

2023年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	東京大学 新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻
職位または役職	特任講師
氏名	永井 栄寿

1. 研究題目

ドローンへの飛行中非接触給電における送受電電力制御の開発

2. 研究目的

報告者は現在の所属機関で走行中の電気自動車(EV)への非接触給電技術の開発に取り組んでいる。EVは短い航続距離や長い充電時間などの課題があり、普及が進んでいない。走行中のEVへの非接触給電は道路に敷設したコイルから車両に搭載されたコイルへ直接非接触で給電できる技術であり、走行で消費したエネルギーを走行しながら得られるため、航続距離と給電時間の両方の問題を解決できる。

近年、人・モノの自由な移動を可能とするドローンが注目されている。EV同様に、ドローンも航行距離が搭載バッテリーにより制限されるため、移動中の非接触給電は有効である。本研究では高効率・大電力給電が可能な磁界共振結合方式を用いた非接触給電をドローンへ適用する。報告者は図1に示すドローンのピッチ運動と上下方向を模擬できるテストベンチを製作し、姿勢制御と受電電力制御に関する研究を2021年度から実施してきた。研究で使用してきた非接触給電設備は、報告者が所属する研究室のEV用に開発された設備であり、ドローンベンチで使用されている電気的な仕様に合致していない。また、受電側コイルもEV用に開発されたものを応用しているため、銅量が多い。本研究では、受電側整流器とコイル設計に取り組み、受電側設備の軽量化および非接触給電の高効率化を行う。これまでに開発した受電側電力制御を実装し、実験的に有効性を確認する。

次に、図2に示す送電側の電力制御開発にも取り組む。これまでの実験では、受電側制御のみに着目した制御であったため、送電側は過電流保護機能しか実装していなかった。実際のドローンへの非接触給電で



図1 ドローンテストベンチ



図2 送電側電力制御

は、受電コイル検知、送電電力制御、送電停止機能も必須である。そこで、EV 向け非接触給電で開発してきた電力制御をドローンテストベンチに実装し、各技術がドローンへの非接触給電に応用可能であることを実証する。ドローンへの非接触給電は、受電コイルの姿勢とコイル間の距離が大きく変わる点が EV と異なるため、図 1 のドローンベンチを用いてピッチ角および高度による各技術への影響を実験により明らかにする。

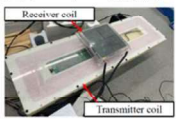



3. 研究内容及び成果

今年度の研究内容及び研究成果は大きく以下の 2 点である。

(i) 受電側システム設計

昨年度までの研究では、受電側設備に EV 用の走行中給電で開発されたコイルおよび整流器を応用していた。しかしながら、本研究で使用するドローンベンチが想定する負荷電力と EV 用システムでは表 1 のように仕様が大きく異なるため、EV 用をドローンへそのまま適用するとシステム効率や整流器重量がドローンに適さない。特に、小型ドローンでは受電側電圧は 15 V 程度、大型ドローン(ドローンベンチ)では 50 V であり、EV バッテリーと比較して電圧が低い。そこで、送受電コイルおよび整流器を設計・製作した(表 1 内写真)。EV 用整流器は高耐圧 SiC モジュールを使用しており、冷却用のヒートシンクが大型のため、重量が 2 kg 以上あるのに対し、ドローンシステムはバッテリー電圧が低いことから、低耐圧のディスクリート Si デバイスを使用している。また、ドローンはプロペラによる風により冷却性能をそれほど必要としないため、ヒートシンクを小型化し、約 200 g の整流器を実現した。コイルに関しては、EV 用とサイズをほとんど変更していないが、フェライトの代わりに薄く軽量のフェライトシートを使用し、軽量化を行った(昨年度、ドローンベンチ可動部軽量化時に実施)。ただし、送受電コイル間の結合係数は EV 用システムの方が高いため、非接触給電部の効率はドローンベンチの方が低い。受電側システムの設計に関して、一般的なドローンにも適用可能な重量制約を考慮したシステム設計手法を提案し、国内会議に論文投稿し、発表を行った(発表論文[1])。

表 1 受電側システム比較

	EV用	ドローン用
受電電力	20 kW	1.5 kW
受電電圧	350~500 V	50 V
受電電流	40 A	30 A
送受電コイル	送電コイル：1,086×318 mm 受電コイル：230×230 mm 受電コイル重量：3.8 kg 	送電コイル：1,000×220 mm 受電コイル：220×220 mm 受電コイル重量：0.8 kg 
整流器	 重量：2,200 g	 重量：210 g

(ii) センサレス受電コイル検知

EV への走行中給電同様に、ドローンへの飛行中給電においても受電コイル検知手法が必須である。受電コイルが送電コイル上にいない状態で送電を開始すると、本研究で使用する SS 型磁界共振結合方式の非接触給電では、送電側に大電流が流れ、機器が破損する。報告者の所属する研究室では過去に送電側パルスを用いた受電コイル検知手法を提案している。それをドローンにも適用できるか、実験検証を行った。

EV への走行中給電とドローンへの飛行中給電の大きな違いは受電側コイルの姿勢およびギャップの変動である。EV システムでは送受電コイルは必ず平行であり、横ずれおよびヨー角の変動があるのに対し、ドローンは横ずれ、ヨー角、ピッチ角、ロール角、高度が変動する。ドローンベンチはピッチ角および高度に変動を再現することが可能なため、それらの変動が受電コイル検知手法に与える影響を実験検証した。図 3 はギャップ変動およびピッチ変動による送受電コイル間の結合係数変動の計測結果である。ギャップ変動により結合係数の大きさが大きく変動し、ピッチ角変動により結合係数のグラフ形状が変わることが確認できる。レーザーセンサを使った位置検出手法とセンサレス

検知手法の比較を図 4 に示す。レーザセンサを使用した検知手法は安全のため結合係数が高い位置に設定しており、送電開始が遅い。一方で、センサレス検知手法は受電タイミングを結合係数の閾値で決定するため、送電開始が早く、結果として受電電力量を大きくすることが可能である。センサレス検知手法はギャップ変動およびピッチ角変動による結合係数変動に関係なく、過大な電流を抑制することができることを実験検証により明らかにした。本研究の成果は、国際会議に論文投稿し発表した(発表論文[2])。

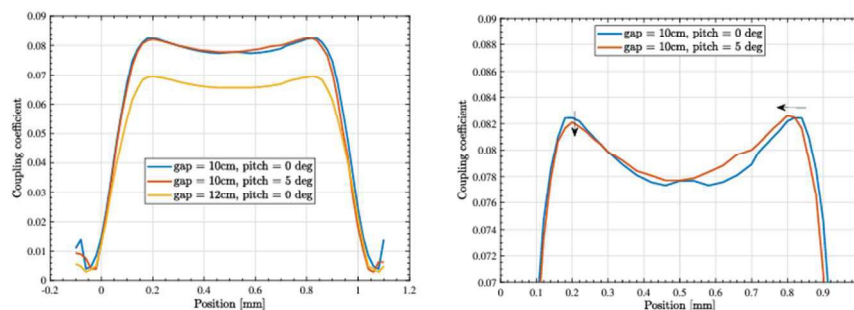


図 3 ギャップおよびピッチ角変動による結合係数の変化
(左:全体図、右:拡大図)

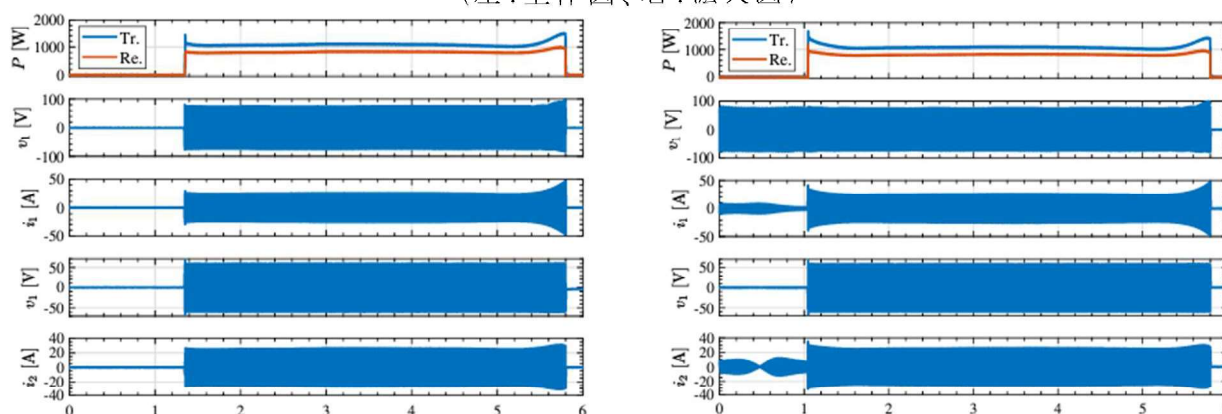


図 4 飛行中給電実験波形
(左:レーザセンサ検知、右:センサレス検知)

4. 今後の研究の見通し

2022 年度においてドローンの飛行高度を電力制御に用いる手法を提案し、今年度は受電コイル検知手法に関して研究を行った。現時点で、飛行中給電における受電コイル検知、送電開始、受電電力制御、送電停止までドローンベンチを使用して実験検証が完了している。送電側の制御に関しては、実験検証中であり、それらをすべて含めた飛行中給電に関する内容を学術論文誌に投稿予定である。

また、ドローンベンチの受電側設備の軽量化は完了しているが、実際にドローンベンチの受電側にバッテリーを含めて搭載することはできていない。ドローンベンチのモータ・プロペラ性能は全重量を保持できるほどの推力を出力することが可能である。今後、受電側設備をすべてドローンベンチ可動部に搭載し、送受電実験により、航続距離が無制限となることを検証する。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

国内会議(査読無し)

[1] 藤本 浩太, 佐藤 悠介, 永井 栄寿, 藤本 博志, "重量制約を考慮したドローンの飛行中磁界共振型無線電力伝送のための受電側システム設計に関する基礎検討", 電気学会 電力技術/電力系統技術/半導体電力変換 合同研究会, 長崎, 2024.

国際会議(査読付き)

[2] Sakahisa Nagai, Yusuke Satoh, Kota Fujimoto, Hiroshi Fujimoto "Sensorless Drone Detection for In-Flight Inductive Power Transfer Using Transmitter-Side Voltage Pulses", WPTCE2024, Kyoto, 2024