

令和 6 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 07301

研究開発課題名 屋内環境における情報・電力伝送統合自営 B5G/6G の研究開発

(1) 研究開発の目的

本研究開発では、情報のみでなく電力伝送をも無線化し、時間・周波数・空間・電力などの多次元的な無線資源のダイナミックな割り当てにより周波数の有効利用を実現する技術確立する。特に、通信状況の過酷な屋内環境における周波数有効利用および情報・電力伝送での周波数共有を目指し、機器や端末の物理的制御と多次元無線資源割当を統合的に行うことで、屋内自営 B5G/6G をターゲットにした情報・電力同時伝送を可能にする技術シーズを創出する。次世代スマートファクトリのデモを設計・構築し、実環境を用いた実証実験によりその将来性を明らかにする。

(2) 研究開発期間

令和 4 年度から令和 6 年度 (3 年間)

(3) 受託者

国立大学法人電気通信大学<代表研究者>
株式会社山本金属製作所
国立大学法人東京大学
国立大学法人広島大学

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 4 年度から令和 6 年度までの総額 298 百万円 (令和 6 年度 100 百万円)
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究開発項目 1 情報・電力共用ハイブリッド無線技術

- 研究開発項目 1-a) 屋内無線環境データベース化技術の検討 (電通大)
- 研究開発項目 1-b) 情報・電力同時伝送における多次元資源割当の検討 (電通大)
- 研究開発項目 1-c) 電波の仮想保護エリア確保手法の検討 (東大)
- 研究開発項目 1-d) 時空間同期を用いた無線環境把握技術の検討 (広島大)

研究開発項目 2 B5G/6G のための情報・電力共用ハイブリッド無線技術の実証

- 研究開発項目 2-a) 次世代スマートファクトリの設計と開発技術の実証
(山本金属製作所)
- 研究開発項目 2-b) 実環境における情報・電力共用ハイブリッド無線技術の検証
(電通大・東大・広島大)

(6) 特許出願、外部発表等

		累計（件）	当該年度（件）
特許出願	国内出願	2	0
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	0	0
	その他研究発表	35	24
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	1	0
	展示会	3	2
	受賞・表彰	3	1

(7) 具体的な実施内容と最終成果

研究開発項目 1 情報・電力共用ハイブリッド無線技術

研究開発項目 1-a) 屋内無線環境データベース化技術の検討（電通大）：研究開発項目 2-b と連携して無線環境データベースを実装したうえで、実環境でのデータを登録し、無線環境把握精度の検証を実施した。加えて、センサ端末の位置精度を推定する手法として、部分的に位置がわかっている送信機や天井に備えたビーコン信号を活用して無線端末がどこに配置されているかを推定し、実際の位置との誤差特性の導出を行った。これら双方を融合し、測定位置の推定とデータベース化した際の受信電力を記録した電波マップの精度検証を行った。

工場環境におけるローカル 5G 基地局及び無線 LAN アクセスポイント(AP)の信号電力の観測を実施し、観測値から屋内電波マップを作成し、無線機位置情報既知としての情報・電力伝送向け受信信号電力誤差の性能：1[m]×1[m]メッシュでの推定誤差精度に関して、平均値 3[dB]以内、最悪値 6[dB]以内であることを確認し、共に目標値である推定誤差精度 7[dB]以内を達成した。また、屋内ビーコン信号を活用した位置推定誤差精度は平均値 2.5[m]以下、最悪値 5[m]以下でありともに目標値として定めた 5[m]以内を達成した。加えて、上記の位置情報推定手法を使った場合の情報・電力伝送向け受信信号電力誤差の性能：平均値 6[dB]以下、最悪値 14[dB]以内となり、目標値である推定誤差精度 10[dB]は平均値での評価として達成した。さらに、無線電力伝送システムの周辺環境での受信電力予測誤差性能（センサ周波数と実伝送周波数の差がある場合）については、1[m]×1[m]メッシュでの推定誤差に関して、無線 LAN 信号を対象として平均値 4[dB]、最悪値 7[dB]以内となり、ともに目標値である推定誤差精度 10[dB]以内を達成した。

研究開発項目 1-b) 情報・電力同時伝送における多次元資源割当の検討（電通大）：屋内工場環境を模擬した環境において、効率的な情報・電力同時伝送を目的とした多次元無線資源割当の検討を実施した。通信成功率の改善を目的とした無線資源割当について、屋内工場環境を移動する自動搬送ロボットを想定し、通信品質の先見性に基づいた時間資源割当を提案した。計算機シミュレーションにより、無線資源割当と経路設計を統一的行った場合に比較手法と比べて通信成功率を 40%以上改善できることを示した。また、ラーニングファクトリにおいて移動経路割当の検討を実施し、実機評価により、ロボットにおける平均受信電力を 3%程度改善することを示した。

無線情報・電力同時伝送に関する基礎検討について、計算機シミュレーションの結果、所望の通信レートを維持しながら通信によって消費した電力量を無線電力伝送により給電することが可能なユーザ端末数を 20%以上向上できることを確認した。

研究開発項目 1-c) 電波の仮想保護エリア確保手法の検討（東大）：ヌル領域を有するビームフォーミング方式の高度化ならびに送電アンテナ分散配置方式の研究開発を行った。ビームフォーミング方式に対しては 2022 年度に開発したヌル領域を有するビームフォーミング方式の実験評価および詳細な計算機シミュレーション評価を継続して実施した。送電アンテナ分散配置方式に対しては、ヌル領域を有するビームフォーミング方式の特性を踏まえて送電アンテナアレイの位置および構成を設計することにより、ビームフォーミング方式との併用により平均 6dB 以上の電波強度低減効果が得られることを確認した。また、SLNR (Signal-to-Leakage-and-Noise Ratio) を用いた無線通信機への干渉抑圧方式で必要となるチャネル行列の推定に

対し、スペクトラム拡散を用いたパイロット信号の評価を実施した。ラーニングファクトリにおける実測評価を通じて、ヌル領域を有するビームフォーミング方式の電波強度低減効果を実環境下でも確認した。

研究開発項目 1-d) 時空間同期を用いた無線環境把握技術の検討(広島大): 多地点・複数周波数同時センシングのために当初目標としていた台数(3 台)を超えるスペクトラムモニタ 5 台を用いた同時センシングシステムの詳細設計・実装を実施した。LF にてスペクトラムモニタ 5 台を用いた同時センシングを実施し、研究開発目標である同時 3 点以上の同時センシング、ミリ秒オーダー以下の時刻同期精度(1σ 値)を達成した。さらに、センシング 3 点以上に囲まれた位置で 10 dB 以下の受信信号電力推定誤差であることを確認した。また、高精度実空間情報の取得手法の検討として、LiDAR や Depth Camera を用いた実空間情報取得性能の評価を実施した。

研究開発項目2 B5G/6G のための情報・電力共用ハイブリッド無線技術の実証

研究開発項目 2-a) 次世代スマートファクトリの設計と開発技術の実証(山本金属):

高速度カメラの画像を収集・送受信するためのクライアント・サーバソフトウェアを作成し、有線 LAN・Wi-Fi・ローカル 5G を用いて、送受信性能を確認した結果、多数接続環境では、ローカル 5G によって、各デバイスの通信速度が安定的に提供される事を示した。

有線接続、Wi-Fi、そして L5G を用いてクライアントからサーバへのデータ送信を行って送受信が完了するまでに要した時間を計測し、高速度カメラにて撮影した画像の送信枚数、同時に送信する PC の数を変えて実験をしたところ、無線かつ多数接続環境においては、Local5G が最も安定した平均所要時間であった。PsPing コマンドを用いて、クライアントとサーバ間の応答速度を計測したところ、Local5G 環境では応答時間が機械の制御を行うために十分早い応答(13ms)で、かつ Wi-Fi 環境よりも安定した性能を示した。

実験環境の構築として、ロボットによる摩擦攪拌接合ならびに高速度カメラによる撮影を行うための環境を整備するとともに、摩擦攪拌接合用工具ホルダを用いて、接合中の工具温度ならびに、工具ホルダに印加される曲げ力・推力・トルクを測定可能なシステムを構築した。

また、上記の環境を活用し、ロボット摩擦攪拌接合時に高速度カメラで得た画像データに対して、特徴領域をトラッキングする事で、接合時の工具振動振幅を評価し、可聴域よりも低周波領域における異常振動の検知が可能である事を示した。

研究開発項目 2-b) 実環境における情報・電力共用ハイブリッド無線技術の検証:(電通大・東大・広島大): 研究開発項目 1 を通して開発した屋内無線環境把握技術および実空間推定を元にした無線環境把握技術の性能を評価するため、課題 1-a と連携して、屋内無線環境データベースの構築を行い、ファクトリ内に設置した無線機器からログを収集し、実際の加工工場内の電波環境の把握を実施した。さらに、屋内無線環境データベースに改良を加え、無線電力伝送送信機に指向性アンテナを設置した場合の受信信号電力を推定する機能を実装した。課題 1-b で検討を行っている時間軸を使った無線電力伝送と無線情報伝送で本研究開発の目標である周波数資源の 20%の削減を達成した。

2025 年 3 月に無線電力伝送の実験試験局を使って、指向性アンテナによる干渉抑制と、指向性利得情報とデータベースから情報伝送受信機位置での干渉量の予測を山本金属のラーニングファクトリで実証した。結果として、無線電力伝送受信点での受信性能を 8.3dB 改善、情報伝送受信点での受信性能を 8.4dB 改善できることを確認し、無線電力伝送の受信電力をそろえて比較した場合、情報伝送受信点での干渉を 16.7dB 改善できることを確認した。

(8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

(1) 計画

2025 年 8 月完成予定のクリエーションラボでは、顧客の要求を満たす製造ラインを立上げ、生産能力を検証し、顧客の生産拠点に移管した後、遠隔データ分析サービスを継続的に実施する。各製造ラインには、センシングデバイス、異常検知・不具合回避システムが実装され、全製品の加工現象データを収集し、検査結果との対応を学習する事で、生産能力の継続的な向上を支援する。本事業の成果は、上記ビジネスの基盤技術として活用されるとともに、2030 年を目標に、主に ASEAN を対象とした海外での製造業支援に注力して行く。

(2) 展望 (5 年後程度を想定して記載してください。)

本研究課題の成果としてえられる通信と給電技術に関する特許等知的財産権については、山本金属製作所のセンシングデバイスに機能を実装し、加工ソリューションサービスでの使用にあたり、販売・レンタル・サブスクリプションでの提供を検討している。センシングデバイスに関する知的財産権については、ライセンスングによって協業企業にデバイスコア部分を提供し、組立て・販売を許可する。一方、給電・通信方法についてはブラックボックス化し、ファームウェア・ソフトウェアの販売・レンタル・サブスクリプションにより、継続なビジネス展開を図る予定である。

また、本研究課題を対外発表した際には、関連研究者との情報交換なども行っており、国内外の研究者を含め共同研究や意見交換会などを実施していく予定である。例としては、2024 年 11 月にドイツ・アーヘンで開催された SmartCom 2024 において研究代表者である安達准教授（電通大）が招待講演を行ない、その際には、Prof. Niels König (Fraunhofer IPT) とともに意見交換する機会ならびに Prof. Niels が率いる研究グループのデモなどを視察した。今後、国際共同研究も視野に入れて情報交換を行っていくことになっている。

本研究開発課題を通じた人材育成も重要な成果の一つである。例として、修士課程 1 年次から本研究開発課題に研究者として参画している林政東（東京大学大学院工学系研究科）は、「ビームフォーミングに関する研究開発」（課題 1-c）で得られた学術的・技術的知見と探究心から進学を決意し、現在は同大学の博士後期課程に在籍している。国際会議への積極的な論文投稿や学会発表を通じて本研究開発課題の成果を広く発信しており、研究コミュニティからも高い評価を得ている。2024 年 11 月に開催された電子情報通信学会超知性ネットワーキングに関する分野横断型研究会（RISING 研究会）では、研究内容が評価され優秀ポスター発表賞を受賞している。また、本研究課題に関連した学生の多くが博士前期課程終了後に関連する研究開発企業に就職している。本研究開発課題を通じて、彼のような有望な若手研究者・若手技術者を数多く育成しており、そうした人材の活躍が国内外への研究成果の普及と分野の活性化を一層促進することが期待される。