

1. 研究課題・受託者・研究開発期間・研究開発予算

- ◆研究開発課題名 : 通信・電力を無線化し連携協調動作するワイヤフリーロボットの研究開発
- ◆受託者 : (株)国際電気通信基礎技術研究所、(大)室蘭工業大学、(大)千葉大学、(学)五島育英会東京都市大学
- ◆研究開発期間 : 令和4年度～令和5年度(2年間)
- ◆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230百万円(令和5年度150百万円)

2. 研究開発の目標

無線技術が広く使われるようになった現在でも、メカトロ機器内部は配線が多い。そのため、軽量化が困難で、配線工数もかかり、断線リスクを抱えたままである。また、配線は、分解・組立を困難にしている。そこで、無線技術を制御・電力伝送の両方に用い、さらに周辺技術を動員して、ワイヤフリーロボットを実現する。具体的には、0.1ms以下の遅延で動作予測から基地局を切り替えるミリ波通信、負荷変動に出力が影響されないマルチホップワイヤレス給電、電力ピークを低減するモータ協調制御、関節部分が容易に脱着できるドッキング機構、複数ロボットが連携して一つの作業を行う協調動作ロボットを実現する技術を構築する。

3. 研究開発の成果

各課題の最終目標

研究開発項目1 ワイヤレスロボティクスにおける協調型制御技術

1-a) 低遅延ミリ波通信と複数ロボット・基地局の連携協調動作に関する研究開発
低遅延プロトコルと干渉回避技術によりミリ波通信で0.1ms以下の遅延で安定した無線制御を低価格を意識した回路で実現。

ロボットの動作に合わせ
基地局切替

雑音にロバストな変復調

複数基地局間の
チャンネル調停

パケット長を短くし
低遅延化

目標

- 低遅延(0.1ms)
- 伝送速度10Mbps以上
- 高雑音(モータノイズ、干渉、非接触電力伝送からの雑音)下での安定動作
- 複数基地局・複数ロボット対応

1-b) ロボットアーム要求を考慮したワイヤレス給電負荷低減のモータ協調制御に関する研究開発
ロボットアームの最小エネルギー経路生成法を確立し、総電力のピーク値を1kW以下を達成しつつ他アームとの協調制御技術も確立。

ロボットアームA

ロボットアームB

ロボットアームk単体の電力

$$P_k(t) = \sum_{i=1}^n P_{k-i}(t + \Delta t_i) \leq \max P_k$$

変数 $P_{k-i}(t)$: モータk-iの時間tでの電力(最適値)
 Δt_i : モータk-iの遅延時間
(k=A, B, i=1~6)

ロボットアームA, Bの総電力P

$$P = P_A(t) + P_B(t) = \max(P_A(t) + P_B(t))$$

制御のイメージ

2023年度研究開発成果

- リフレクトアレーが電波の不感地帯対策に有効であることをシミュレーションで確認したうえで、実際に性能検証した。
- プロトタイプロボットで高速・高トルク検証を行い、モータ選定・重量バランスなど留意点を確認

リフレクトアレー無し

リフレクトアレー有り

70度方向への反射を増加させたりフレクトアレーの開発に成功

- マイクロ波帯通信をミリ波ダウンコンバートする系をFPGAベースで構築。目標の倍を超える25Mbpsでの伝送を達成。
- 小型化を目指しマイコンベースのベースバンド処理装置及び機能や性能を確認するための多元接続評価治具も平行して開発。

- 複数ロボットアームの動作を対象に整数計画法により総消費電力を低減する軌道シークエンスを考案、改良課題を明らかにした。

- 単体のロボットアームを対象にエネルギー最小問題と角速度減速を組み合わせた電力制限下での軌道生成方法について考案、シミュレーションにより実現性を確認した(特許出願済)。

軌道と電力プロファイルの関係

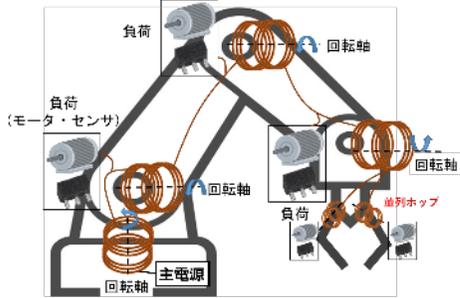
エネルギー最小軌道で得られた電力プロファイル

電力制限下での電力プロファイル

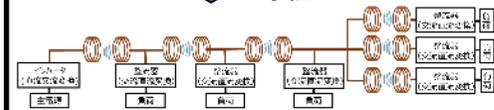
STEP 1: エネルギー最小軌道を目標
STEP 2: 電力制限を超える時間、候補する時間等を把握
STEP 3: 電力超過時間
単体アーム: 各関節の角速度を0倍(0$\leq \omega \leq 1)$にしてゆっゆゆ動作させる。複数アーム:
1) 軌道を分割し、組み合わせで電力超過2ヶ所アームの制限がない場合の電力を基準値に比例配分→1)の手法
STEP 4: 電力制限下時電力制限以下となった時間での状態を初期条件、終了関での状態を境界条件に軌道再設計

研究開発項目2 ワイヤレス電力伝送とそれを実現する構造設計

2-a) ロボットアーム向け多段直並列多出カワイヤレス給電システムの研究開発
多段直並列多出カポロジにおいて負荷変動、および位置ずれにロバストなワイヤレス給電システムを設計し、キロワットレベルでの実証を実施。



等価モデル



システム概要

- ✓センサ、モータへの電源供給のワイヤフリー化
- ✓関節間には有線で結合
- ✓ロボットの関節部分でワイヤレス伝送を適用
 - 断線等による故障のリスクの軽減
 - 可動域の制限から解放

技術要素

- ✓磁界共鳴方式の適用による高電力伝送効率の実現
- ✓入力多出力、多段直並列システム設計
 - 世界トップレベルの解析技術¹⁾を駆使し、数理モデルを構築
 - 独自特許技術²⁾を活用した全体効率の最適化・理論限界の導出
- ✓負荷非依存動作による制御レス給電の実現

目標

- ・ピーク電力1kW
- ・平均電力600W
- ・効率80%以上
- ・4マルチホップで最終ホップは並列

2-b) 堅牢かつ脱着容易なロボット関節を実現するワイヤレス給電用ドッキング機構に関する研究開発

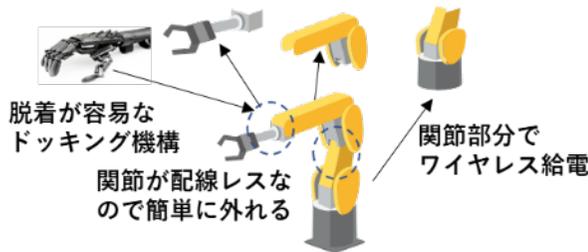
無線通信やワイヤレス給電を考慮しつつ宇宙機の技術を応用し、堅牢かつ容易に脱着できるドッキング機構を内蔵したロボットアームの実現。

必要要件

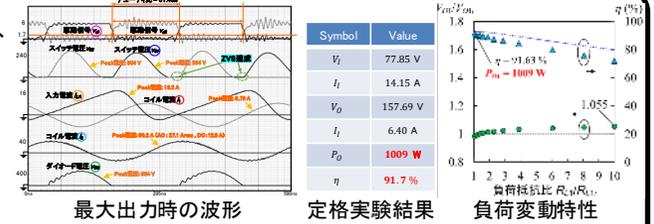
- ✓脱着が容易となるロボットアーム
 - 脱着機構の考案と嵌め合い(クリアランス)の設計
- ✓必要な剛性や強度を持つロボットアーム
 - 破損や先端の位置精度の確保
- ✓ワイヤレス給電を阻害しない脱着機構
 - 素材の選定や部品配置

技術要素

- ✓脱着機構の構想考案
 - 無線給電の性能を妨げない素材および部品配置構成
 - 駆動に必要な強度や剛性の決定
 - 製造における寸法精度(部品の嵌め合い精度)の決定
- ✓電子機器の熱制御
 - 通信機器や無線給電回路からの発熱量の推定法
 - 熱制御の検討(配置や熱制御材の選択)



- 課題1: 1kWの目標に対して、1ホップのワイヤレス給電システムにおいて1009W出力を91.7%の高い効率にて達成した。インバータの冷却装置のみで排熱できることも確認した。他部品には発熱対策が必要であることが分かった。
- 残りの課題2: 同一コイル仕様、課題3: 位置ずれ対応、課題4: バッテリー負荷対応の3つの課題は解決した。

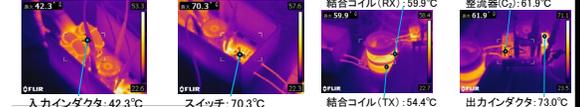


最大出力時の波形

定格実験結果

負荷変動特性

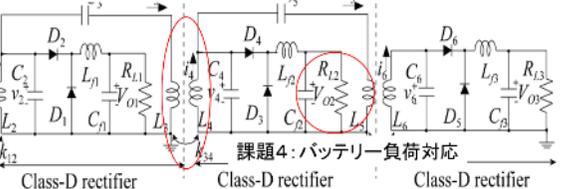
発熱状況



課題1: 大電力化

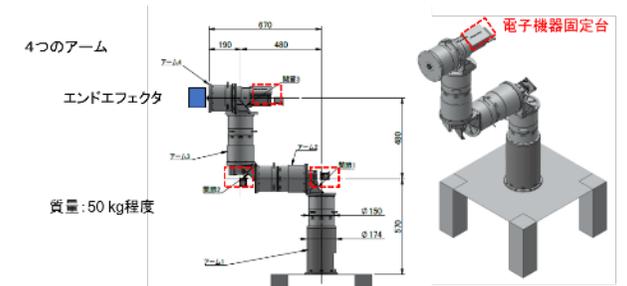
課題2: 同一コイル仕様

課題3: 位置ずれ対応

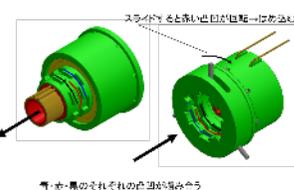


回路と各課題の対策ポイント

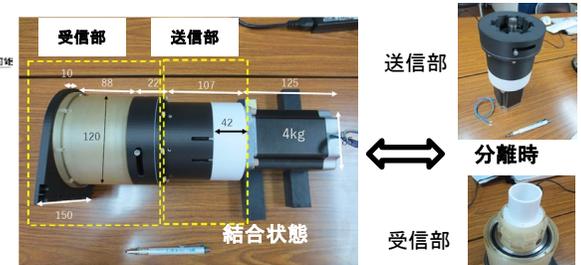
- ロボットアームの全体設計を進め、形状・サイズを決め、強度と剛性の設計を実施した。無線給電やモータ容量の試験を並行して詳細な構造構成を決定する。
- 2-a) 脱着機構の設計を完了し、3Dプリンタを用いて試作を実施し、スムーズな脱着とアーム駆動を確認した。



ロボットアーム全体の外形



脱着機構の設計



脱着機構の試作品

4. 特許出願、論文発表等、及びトピックス

国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	標準化提案	プレスリリース報道	展示会	受賞・表彰
6 (6)	0 (0)	4 (4)	32 (29)	0 (0)	0 (0)	1 (1)	1 (1)

※成果数は累計件数、()内は当該年度の件数です。

- ◆ 実質14カ月の研究期間しか無かったにもかかわらず、インパクトファクターの高いIEEE Transactionsなどの研究論文、ECCEやIECONなどIEEEが主催する国際会議に多数、採択された。
- ◆ 知財化アドバイザの協力を得ながら目標を超える特許出願を行った。
- ◆ 我々の研究内容を学会発表などから知り、産業用ロボットメーカー・ロボット用ケーブルメーカーからアプローチがあり情報交換を実施した。
- ◆ 2023年9月に開催された電子情報通信学会ソサイエティ大会で「ワイヤレスハーネスの研究開発状況」と題した依頼シンポジウムセッションを企画し、本研究プロジェクトから4件の発表を行った。会場はほぼ満席で、本研究及びワイヤレスハーネス技術への関心の高さを再認識した。
- ◆ 2023年10月に開催された電子情報通信学会 革新的無線通信技術に関する横断型研究会(MIKA)において最優秀ポスター賞(若手部門)の表彰を受けた。

5. 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

実質14カ月の研究期間しかない中で多くの研究成果が出ていることもあり、別なスキームでの研究開発の継続を目指すことになった。

