーザ品質

## 1. 研究開始当初の背景

スマートフォンやタブレット端末の普及により、移動通信のデータトラフィックは急激に増大している。あらゆるモノがインターネットに接続され、多様かつ大容量の情報をやり取りするモノのインターネット (IoT: Internet of Things) 時代になり、オフィスや工場などの狭い空間内で IoT 機器間の無線通信時の電波の干渉や電磁反射、電波環境の変化により、安定した無線通信が困難になることや、周波数の枯渇の問題が深刻になっている。さらに、電波干渉から電磁波通信の利用が制限されている病院内などの環境でも、環境センサなどの多数の IoT 機器の導入が求められている。そこで、医療機器等への電磁波干渉がなく、かつ狭い空間内で多数のセンサや IoT 機器との安定した通信を可能にする可視光通信が注目されている。

可視光通信は可視光域の LED 光を用いる通信で、電波環境に影響を及ぼさず、また、そのスペクトル帯域幅が 300 THz と広帯域であることから、次世代の無線として注目が高まっている。しかしながら、通信品質確保のための大きな課題として、太陽光や他の光源の光などの外乱光雑音による通信特性(物理品質)劣化の問題がある。さらに、照明機器を用いた可視光通信では、通信機能の付加による建物内の空間の明るさの変化やちらつきが生じないこと、演色性やグレア、フリッカーフリーなどの照明条件を満たすことがユーザの体感品質 (QoE: Quality of Experience) を満足させる重要な条件となる。さらに、光がヒトのサーカディアンリズムに影響を及ぼし、睡眠問題を引き起こすことが指摘されていることから、人間によい照明環境での通信品質の最適化が重要となる。

## 2. 研究の目的

本研究では、病院内等の電磁波通信が制限されているような環境での安定した IoT 通信を実現するために、複数の LED チップから構成される照明からの目に見える可視光域(波長:380 nm ~ 780 nm)の光を用いた波長多重近距離 MIMO 光無線通信を確立し、また、それと同時に人間によい照明環境での通信品質の最適化を確立することを目的とする。本研究ではメラノピック照度に着目し、一定の照度、色温度の室内照明の下でもメラノピック照度を制御することで、サーカディアンリズムに適した照明の制御方法を提案する。メラノピック照度とはサーカディアンリズムに影響する光を定量的に評価するために採用した単位で、メラトニンの分泌度合いに影響を与える指標である。

## 3. 研究の方法

本研究では、LED 照明光を光源として雑音耐性が高く、かつ、IoT 時代に対応できるマルチアクセス通信を実現することを目標とする。それと同時に、照明機器を用いた可視光通信では通信機能を付加したことにより、ユーザにとって不快となる要因が生じないことが重要な条件として求められる。そこで、ユーザ体感品質 QoE を満足させる重要な条件として、メラノピック照度の制御によるサーカディアン LED 照明の研究、および波長多重可視光通信のスペクトル管理・最適化技術の研究を行う。また、波長多重光無線通信における MIMO チャネル行列推定にニューラルネットワークを用いた逐次干渉キャンセラによる波長分離方式の研究を行う。

具体的には、以下の二つの研究を実施した。

(1). QoE を満足させる重要な条件として求められるサーカディアンリズムを考慮した LED 照明のメラノピック照度制御の研究。

(2). 波長多重可視光通信のスペクトル管理・最適化として、波長多重光無線通信における MIMO チャネル行列推定にニューラルネットワークを用いた逐次干渉キャンセラによる波長分離方式の研究。

## 4. 研究成果

### (1) メラノピック照度制御によるサーカディアンリズムを考慮した LED 照明

現代社会では多くの人々が時間毎に出力変化のない室内の照明の下で生活しているため、サーカディアンリズムが乱れ易く、様々な病気を引き起こす原因となると考えられている。本研究ではメラノピック照度に着目し、一定の照度、色温度の室内照明の下でもメラノピック照度を制御することで、サーカディアンリズムに適した照明の制御方法を提案する。メラノピック照度とはサーカディアンリズムに影響する光を定量的に評価するために採用した単位で、メラトニンの分泌度合いに影響を与える指標として提唱された。基準となる太陽光のメラノピック照度と照度の時間変位の測定結果を図 1 に示す。どちらも M 字型カーブのように一日の時間の中で変化していることがわかる。

まず、LED 照明の照度と色温度を一定の条件で、メラノピック照度が制御可能な範囲をシミュレーションによって明らかにした。ピーク波長の異なる 8 種類の LED から構成される LED 照明において、照明を構成する各 LED の光度比を変化させることで、色温度と照度(1000 lx)を一定

にしつつ、メラノピック照度を変化させた。図2に各色温度におけるメラノピック照度の最大値と最小値を示す。色温度6500 Kでは、メラノピック照度を最小値の395 lxから最大値の4055 lxまで変化させることが可能であることが分かる。また、各色温度においても同様にメラノピック照度の値を幅約3000 lxの範囲で調整することが可能であった。

この結果より、LED照明の照度と色温度を変化させることなくメラノピック照度が時間変位するLED照明の設計が可能であることが明らかになった。シミュレーション解析の結果を用いて、色温度と照度が一定でメラノピック照度が一日の時間によって変化するLED照明の時間変位を作成する。LED照明の分光分布を一日の時間によって変化させることでメラノピック照度の値も変化させる。一日の時間によって変化する分光分布の例を図3、各時間における分光分布のメラノピック照度の時間変位を図4にそれぞれ示す。図3の凡例部分に分光分布を用いる一日の時間と分光分布から算出したメラノピック照度を示す。

シミュレーション解析によって得られた色温度と照度が一定でメラノピック照度が制御可能なLED照明を試作し、メラノピック照度を変えた時に明るさと色が同じに見えるか明らかにするために主観評価実験を行った。その結果、明るさと色に違いがあることが明らかになった。この結果を受けて、作成手順の改善の提案を行った。さらに、色温度と照度が一定でメラノピック照度が異なるLED照明の照射が生物のサーカディアンリズムに与える影響を観察するために、ショウジョウバエを用いて実験を行った。その結果、人間とは異なり、青色の波長帯域の光がショウジョウバエのサーカディアンリズムを整えるために重要な働きをしている可能性があることを明らかにした。今後の課題としては、まず、ショウジョウバエにとってのメラノピック照度に相当する分光分布を明らかにし、それに基づいた実験を行うことでサーカディアンリズム形成に与える影響を明らかにする必要があることがわかった。



図1 太陽光のメラノピック照度と照度の時間変位

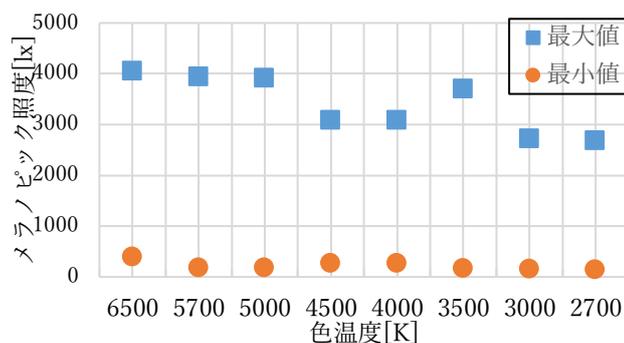


図2 各色温度のメラノピック照度の最大値・最小値

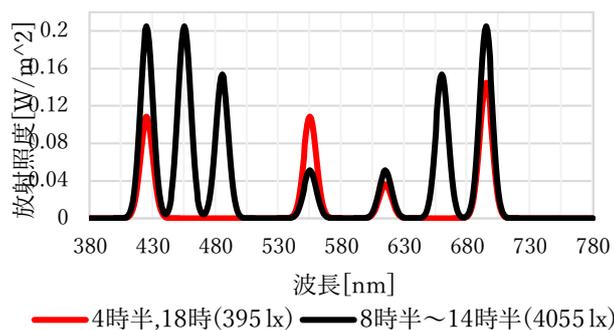


図3 一日の時間によって変化する分光分布の例

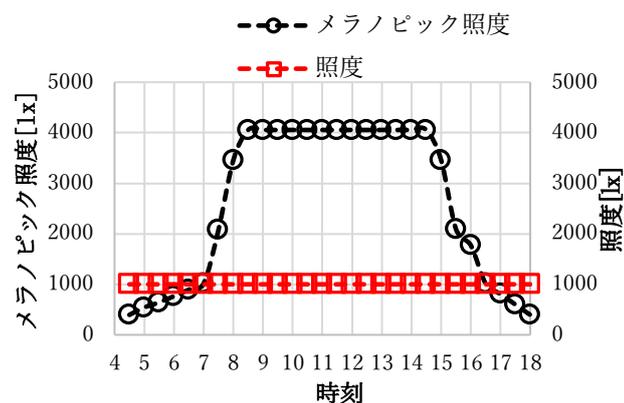


図4 メラノピック照度と照度の時間変位

(2) 波長多重光無線通信におけるニューラルネットワークを用いた逐次干渉キャンセラによる信号分離

近年、スマートフォンの普及による無線局の急速な増加や無線システムの高速度の影響により、無線周波数帯の枯渇や通信トラフィックの混雑が問題になっている。これらの解決策の1つとして電波とは異なる周波数帯を用いる光無線通信が注目されている。これまで WDM 光無線通信の受信信号分離に、MIMO 信号処理の一つである逐次干渉キャンセラを用いることを提案して

きた。特定の通信方式や変復調方式に対して専用のハードウェアを用いれば、高い処理性能と処理時間の短縮が可能である。しかし、特定の通信方式や変復調方式に合わせたハードウェアの開発はコストがかかり仕様変更に対する柔軟性がないという問題がある。そこで、WDM 光無線通信の信号の復調処理において逐次干渉キャンセラにニューラルネットワークによる機械学習を導入し、汎用的にデータ処理を行う手法を提案し評価した。

WDM 可視光通信モデルと SIC の構成を図 5, 図 6 に示す。異なる波長の LED を用いた  $m$  波長数の送信機 Tx の多重により  $m$  倍の大容量通信を可能にする。一次変調に QAM を用い、多値化による容量増加を行う。二次変調を OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) とすることで多値化を容易にし、線形歪の耐力を向上させる。受信機 Rx は  $n$  波長数の PD により受光し OFDM および QAM 復調を行う。ここで、PD へ入力する光信号を所望の波長を透過させる狭帯域フィルタを用いた場合、 $m=n$  となり通信が可能になる。しかしながら、LED のスペクトル特性が広いことからフィルタのみによる波長分離が難しい。この問題を解決するため、我々は適用可能な広帯域フィルタにより透過させ、異なる波長の光による干渉を復調後のキャンセラで改善する手段の検討を行ってきた。この通信モデルは  $n \times m$  MIMO に相当し、そのチャンネル行列を推定することにより干渉除去を可能にした。さらに、干渉除去を繰り返し演算で行う SIC の適用により通信品質を改善し、SIC の効果を高めるフィルタの帯域特性を検討および実験確認することで、市販フィルタを使用した WDM 可視光通信システムの実現性を見込みを得た。また、広帯域フィルタを用いた SIC では 1 つの Rx で複数の Tx 出力を受信・復調できるため ( $m > n$ )、Rx 数の削減の可能性がある。この構成が可能になれば受信システムの小型化・経済化に寄与できる。ただし、受信部の干渉量が非常に大きくなる課題があり、干渉除去アルゴリズムのさらなる高度化が必要である。

そこで、WDM 光無線通信システムにおいてチャンネル推定に 2 層ニューラルネットワークを用いる手法を提案し、パイロットシンボルを用いる従来手法と比較した。提案手法で使用する 2 層順伝播型ニューラルネットワーク (FFNN: Feedforward Neural Network) の構成を図 5 に示す。従来手法、提案手法両者の干渉除去手段に SIC 処理を用いる。なおシミュレーション環境に MATLAB® R2021a を使用した。その結果、両者で概ね同等の復調精度が得られることを確認した。また、送信機に用いる LED の数に対して受信機に用いるフォトダイオードの数を減らしたモデルでシミュレーションを行い、復調精度において従来手法と比べ CNR=10 dB の BER 改善が見られた。さらに、同システムにおいて SIC 方式の MIMO 処理ではなく、LSTM 層を持つ sequence to sequence 回帰ネットワークによって信号分離を行う方法を提案し、多重化された受信波を分離し信号同期が可能となること示した。加えて、入力を繰り返し LSTM のタイムステップ数を増やしことで、BER 特性の改善が図れることを明らかにした。

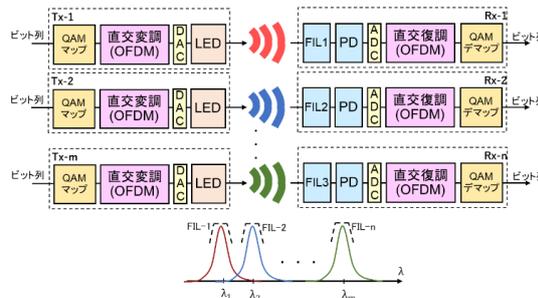


図 5 WDM 可視光通信モデル

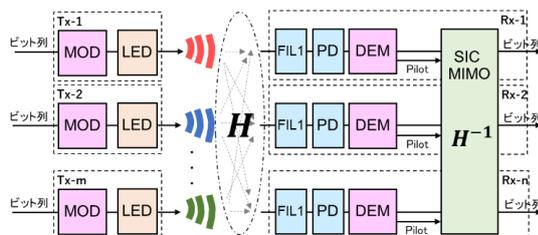


図 6 SIC の構成図

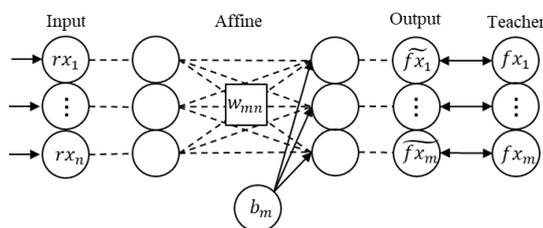


図 7 2 層 FFNN の構成

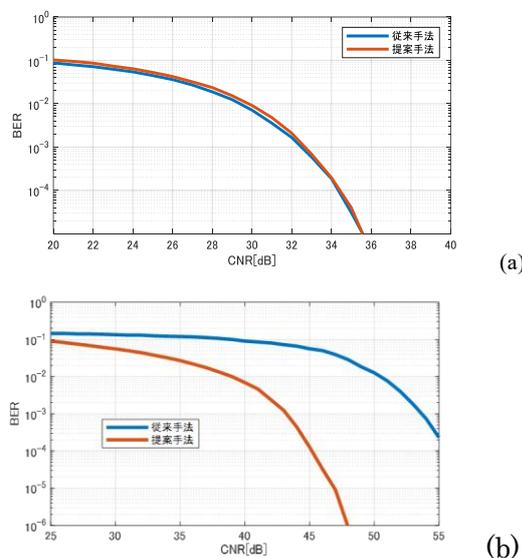


図 8 CNR-BER 特性 (a) 3×2MIMO (b) 6×4MIMO

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Umezawa Naoki, Oshiba Saeko	4. 巻 1
2. 論文標題 SIC-MIMO Systems with Neural Networks in OFDM-Based WDM VLCs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2022 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)	6. 最初と最後の頁 490-492
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/APMC55665.2022.9999949	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryunosuke Inoshita, Saeko Oshiba	4. 巻 1
2. 論文標題 3D Self-position Estimation Using Illumination and Image Sensors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 13th Asia Lighting Conference	6. 最初と最後の頁 37-44
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 大柴 小枝子	4. 巻 64
2. 論文標題 光無線通信が作る新たな世界：1. Beyond 5G時代を拓く光無線通信技術 -超高速化・省電力化，陸海空の通信カバレッジ拡張を目指して-	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 情報処理	6. 最初と最後の頁 e1～e6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20729/00224174	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kei-ichi Ideguchi, Masaru Hasegawa, Yuki Yamashita, Hideki Yoshida, Saeko Oshiba, Masamitsu Yamaguchi	4. 巻 Article ID: 20000593
2. 論文標題 Effects of LED Irradiation on the Locomotive Activity of Wild-type Fly and ASD Model Fly	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JOURNAL OF THE ILLUMINATING ENGINEERING INSTITUTE OF JAPAN	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 梅澤 直輝, 大柴 小枝子
2. 発表標題 波長多重可視光無線通信におけるニューラルネットワークの適応の検討
3. 学会等名 FIT2022 情報科学技術フォーラム講演論文集 CL(002) 2022年9月
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井下 竜之介, 大柴 小枝子
2. 発表標題 公開 照明とイメージセンサを用いたドローンの3次元自己位置推定手法の検討
3. 学会等名 FIT2022 情報科学技術フォーラム講演論文集 CL(002) 2022年9月
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akane AOKI, Saeko OSHIBA
2. 発表標題 The control of melanopic illuminance in LED lighting considering circadian rhythm
3. 学会等名 ICETC 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 青木 茜, 大柴 小枝子
2. 発表標題 メラノピック照度制御によるサーカディアンリズムを考慮した LED 照明
3. 学会等名 電子情報通信学会技術報告 CS2022(35) 98-99 2022年7月 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 猪俣 政貴, 大柴, 小枝子, 岩松 隆則
2. 発表標題 WDM-OWCにおける LSTM層を持つニューラルネットワークを用いた 信号分離性能の評価
3. 学会等名 電子情報通信学会技術報告 CS2021(83) 41-45 2022年3月
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 猪俣政貴・柴田咲葵・岩松隆則・大柴小枝子
2. 発表標題 ニューラルネットワークを用いた波長多重光無線におけるMIMO伝搬チャネル行列推定の提案
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 猪俣政貴・岩松隆則・大柴小枝子
2. 発表標題 波長多重光無線通信におけるLSTMを用いた信号分離の提案
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 猪俣政貴・大柴小枝子・岩松隆則
2. 発表標題 WDM-OWCにおけるLSTM層を持つニューラルネットワークを用いた信号分離性能の評価
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青木 茜・大柴小枝子
2. 発表標題 メラノピック照度制御によるサーカディアンリズムを考慮したLED照明の評価
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 A. Aoki, S.Oshiba
2. 発表標題 The control of melanopic illuminance in LED lighting considering circadian rhythm
3. 学会等名 Asia Lighting Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大柴小枝子
2. 発表標題 超スマート社会に向けた可視光通信技術の展望
3. 学会等名 電子情報通信学会無線通信システム研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大柴小枝子
2. 発表標題 超スマート社会に向けた光無線通信技術の展望
3. 学会等名 IEEE Sapporo Section (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柴田 咲葵、 大柴小枝子
2. 発表標題 波長多重可視光通信システムにおける ニューラルネットワークを用いたチャネル推定手法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 網代雄太・猪俣政貴・大柴小枝子
2. 発表標題 OFDM光無線通信の帯域利用効率改善の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 猪俣政貴・網代雄太・大柴小枝子
2. 発表標題 OFDM水中可視光通信の伝送特性の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大柴小枝子
2. 発表標題 可視光通信の現状と展望
3. 学会等名 京都府中小企業技術センター光ものづくりセミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------