

学位論文 博士 (情報学)

サイバーフィジカルシステム実現に向けた
無線LANシステムの高度化に関する研究

2022年8月

京都大学 大学院情報学研究科
通信情報システム専攻

鍋谷 寿久

要約

近年、AI(Artificial Intelligence) 技術の普及に伴い、コンピュータで構成されるサイバー空間とフィジカル空間と呼ばれる実世界を高度に融合させたサイバーフィジカルシステム (CPS: Cyber Physical Systems) に関心が高まっている。CPS によって新たな価値やソリューションが創造でき、様々な社会課題を解決することで Society 5.0 の実現が期待される。CPS 実現のためには、サイバー空間とフィジカル空間を繋ぐ通信が必要不可欠となるが、有線通信に比べ多くのメリットが見込める無線通信適用への期待が高い。中でも無線 LAN(Local Area Network) は、高速・大容量通信が免許不要な自営網ネットワークとして低コストかつ簡易に導入可能な無線システムであることから特に期待を集めている。しかしながら、主に有線 Ethernet ケーブルの無線化としてベストエフォート用途で利用されてきた従来の家庭やオフィス等での用途に比べ、工場やプラント等における CPS 化といった産業用途のために無線 LAN を利用することを想定した場合、無線 LAN には解決すべき幾つかの課題があり、無線 LAN を適用した本格的な CPS 実現に向けては無線 LAN システムの更なる高度化を図ることが重要となる。こうした背景から、本論文は、CPS 実現に向けた無線 LAN システムの高度化に関する研究をまとめたものである。

本論文は、以下に示す 7 章より構成されている。第 1 章は序論であり、本研究の背景となる CPS に関して述べ、また CPS に無線 LAN を適用する意義や無線 LAN を適用した場合の課題を述べた上で本研究の目的を明らかにする。

第 2 章では、これまでの IEEE 802.11 無線 LAN の進化について整理し、また CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) によるアクセス制御や ARQ(Automatic Repeat reQuest) による再送制御といった基本 MAC(Medium Access Control) プロトコルや利用可能な周波数帯などといった無線 LAN の特徴を概説する。加えて、この無線 LAN の特徴を踏まえた上で、CPS 実現に向けて無線 LAN を適用した場合の課題として、多数端末収容に伴うスループット低下の改善、通信の高信頼化、更なるシステム容量の増大および低遅延化の 3 つを挙げ、その重要性を示し、本論文が対象とする課題の意義を明確化する。

第 3 章では、多数端末収容に伴うスループット低下の改善に向けて、DL-MU-MIMO(Down-Link Multi-User Multiple-Input Multiple-Output) 伝送向けサウンディング方式を提案する。提案方式は、端末台数が増加した場合でも高効率に無線伝搬路情報の取得が可能なことを特徴とした方式であり、IEEE 802.11ax において規格必須 (マנדトリー) 技術として採用されている。IEEE 802.11ac で規定されていた従来のサウンディン

グ方式と比較し、提案方式が多数端末収容に伴うスループット低下の改善という課題に対して有効な方式であることを明らかにする。

第4章では、無線LAN通信の高信頼化に向けて、各端末が複数のAP(Access Point)と同時に通信を行う新たなマルチAPダイバーシチ手法を提案し、計算機シミュレーションによる性能評価により、提案方式の有効性を示す。また、提案方式の動作実現性を確認するために試作機を開発し、試作機を通じて提案方式の実現性を実証するとともに、実際の工場環境下にて無線性能評価実験を行い、提案方式の有効性を実験的に明らかにする。

第5章では、無線LAN通信の高信頼化に向けて、実運用の観点から検討を行う。実運用を見据えると、信頼性高く無線システムを設計するためには実際にターゲット環境での無線伝搬特性の把握も非常に重要になる。そこで、CPS導入の期待が高い現場の1つとして挙げられる発電プラントをモチーフに、実運用されている火力発電プラントタービン建屋内での無線伝搬特性の評価を実施し、火力発電プラント環境における無線伝搬特性を明らかにする。加えて、確率統計手法を利用して火力発電プラントにおける無線伝搬特性のモデル化を検討する。また、検討結果を踏まえて、空間ダイバーシチ手法の通信信頼性向上に対する有効性を実験的に明らかにする。

第6章では、更なるシステム容量の増大および低遅延化に向けて、それらを期待できる技術としてFull Duplex技術に着目し、無線LANへのFull Duplex技術適用に向けた検討を行う。Full Duplex適用によるシステム容量増大効果や低遅延効果は、想定するシステムや条件によって大きく依存するが、無線LAN標準化で議論されている方向性の流れを組んだ定量評価はまだ少ない。そこでまず、IEEE 802.11無線LAN標準化におけるFull Duplex適用検討の動向ならびに適用に向けた方向性を明らかにする。その上で、Full Duplex適用によって期待できる効果のうち低遅延化効果の観点に着目し、無線LAN規格として方向性が見えてきたFull Duplexシステムを前提としたFull Duplex適用による低遅延効果を明らかにすべく定量的な遅延時間性能評価を行い、無線LAN Full Duplexの有効性を示すとともに、実用化に向けて更なる検討課題を明らかにする。

第7章は本論文の結論であり、本研究で得られた結果の総括を行う。