

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を確立する。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 5 年度までの総額 198 百万円 (令和 5 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	2
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	0	0
	その他研究発表	11	10
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	1	1
	展示会	1	1
	受賞・表彰	1	1

(7) 具体的な実施内容と成果

**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。位置検出には位置既知のビーコンや位置未知の端末を使い、直接波に相当する信号を抽出して相互に位置を特定しながら精度を高めることで位置誤差精度を約 2m 程度まで高めることに成功した。次に、位置推定結果を基にして無線環境データベースを構築した際に、位置既知と比べてデータベースの精度がどのくらい劣化するのかを確認し、位置精度と無線環境データベースの精度の関係を明らかにした。最終的に、ローカル 5G および無線 LAN の受信信号電力、スループット測定を実施し、位置情報に紐づいた誤差 7dB 以内の無線環境把握が可能となることを確認した。

**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%程度改善できることを示した。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) :** 又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 年度に開発したビームフォーミング方式の電波暗室内における実験評価ならびに詳細な計算機シミュレーション評価を実施するとともに、SLNR (Signal-to-Leakage-and-Noise Ratio) を用いた無線通信機への干渉抑圧方式を開発した。送電アンテナ分散配置方式に対しては、又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の調整することにより、目標値である 3dB 以上の電波強度低減効果が得られることを確認した。

**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 4 台を用いた同時センシングシステムの詳細設計・実装ならびにそのシステムを用いた実測評価を実施した。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行った。

## **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):**

摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding, FSW) で発生するアコースティックエミッション (AE) について、サンプリングレート最大 10 [MHz] で信号をリアルタイムに収集しつつ、正常・異常の判定が可能である事を示した。正常・異常判断の判定については、時間領域・周波数領域での閾値判定、基準データに対する距離、機械学習モデルによる推論を対象として検討した。その結果、高速 Fourier 変換 → バンドパスフィルタ → 実効値 (RMS) 演算を行い、異常時にのみ発生する周波数帯の RMS で閾値判定を行うのが、計算速度と検知能力のバランスから、最も有効であった。ここでの異常とは、低温での FSW 工具と非接合材料の摩擦や、過剰に発生したバリと FSW 工具の摩擦であり、接合部の温度や、FSW 工具が材料から受ける力では、検知の困難な現象である。L5G 環境では、約 30 [ms] の遅延で基地局にデータを送信する事が可能である一方、工作機械の応答時間は約 150 [ms] である事から、異常検知から不具合回避の動作に対して、L5G 通信環境は十分な通信能力を有している事が示された。高速度カメラ画像については、マシンビジョン用のシステムでも 1,000 [fps] 以上の速度で収集が可能であり、AE と高速度カメラの同時収集でも、上記の収集速度を達成した。

実験環境の構築として昨年度に引き続き、次世代スマートファクトリの構築を進めた。本年度では加工以外の付帯作業に着目し、これまでよりもさらに省人化された生産ラインの構築を試みた。具体的な作業として、①工具測定作業、②計測作業、③広範囲ワーク搬送作業に着目した。①においては ZOLLER 社 venturion 450 を導入し工具の自動測定が可能となった。現在は生産システムと通信し、測定データを工作機械やロボットなどと共有する取り組みを実施している。②においては 3次元測定器にロボットを組み込むことでワークの計測作業を自動化することができた。ロボットと通信することで計測機器の情報と合わせて取り込むことでロボットシステムから計測値や設備の稼働状況等の情報に対して、通信技術を用いて取得する取り組みを実施している。③においては AGV とロボットを組み合わせることで自走ロボットとし、工場全域にアクセスできるロボットシステムを実装した。この自走ロボットを用いて、外部PCの制御で長距離ワークの搬送を試みている。

**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、屋内工場環境向けの無線環境データベースを実装した。これらを元に山本金属のラーニング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行った。本データベースは、位置情報が未知の場合、精度が低い場合、位置が既知の場合について処理できるように設計されており、次年度以降に実施する無線環境把握の実証に活用する準備が完了した。

### (8) 今後の研究開発計画

**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):** 令和6年度は研究開発項目2-bで実施する実証実験を通して得られたデータを基に最終的な無線環境データベースの精度検証を実施する。実際のLF内での検証では、自動搬送ロボットの動作による環境の変化や、実際に行われる制御やセンサ情報収集の量に応じて、環境が時間的に変化することが予想される。これらの変化要因を吸収して周波数・時間・空間をダイナミックに活用可能な情報・電力同時伝送ハイブリッド共用無線の実現に向けたアルゴリズムを確立し、その性能評価を実施する。

**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):** 令和5年度までに開発・検討してきた無線資源・移動経路割り当て、ならびに情報・電力伝送手法に対して、研究開発項目2-bを通して得られた観測情報ならびに無線環境情報を用いて高信頼・大容量・低遅延な情報伝送と屋内環境に多数配置された端末への高信頼な無線電力伝送を実現する多次元無線資源割当の高度化を行い、性能評価を行う。さらに、無線資源および移動経路割り当て手法に関しては、山本金属が保有するラーニングファクトリーで実験を行い、得られた結果を用いたエミュレーションによりその有効性を評価する。また、自動搬送ロボットの無線資源ならびに経路設計に関しては、令和5年度に引き続き、山本金属が導入した移動搬送ロボットにインプットすることで実効性を評価し、最終目標達成に向けて検討を進める。

**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):** 2023 年度までに開発してきたビームフォーミング方式と送電アンテナ配置方式を組み合わせることで、電波の仮想保護エリア確保手法の性能を向上させる。具体的には送電アンテナ配置方式に基づき配置したアンテナアレイに、ヌル領域を有するビームフォーミング方式を適用することにより、両者を組み合わせた無線電力伝送システムを構築し、実測によりその性能を評価する。また、この評価を踏まえてビームフォーミング制御方式ならびに送電アンテナ配置方式の解析・改良を検討する。

**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):** 高精度な電波空間情報取得のために、複数台のスペクトラムモニタを用いた多地点・複数周波数同時センシング技術の検討を行うことで、3 点以上の多地点同時センシングかつモニタ間時刻同期精度ミリ秒オーダ以下が実現可能なセンシングシステムを構築する。そのシステムを用いて実環境において実測評価を実施し、高精度な電波空間情報取得が可能であることを実証する。また、電波空間と実空間の各情報の高精度統合のために、実空間位置情報を 10 cm オーダ以下 ( $1\sigma$  値) の精度で取得できることを確認する。さらにセンシングシステムで取得した電波空間情報を基にして、実空間内の複数地点における受信信号電力値の推定を行い、その誤差が 10 dB 以下 (センシング 3 点以上に囲まれた位置における  $1\sigma$  値) であることを実証する。

**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):** 令和 5 年度では、摩擦攪拌接合時の AE 信号ならびに高速度カメラ画像を収集できるシステムを構築した。さらに、本研究課題の中核となる Learning Factory での実験に必要な L5G 通信ならびにネットワーク環境を整備し、その性能を評価している。ロボット・無人搬送車の制御システムに関しては、工具測定作業・計測作業・広範囲ワーク搬送作業の自動化構築など、年度目標通りに進めている。令和 6 年度以降、画像による異常検知ならびに Learning Factory での通信実験を継続し、最終目標を達成する。

**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):** 本研究開発最終年度として実際のファクトリ内で自動走行ロボットなどを動作させた状態での無線環境把握技術の性能検証を行う。ファクトリでの製品生産工程に沿った形で、ローカル 5G およびその他の無線機器を用いて環境把握を行い、時間変動も加味した形での無線環境把握性能評価を実施する。実際に B5G/6G で想定する情報・電力同時伝送を行うダイナミックな無線資源管理を行う無線システムを本プロジェクトで実装して評価するには時間・予算ともに不足することから、ここでは、通信ログの記録を行った上で、エミュレータを構成して最終的に考案する自営 B5G/6G を活用することで、各機能が統合利用された場合に必要とされる周波数資源が情報伝送と電力伝送を独立に設計した場合と比べて、ハイブリッド共用無線とすることで、20%以上削減できることを確かめ、本研究開発で設定した目標が達成できていることを確認する。