

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03265

研究課題名（和文）工場内産業機器通信ネットワークのための高密度アレイによる光無線MIMO技術の確立

研究課題名（英文）Optical Wireless MIMO Systems with High Density Arrays for Indoors Industrial Machine Networks

研究代表者

片山 正昭（KATAYAMA, Masaaki）

名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

研究者番号：60185816

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：工場内の産業機器のための無線システムを検討した。光無線MIMOによる基幹ネットワークにおいては、電波系とは異なり、送受信アレイの素子配置が性能に大きな影響を与えること、従来の正方配置より線形配置の方が性能が良いこと等を示した。従来、1m以下の短距離での実験しか行われてなかった光無線MIMOについて、60mの距離で100Mbpsを実験で実現するなど遠距離高速通信の適用可能性を示した。光無線CDMAによるセンサネットワークでは、基地局受信機に閾値自動可変ハードリミタと逐次干渉除去を行う受信機を提案し、特性改善効果を、理論と実験の両面から明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

概念検討に近い実験しか行われていないイメージングMIMOを初め、従来1m以内の短距離で大型のアレイを用いた机上実験的な検討しか行われていなかった光無線MIMOについて、実際の距離と速度での通信が実現できることを示したことは、新しい研究分野を開拓したものである。またその中で、アレイの素子配置がシステム設計上での重要な要素であることを示した点は、学術的にも工業的にも価値がある。光CDMAシステムについて、信号処理による特性改善を示した点も、実用へ一歩近づけた事を含め意義あるものである。

研究成果の概要（英文）：This study considers the wireless communications for industrial machines in factories. In the study of high-speed and long-distance in-factory communications with optical MIMO, the importance of the array constellations is revealed, and superiority of one-dimensional arrangements of array elements over the traditional rectangular constellations are clarified. The results of communication experiments show that the proposed system achieves 100Mbps for 60m distance, which is far above the results of previous works. For sensor network systems with optical CDMA, the introduction of hard-limiters and successive interference cancellation is proposed, and performance improvement is shown by numerical analysis and experiments.

研究分野：無線通信工学

キーワード：光無線通信 光無線MIMO 長距離高速室内光無線 イメージングMIMO CDMA 多元接続 スマートファクトリ 第四次産業革命

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 産業機器無線通信への要求

工場のスマート化を実現し製造業における「第四次産業革命」をもたらすためには、情報通信が不可欠である。特に、線路敷設が不要でライン組み替えにも迅速に対応でき、移動機器や回転機器などの制御も容易な無線通信に、研究開始当初において注目が集まっていた。本研究では、このような産業機器のための無線通信を以下の二つに分け、その両者について研究を行った。

- ①基幹ネットワーク：比較的少数の定点間を高速で接続する工場内の基幹網である。機器の配置変更等に伴う配線更新が不要な無線化の要求が高い。大型建屋を想定すると数十 m 単位の距離の高速伝送が必要である。
- ②センサネットワーク：個々の産業機器の温度・振動等の運転情報や局所的な温湿度のような環境情報を収集する多数のセンサと、情報を集約する中央装置からなるネットワークである。移動機器や回転機器の場合は無線化が必須である。また固定のセンサであっても、その数が多いことから無線化が強く望まれる。

(2) 光無線技術の優位性

工場内は、金属製の大型装置や大型製品が行き来する環境であるため、複雑な反射や遮蔽により安定した電波伝搬を得ることが困難である。また産業機器が発生する高レベル電磁雑音もしばしば通信の制約となる。さらに免許不要な無線 LAN 等の周波数帯は既存の装置がすでに使用しているなど、屋内環境でありながら周波数制約は厳しく、今後の通信速度と無線利用機器の需要の増加を十分にまかなうことは困難である。これに対し、光無線は、免許が不要であり、用途に応じた柔軟な設計ができる。また電波を用いるシステムと比べ、電磁雑音に強い、マルチパスが発生しにくい等、工場内の無線通信に適した特性を持っている。さらに屋外からの盗聴や妨害に対しても、電波システムよりも優れた特性を有している。

(3) 光無線技術を用いた基幹ネットワークの課題

工場内での光無線の実用化のためには、高速なレーザではなく、目に安全な LED を用い、一般的な素子で実現容易な帯域幅の回路と、比較的簡単な光学系によるシステム実現が望まれる。研究開始当初において LED を用いた先行研究は、距離数メートルのものが大半であった。これらの方式を、10m を超えるような距離で使用すると、LED の光量の不足等から伝送速度が大幅に低下してしまうという問題があった。

周波数制限のある無線 LAN や携帯電話では、送受信端に複数のアンテナを用いることで、伝搬経路の容量拡大を狙う MIMO(Multi-Input Multi-Output)が広く使われている。ところが光無線に MIMO を適用する場合、送受信アレイを構成する素子間隔が変調信号の波長と比べて小さく、しかも信号反射の影響も少ないため、送受信アレイの各々の送受光素子間の伝搬路の特性は、いずれもほぼ同じ値となり、伝搬路行列 H の階数（とそれが表す通信路容量）が十分に確保できなくなる。そこで従来の研究では、通信距離に対するアレイ素子間隔を大きくし、さらにレンズにより PD の視野角を狭め送信 LED を光学的に分離し、実質並列伝送とみなせるようにする手法が一般的であった。しかしこの考え方は、長距離伝送には適応出来ない。屋内長距離高速光無線実現のためには、通信距離より遙かに小さい素子間距離を持つ高密度アレイによる光 MIMO 無線通信技術の確立が不可避の重要課題であった。

(4) 光無線技術を用いたセンサネットワークの課題

センサネットワークでは、多数のセンサが信号を中層装置の受信機（基地局）に送出する。これらの信号の分離・復調を行うための多元接続技術が必要である。一方向通信で、簡易な多数のセンサの実現を考えると、符号分割多元接続方式(CDMA)が適している。しかし研究開始時点では、CDMA を用いた光無線システムについては、理論検討が主であり、実験的な動作検証が乏しく、また理論検討においても、受信機で高度な信号処理を行う事による性能改善の検討は不十分であった。

2. 研究の目的

以上の背景を受けて、本研究は、工場等における産業機器のための通信ネットワークを光無線技術によって実現する上で不可欠な基幹技術を確立することを目的とする。そのために、素子間隔が伝送距離に比して十分小さい高密度アレイによる「長距離高速屋内光無線 MIMO システム」について設計・実現する手法を提案し、長距離高速通信を実証する。さらに、機器多元接続のための光無線技術を開発し、実験によりその性能を明らかにする。また、一方向で非同期的に送出される信号を集約受信する「光無線 CDMA センサネットワークシステム」において、その性能を実験で実証し、さらにその特性改善手法を提案するとともに効果を検証する。

3. 研究の方法

(1) 概要

工場内の産業機器の無線通信の適用用途として、各機器からの比較的少量のセンシングデータ等を集めるセンサネットワークと、収集された情報等を一括して伝送するための基幹ネットワークを想定し、両者を図1に示すように、光無線技術で実現しようとするものである。このうち、多元接続通信網では符号分割多元接続(CDMA)方式を、基幹通信網では MIMO(Multi-Input Multi-Output)方式を利用することにする。

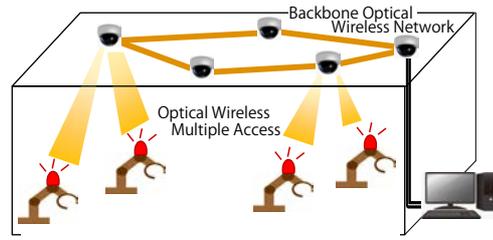


図1 システム全体像

(2) 光無線 MIMO 技術による長距離高速伝送の実現

基幹ネットワークを実現するために、光無線 MIMO 技術を適用する。既存研究の多くは、通信距離 1 m 程度の短距離での検討をおこなっている。この場合、光送信器アレイにおける各エレメントからの光信号を、光受信器アレイによって光学的に分離することは比較的容易である。しかしながら本研究のように、数十 m 単位の長距離伝送を想定すると、受信側における光信号の光学的分離が困難となる。そこで、光学系としては

- ① 素子毎に設置したレンズで指向性特性を調整した光送受信素子を持つアレイ
- ② 長焦点レンズと高密度受光素子アレイを用いたイメージング MIMO 受信機

のそれぞれを製作し(図2, 3)、実験に用いた。



図2 指向性素子線形アレイ

(3) 光無線 CDMA システムの特性改善の実証

センサネットワークを光無線 CDMA 方式で実現する場合、特に基地局受信機での信号処理による特性改善について理論だけでなく実験的にも検証を行った。そのために、実際に光無線 CDMA 信号を発生する送信機と、複数端末の信号を同時受信し分離復調できる受信機(図4)を製作した。



図3 Imaging MIMO 受信機

4. 研究成果

(1) 光無線 MIMO におけるアレイ配置

MIMO システムにおいては、送受信アレイ各素子間の伝搬路行列の性質が、システムの性能を支配する。光無線 MIMO では、アレイの各素子は互いに見通し距離にあり、直接光で通信を行っている。このため伝搬路行列は各素子の位置関係に強く支配される。しかしながら、短距離通信の MIMO では対向素子以外の素子間の伝搬がほとんど無視でき、素子配置によらず伝搬行列は対角行列となる。このため、光無線 MIMO におけるアレイの素子配置は、従来意識されていなかった。一方、長距離通信を考えると、対向素子以外からの信号光の強弱が特性に大きな影響を与える。そのため、アレイの素子配置が設計の重要なパラメータである。このように光無線 MIMO システムにおけるアレイ素子配置が性能に大きな影響を与える影響に着目した点は、本研究の学術的新規性の一つである。

検討の結果、アレイの素子配置は、従来使用されている正方形配置よりも、図2のような線形配置が優れていることを見いだした。しかもこの配置の方が、設置が容易であり実用上の価値も高い。

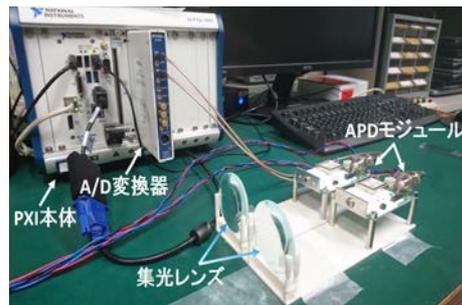


図4 光 CDMA 実験受信機

(2) 光無線 MIMO における通信実験

図5のような構成で、通信実験を行った。通信実験では、初期は他の従来研究と同様に正方形配置のアレイを用い、研究の進展と共に、上に述べたように線形素子配置の優位性に着目し水平配置での実験を行った。

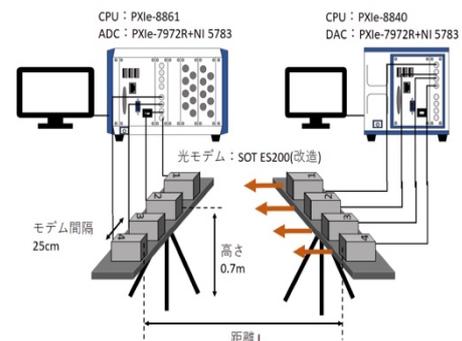


図5 光無線 MIMO 通信実験構成

さらに図5の受信機を、16素子のAPDアレイ基板を受光部に設置した構成のイメージング MIMO 受信機 (図3) に置き換えての実験も実施した。

これらの実験の結果を図6に赤色の■で、また参考のために、本研究開始時点での他の研究成果を青色の●で示す。これを見ると、研究開始当初の実験で、従来研究を上回る距離の通信に成功しており、その後の装置の改良等で速度の向上が実現できている (文献⑧⑩)。さらにアレイ素子の水平配置の導入 (文献②)、イメージング MIMO の導入 (文献①) で工場内での実用化に十分な距離と速度を得ることができた。その後も研究は継続しており、本年7月には、60m 100Mbpsの結果発表を行う予定である。また変調方式や送信機構成の変更を実施し、さらなる特性向上を示す予定である。これは長距離光 MIMO システムとしては、本研究者の知る限りにおいて、世界最高の結果である。

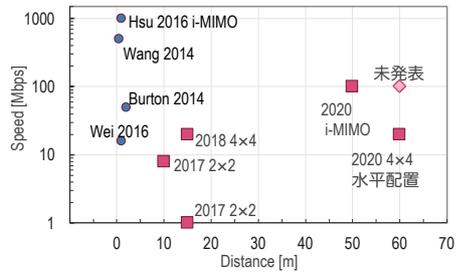


図6 光 MIMO 通信実験結果

(3) 光無線 CDMA システムの特性改善技術開発

一般に CDMA では、各送信機と受信機の距離の違いに起因する遠近問題により、通信品質特性が劣化する。本研究では、受信機に所望信号強度に応じた閾値を持つハードリミタ (Hard Limiter) を用いることで所望信号より強い干渉信号の影響を軽減する手法に逐次干渉除去 (successive interference cancellation) を組合せた手法を提案した。図7に受信機構成を示す。

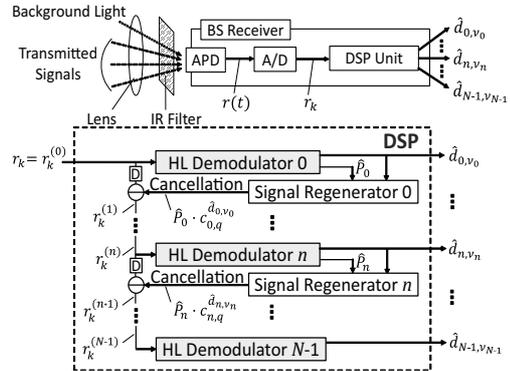


図7 提案光 CDMA 受信機構

図8に、計算機シミュレーションによる通信性能を示す。この図からも、本研究で光無線 CDMA への適用を提案した二つの手法、ハードリミタ (HL) と逐次干渉除去 (SIC) が共に特性改善効果を持つことがわかる。また前者が、比較的強い信号に有効であるのに対し後者が弱い信号に有効であること、これらを組み合わせることで、相乗効果が期待出来ることがわかる。

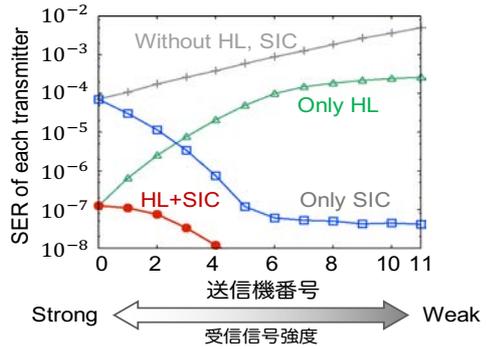


図8 光無線 CDMA 通信性能

本研究で提案した方式では、ハードリミタの閾値を信号強度に応じて決定する必要がある。そこでこの動作が実現できることを検証するために、図9に示すような3台の送信機を有する実験系を構築し通信実験を行った。ここでは、干渉を与える端末を 90cm と 110cm に固定した上で、着目する送信機 (Tx1) の位置を変化させて、それぞれの状況での閾値自動決定回路による閾値を観察した。その結果、

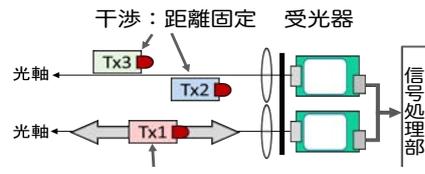


図9 光無線 CDMA 実験系

図10に示すように、いずれの場合も、閾値自動設定回路は正しく動作することを確認した。さらに同じ実験系で、通信誤り率測定を行い、図11に示すように、提案方式による特性改善効果を確認した。

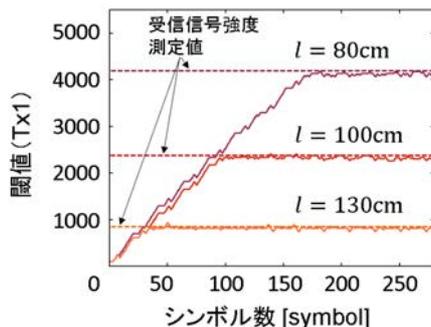


図10 閾値自動設定実験結果

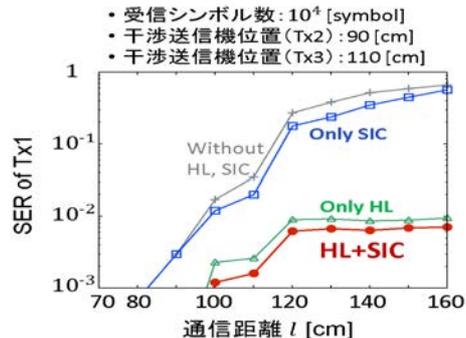


図11 光無線 CDMA 通信実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 F. Corona, H. Sugiura, K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama
2. 発表標題 Experimental Evaluation of an Optical Wireless MIMO System with Baseband Modulation
3. 学会等名 IEICE Technical Report, RCS2018-115, pp. 165-169
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤宗人, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭
2. 発表標題 光無線符号分割多元接続システムにおけるハードリミタと逐次干渉除去による通信特性改善
3. 学会等名 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ大会, A-9-11, p.73
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤宗人, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭
2. 発表標題 閾値可変ハードリミタと逐次干渉除去の組合せ手法による光無線CDMAシステムの通信特性改善
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, WBS2018-28, pp. 7-12
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉浦宏俊, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭
2. 発表標題 屋内光無線MIMO通信システムにおける伝搬路行列の性質と通信性能の関係に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, WBS2018-35, pp.47-52
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Sugiura, K. Kobayashi, H.Okada, M. Katayama
2. 発表標題 A feasibility study of optical wireless MIMO systems with high-density arrays
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability(ICMaSS) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 杉浦宏俊, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭
2. 発表標題 屋内光無線MIMO通信システムの素子間隔が通信品質へ与える影響に関する実験的検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, WBS2017-32, pp.51-55
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊藤宗人, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭
2. 発表標題 光無線符号分割多元接続システムの受信機におけるハードリミタによる特性改善効果の実験的検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会, A-9-6, p.93
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Ito, K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama
2. 発表標題 Optical Wireless CDMA Receiver with Hard Limiters and Successive Interference Cancellers
3. 学会等名 IEEE International Conference on Communications (ICC) Workshop on Optical Wireless Communications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Ito, K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama
2. 発表標題 A Receiver Design for Indoor Data Collection Systems Using Optical Wireless CDMA
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability(ICMaSS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩佐章史, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭
2. 発表標題 屋内長距離高速イメージングMIMOシステムの実験的性能評価
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, WBS2019-67, pp.189-194
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村哲也, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭
2. 発表標題 線形アレイを用いた光無線MIMOシステムの通信距離特性に関する実験的評価
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会, A-9-22, p.101
4. 発表年 2020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
研究協力者	原 晋介 (Hara Shinsuke)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	林 和則 (Hayashi Kazunori)		
研究協力者	浅井 裕介 (Asai Yusuke)		
研究協力者	山里 敬也 (Yamazato Takaya)		
研究協力者	岡田 啓 (Okada Hiraku)		
研究協力者	小林 健太郎 (Kobayashi Kentaro)		
研究協力者	伊藤 宗人 (Ito Shuto)		
研究協力者	杉浦 宏俊 (Sugiura Hirotoshi)		
研究協力者	コロナ ファビアン (Corona Fabien)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	中村 哲也 (Nakamura Testuya)		
研究協力者	岩佐 章史 (Iwasa Akifumi)		