

## 2022年度 永守財団 研究助成 研究報告書

|         |                                   |
|---------|-----------------------------------|
| 所属機関    | 東京大学 大学院新領域創成科学研究科<br>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低高度姿勢制御および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。EVと異なる点は図1に示すとおり、送受電コイル間ギャップだけでなくドローンの姿勢によっても給電能力が変化することである。報告者は2021年度永守財団研究助成において、地面効果による揚力変動が機体姿勢に与える影響に関して検討を行ったが、今年度研究では横風など他の外乱に対しても機体姿勢を安定に制御し、安定な非接触給電が可能な姿勢制御の開発に取り組む。

また、報告者は昨年度研究にて、受電電

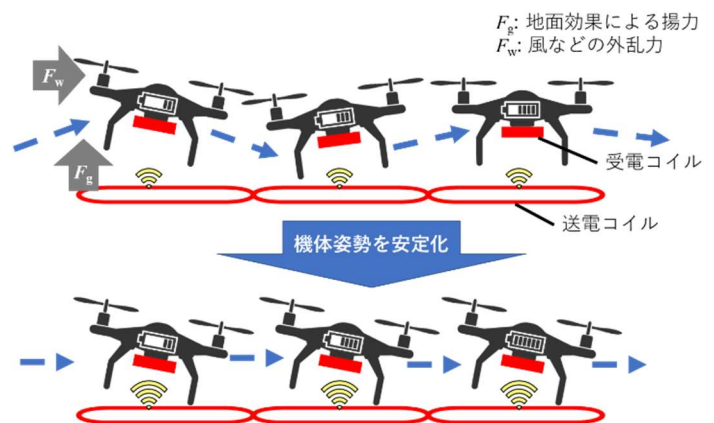


図1 飛行中ドローン非接触給電

力量から機体高度を推定する技術に関しても研究を実施している。給電設備として、EV で使用されるインフラとの共用を仮定していたため、受電側コイルにフェライトが使用されており、搭載重量に関する検討がされていなかった。また、ベンチシステムのプロペラ駆動には直流安定化電源を用いていた。これに対し、今年度は、より実用的なドローンシステムを考慮したベンチシステムを構築する。具体的には、受電側設備(コイルおよび整流器)の軽量化、実際のバッテリーを用いた非接触給電およびプロペラ駆動、バッテリー SoC を考慮した受電電力制御に取り組む。

本研究の目的は、飛行中のドローンへの非接触給電において、低高度での安定な姿勢制御および安定的な電力供給を実現するシステムを提案することである。

### 3. 研究内容及び成果

今年度の研究内容および成果は、大きく以下の 2 点である。

#### (i) 機体姿勢制御:横風などの外乱力が働く状態での機体姿勢制御

昨年度は図 2 に示すドローンベンチに対して、図 3 の上図のブロック線図のように高度  $z$  とピッチ角  $\theta$  の指令値をそれぞれ与えて姿勢制御を行っていた。横風を考慮するとき、機体に働く力は機体に対して水平方向 ( $x$ ) であり、高度とピッチ角への影響が検証できない。そのため、図 3 の下図のブロック線図のように制御指令を  $xz$  平面の位置指令に変更し、制御器を組み直し、横風による外乱力の影響を検証した。図 4 にシミュレーション結果を示す。5 秒時点で前進を始め、15 秒時点で風外乱 (1 N) が機体に加わり、25~40 秒で飛行中給電のために高度を落としている。PID 制御と外乱オブザーバ (DOB) の応答結果から、 $xz$  の位置制御は指令値が変動した場合も、外乱が入力されている場合も問題なく制御が行われている。一方、ピッチ角の応答は PID 制御の方がより振動的な応答であり、制御器の極配置を見直す必要がある。DOB を導入したほうが指令値追従特性がわずかに遅いものの、ピッチ角の応答の収束は早い。

以上のシミュレーション結果を実験に実装することを試みた。しかしながら、以下の実験機の問題の影響が大きく、実験結果は取得できていない。

- ・高さ  $z$  方向およびピッチ  $\theta$  方向のみに動作してほしいが、ロール方向にも運動してしまう。
- ・フレームの剛性が低く、ベンチ全体が振動的である。
- ・リニアガイドに位置依存の摩擦がある。

上記問題は、フレームの剛性とリニアガイドの取り付け部分を改善することで、解消することが見込まれるため、2023 年度の研究実施時に改良する。

#### (ii) 非接触給電:受電側設備の改良およびバッテリー SoC を考慮した受電電力制御

昨年度は電気自動車用に開発されたコイルを使用して実験を実施していたが、受電コイルの重量が重く、ベンチ可動部も重かったため、浮上させるためにモータの連続定格電力程度を使用していた。また、電気自動車向けであったため、送電コイルと受電コイル間のギャップのノミナル値は 5 cm と短く、送受電コイルの最適電圧比 (効率最大となる電圧比) も適切でなかった。今年度に改造した後のドローンベンチの写真を図 5 に示す。ベンチ可動部の軽量化のために、ドローンフレームなどでよく使用されるカーボンファイバ製のパイプを採用した。送受電コイルの設計も見直し、受電側はモータに供給される電力および電圧を考慮し、製作した。可動部重量は改造前は約 11 kg であったが、改造後は 5.5 kg (コイル重量 0.75 kg) まで軽量化を達成した。受電側共振コンデンサおよび整流器は可動部上に搭載できていないため、今後、整流器の軽量化を実施する。

受電電力制御は整流器をショートモードとダイオードモードでスイッチングさせる方法で実装が完了し、実験で動作するところまで確認している。しかしながら、電流指令は一定の状態であるため、SoC を考慮した受電電力制御は実験できていない。したがって、2023 年度研究では、検知パルス

によるコイル検知、受電電力制御、送電停止制御等の飛行中給電実現に向けた制御を実施する。



図 2 ドローンベンチ(改造前)

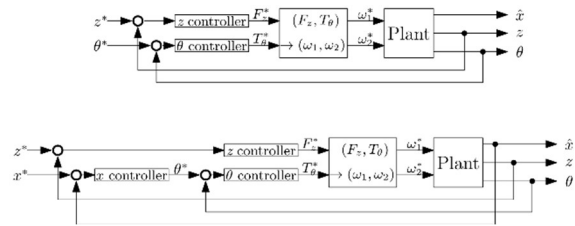


図 3 姿勢制御ブロック線図  
(上:  $z, \theta$ 制御、下:  $z, x$ 制御)

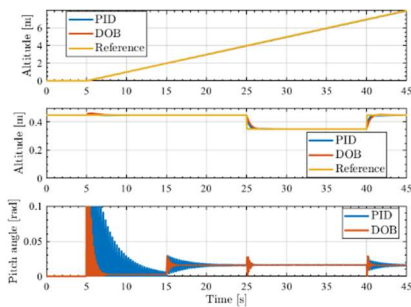


図 4 シミュレーション結果

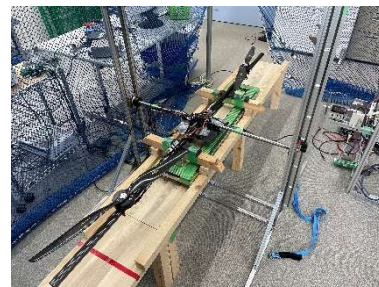


図 5 ドローンベンチ(改造後)

#### 4. 今後の研究の見通し

前章で記述した通り、運動制御の実装には、実験機の課題がある。改善案として、フレームの剛性とリニアガイドの取り付け部分を再設計し、ロール方向の運動の抑制、ベンチ全体の振動の抑制が見込まれるため、2023 年度研究実施時に並行して取り組む。

非接触給電の実験に関しては、制御プログラムを実装し、静止状態での実験は完了しているが、論文投稿に至っていない。運動制御側の課題を解決した後、運動制御と非接触給電の両方をドローンベンチに実装し、飛行中非接触給電の実験に取り組む。具体的には、送電側の検知パルスによる受電コイル検知、送受電電力制御、給電停止のドローンの飛行中給電の一連の動作を検証し、実験により有効性を示す。

#### 5. 助成研究による主な発表論文、著書名

[1] K. Fujimoto, S. Nagai, N. B. Minh, and H. Fujimoto, “Test bench study on attitude estimation in ground effect region based on motor current for in-flight inductive power transfer of drones”, IECON2023.

[2] Y. Sato, K. Fujimoto, R. Matsumoto, N. B. Minh, S. Nagai, and H. Fujimoto, “Basic study on received power control of in-flight inductive power transfer for drones by active rectifier switching and altitude regulation”, IECON2023.