

ドローンへの飛行中非接触給電における飛行高度と バッテリー電流の制御に関する基礎検討

佐藤 悠介*, 藤本 浩太, 松本 諒, 永井 栄寿,
グエン ビンミン, 藤本 博志 (東京大学)

Basic Study on Flight Altitude and Battery Current Control in In-Flight Wireless Power Transfer for Drones
Yusuke Satoh*, Kota Fujimoto, Ryo Matsumoto, Sakahisa Nagai, Binh Minh Nguyen, Hiroshi Fujimoto (The University of Tokyo)

Receiving the desired amount of power under the fluctuation of mutual inductance is a big challenge for in-flight wireless power transfer for drones. To deal with this issue, we proposed an approach which combines battery current control with drone altitude control. This approach allows stabilization of battery current and reduction of switching losses by the semi-bridgeless active rectifier. The effectiveness of the proposed approach is verified through experiment.

キーワード：ドローン, 非接触給電, 電流制御, 高度制御
(drone, wireless power transfer, current control, altitude control)

1. 序論

近年、農業⁽¹⁾や宅配⁽²⁾、設備管理⁽³⁾などの様々な分野でドローンが利用されている。一方で、ドローンは「飛行可能時間の短さ」という大きな課題を抱えている。飛行可能時間を長くする一つの解決策として、バッテリーの容量を大きくするという方法がある。しかし、バッテリー容量を大きくすると重量やコストの増加が避けられない。重量が大きくなると飛行可能時間はかえって短くなると考えられる。一方、飛行中のドローンのバッテリーを直接的に充電することができれば、バッテリー容量は増やさずに飛行可能時間を伸ばすことが可能になる。また従来の電線などを用いた充電方法と比べて、非接触給電 (WPT: Wireless Power Transfer) が柔軟性・利便性・安全性・信頼性の観点から有用であると考えられる⁽⁴⁾。特に本稿では Fig. 1 に示す通り、連続に配置する送電コイル上を一定速度で直線的に飛行するドローンに対し、直接給電を行う方式を想定する⁽⁵⁾。この方式は警備業務や基礎的な研究開発業務等、一定ルートや固定位置の運用が主体である任務において有用であり、ドローンの機体数の削減や継続的な飛行を可能とする。また、以上の状況においては低高度での飛行が含まれるため、電界結合⁽⁶⁾やマイクロ波⁽⁷⁾を用いた WPT と比較して、高効率かつ大電力な電力伝送が可能な磁界共鳴方式 (IPT: Inductive power transfer) がドローンへの給電方法として適していると考えられる⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾。

しかし、ドローンへの WPT には 2 つの大きな課題がある。1 つ目は、相互インダクタンスがダイナミックに変動することである⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。相互インダクタンスが変動することによって、受電電力やバッテリーに流れる電流が変動し、安定し

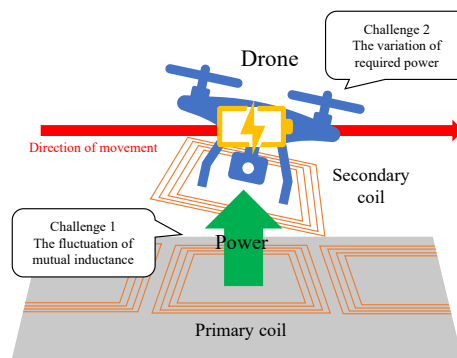


図 1 磁界共鳴方式を用いた飛行中のドローンへの非接触給電。
Fig. 1. WPT for in-flight drones using magnetic resonance method.

た給電を行うことができなくなる。また、バッテリー電流の変動により過電流が流れるなど、バッテリーへの負担も大きくなることが考えられる。2 つ目はドローンが所望する電力が変動することである。ドローンが所望する電力は、高度制御や姿勢制御の状態によって変動する。また、ドローン毎に重量やプロペラの大きさは異なるため、それらに適合する電力制御を行う必要がある。

受電側の電力制御には、相互インダクタンスを推定する手法⁽¹³⁾や送電側の DC 電圧を制御する手法⁽¹⁴⁾がある。前者はインダクタンスや抵抗などの回路パラメータの値が既知である必要があり、経年劣化や製造誤差などによるパラメータ変動に対応できない。また、後者は送電側と受電側の通信が必要なため、通信機器の搭載による重量増加や通信遅れなどの問題がある。

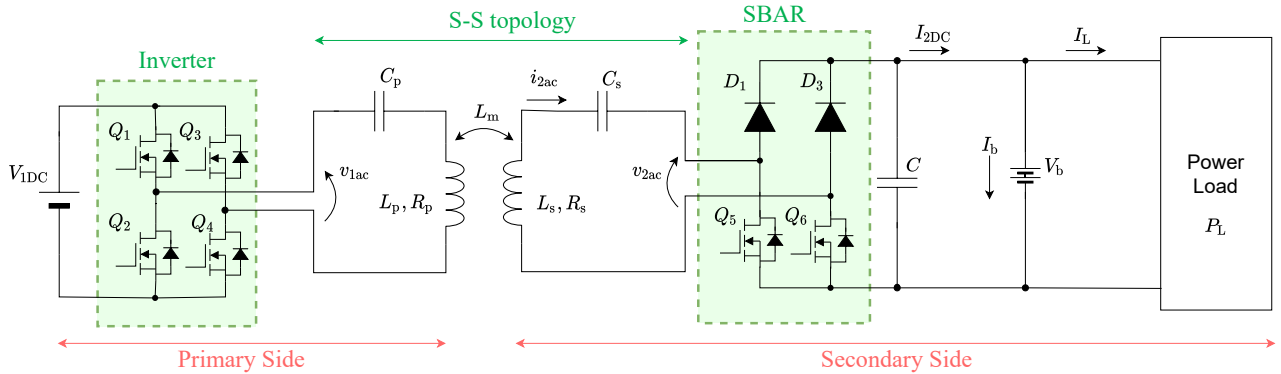


図 2 検討回路の全体図。

Fig. 2. Overall view of the circuit under study.

そこで本稿では、ドローンの飛行高度と受電側の整流器によってバッテリー電流を制御する手法を提案する。ドローンへの飛行中 WPT では、他のアプリケーションと異なり飛行高度を積極的に変えることにより、送受電コイル間の相互インダクタンスを変動させることができる。これにより、送電側と受電側の通信を必要とせず、回路パラメータの変動や送受電コイル間の位置ずれに関係なく電力制御を行うことができる。

本論文の構成は以下のとおりである。第 2 章では、本稿で使用する回路構成について述べる。第 3 章では、提案する制御手法を詳説する。第 4 章では、第 3 章で述べる二次側整流器と飛行高度を利用した電力制御手法の有用性を示す実験を行い、その結果を示す。最後に、第 5 章で結論を述べる。

2. 制御対象のモデル

本章では本稿で取り扱う磁界共鳴型 WPT 回路について述べる。Fig. 2 に WPT 回路図を示す。本稿では S-S 方式の共振回路を採用する。L, R, C はそれぞれインダクタンス、内部抵抗、キャパシタンスを表し、下付き添え字 p, s はそれぞれ送電側、受電側を示す。Q, D は MOSFET とダイオードをそれぞれ表す。V_IDC, V_b はそれぞれ入力電源電圧、バッテリーの電圧を表し、P_L はドローンのモータを模擬した電力負荷の大きさを示す。L_m は相互インダクタンスを表す。また、受電側の整流器としては Semi-bridgeless アクティブ整流器 (SBAR: Semi-bridgeless Active Rectifier) を用いる。SBAR はフルブリッジアクティブ整流器等と比較して、単純な構成で動作させることが可能であり、軽量化が望まれるドローンの無線電力伝送に適している。

3. 飛行高度制御と SBAR を用いたバッテリー電流制御手法

本章では本稿で提案する制御手法について詳説する。制御の全体像を表すブロック線図を Fig. 3 に示す。本稿で

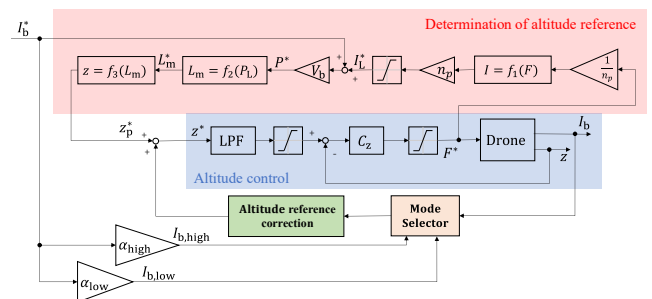
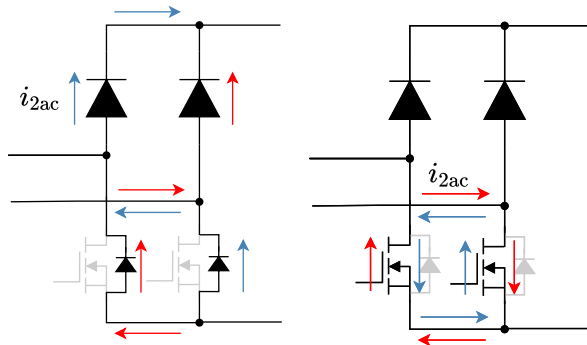


図 3 飛行高度とバッテリー電流制御系のブロック線図。

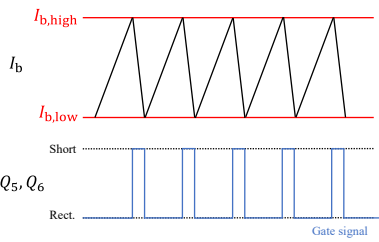
Fig. 3. Block diagram of flight altitude and battery current control system.

はバッテリー充電電流の目標上限を $I_{b,high} = \alpha_{high} I_b^*$ 、下限を $I_{b,low} = \alpha_{low} I_b^*$ と設定する。n_p, F, I_L はドローンのプロペラの数、推力、モータに流れる電流をそれぞれ指す。また、f_1 は要求推力とドローンのモータ電流との関係を示す。本稿では簡単のため鉛直方向のみの制御を行っているため、機体は傾かず、すべてのモータの要求電力は等しいと仮定している。f_2 はドローンが所望する電力と相互インダクタンスとの関係を示し、後述する理論式で表される。f_3 は相互インダクタンスと飛行高度との関係から実験的に求まる関数である。C_2 は PID 制御器、LPF はローパスフィルタを示す。Δz_p^* は高度指令値偏差を示し、3.3 節で詳説する。

〈3・1〉 SBAR を用いたバッテリー電流制御 SBAR は下アームの MOSFET のゲート信号によって、整流モード (Fig. 4(a)) と短絡モード (Fig. 4(b)) を切り替えることができる⁽¹⁵⁾。本稿ではヒステリシスコンパレータを用いてゲート信号を作り、SBAR の動作モードを切り替えることでバッテリー電流を制御する⁽¹⁶⁾。Fig. 4(c) に示すように、バッテリー電流 I_b が I_b,high を上回ると短絡モードに、I_b,low を下回ると整流モードに切り替えることにより、 $I_{b,low} \leq I_b \leq I_{b,high}$ となるように制御する。この手法は位相検波器などの追加回路無しで電流を簡易的に制御できる一方で、ダイオード整流



(a) 整流モード. Rectification mode. (b) 短絡モード. Short mode.



(c) ヒステリシス制御. Hysteresis control.

図4 SBARの動作モードとヒステリシス制御.
Fig. 4. Operation mode and hysteresis control of SBAR.

器と比較してスイッチング回数が多くなり損失が大きくなると考えられる. そのため, 次節で説明する飛行高度制御と組み合わせることで, 整流モード状態を維持し, スwitching損失を低減することを提案する.

〈3・2〉 相互インダクタンスモデルに基づく飛行高度制御の指令値決定 飛行高度制御では, まず所望電力からモデルを基に, 所望電力を満たす相互インダクタンスとなる飛行高度を計算し, その高度へと高度制御を行う. 次にスイッチングロスの低減を図るために, 整流モードのみで所望電力を達成できるように飛行高度の調整を行う. 本節では, 飛行高度制御の指令値の計算手法の説明を行う.

Fig. 2の回路について回路方程式を解く. 負荷を等価インピーダンス Z_{ac} で表すと,

$$Z_{ac} = \frac{v_{2ac}}{i_{2ac}} = \frac{8}{\pi^2} \frac{V_b^2}{I_b V_b + P_L} \quad (1)$$

となる. 受電電力 P_s は,

$$P_s = \frac{\omega^2 L_m^2 Z_{ac}}{(\omega^2 L_m^2 + Z_{ac} R_p + R_p R_s)^2} v_{1ac}^2 \quad (2)$$

となる. ω は動作角周波数である. よってドローンの高度が高くなり送受電コイル間のエアギャップが大きくなると, 相互インダクタンスが小さくなり受電電力は大きくなる. 逆に高度が低くなりエアギャップが小さくなると, 相互インダクタンスが大きくなり受電電力は小さくなる. したがって, ドローンの飛行高度によって受電電力を変化させることができる.

飛行高度制御の指令値は, ドローンが所望する電力 P_L を

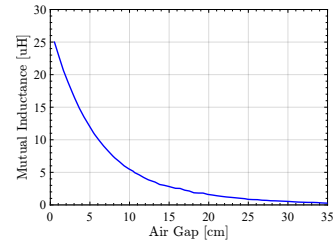
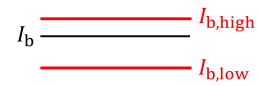
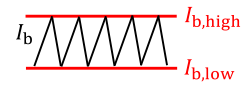


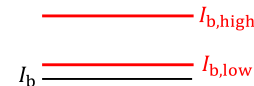
図5 相互インダクタンスとエアギャップの関係.
Fig. 5. Mutual inductance and air gap.



(a) 常時整流モード ($\zeta_p^* = \zeta_{ideal}$).
Always rectification mode.



(b) ヒステリシスモード ($\zeta_p^* > \zeta_{ideal}$).
Hysteresis mode.



(c) 電流不足モード ($\zeta_p^* < \zeta_{ideal}$).
Current shortage mode.

図6 各動作モードにおける電流波形.

Fig. 6. Current waveforms in each operation mode.

整流モードのみで受電できる高度である. 式 (2) から, ドローンが所望する電力と相互インダクタンスの関係を示す関数 f_2 を求めると,

$$L_m = f_2(P_L) = \sqrt{\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}} \quad (3)$$

となる. ただし,

$$\begin{aligned} a &= \omega^4 \\ b &= 2\omega^2(Z_{ac}R_p + R_pR_s) - \frac{\omega^2 Z_{ac} v_{ac1}^2}{P_L} \\ c &= (Z_{ac}R_p + R_pR_s)^2 \end{aligned}$$

である. よって Fig. 5 に示す実験的に求めた相互インダクタンスとエアギャップの関係 $f_3(L_m)$ から飛行高度の指令値 ζ_p^* が求まる. 本稿では基礎検討として, ドローンは鉛直方向にのみ移動すると仮定するため, エアギャップと飛行高度は等価である.

〈3・3〉 常時整流モードとするための指令値補正 前節で述べた飛行高度の指令値に追従して高度制御を行った場合, 経年劣化や製造誤差による回路のパラメータの変動や受電コイルの位置ずれなどにより理想の相互インダクタンスと差が出ることにより, バッテリ電流 I_b の取りうる状態

としては、Fig. 6 に示す3つが挙げられる。 z_{ideal} は所望の電力 P_L から関数 f_2 および f_3 を使用し、求めた理想条件における高度指令値である。

$z_p^* = z_{ideal}$ のとき、バッテリー電流は Fig. 6(a) となる。このとき $I_{b,low} \leq I_b \leq I_{b,high}$ であり、SBAR は常に整流モードとなる。この状態を「常時整流モード」とする。 $z_p^* > z_{ideal}$ のとき、バッテリー電流は Fig. 6(b) となる。このとき $I_{b,low} \leq I_b \leq I_{b,high}$ となるように、SBAR ではヒステリシス制御が行われる。この状態を「ヒステリシスモード」とする。ヒステリシスモードでは MOSFET のスイッチング回数が多くなり、損失が大きくなる。本稿ではアプリケーションとしてドローンを想定しているため、受電側のスイッチングによる整流器の発熱は冷却装置を搭載するなどの対策が必要となり好ましくない⁽¹⁷⁾。 $z_p^* < z_{ideal}$ のとき、バッテリー電流は Fig. 6(c) となる。このとき SBAR は常に整流モードとなる一方で、 I_b が $I_{b,low}$ を下回り、指令値 I_b^* との誤差 5% を超える。この状態を「電力不足モード」とする。電力不足モードでは、バッテリーの充電時間が理想よりも長くなってしまったりや負荷電力 P_L を賄えなくなることなどの課題が生じる。

そこで本稿では、ヒステリシスモードか電流不足モードのどちらかになった場合に飛行高度の指令値を補正し、常時整流モードとなるように制御する。アルゴリズムを Fig. 7 に示す。 Fig. 3 の Mode Selector にバッテリー電流を入力することにより、ヒステリシス制御が行われているかどうかを判断する。判断には式 (4) で示す短絡モードが占める割合 d を用いる。

$$d = \frac{T_{short}}{T_{short} + T_{rect}} \quad (4)$$

T_{short}, T_{rect} は短絡モードと整流モードの時間幅をそれぞれ示す。 $d \neq 0$ のときはヒステリシスモード、 $d = 0$ のときは常時整流モード、または電流不足モードであると判断できる。その後、ヒステリシスモードの場合は飛行高度の制御周期 T_s 毎に高度制御偏差の単位ステップ Δz_0 を高度指令値 z_p^* から引き、電流不足モードの場合は Δz_0 を足すことで指令値を徐々に変え、常時整流モードになった時点で補正は終了する。以上の指令値補正を行うことによって、スイッチング損失を低減し、電流指令値との誤差の小さいバッテリー電流による充電が実現する。

4. 提案手法の有用性の検証実験

本稿で提案する制御手法の有用性を検証するために、ヒステリシスモードから常時整流モードへの遷移について実験検証を実施した。パラメータを Table 1 に、実験の様子を Fig. 8 に示す。本実験では1方向に動くベルトドライブ型テストベンチを用いて送受電コイル間のエアギャップをダイナミックに変動させることにより、ドローンの高度変動を再現した。高度制御の PID 制御ゲインは実験的に決定し、時定数 0.03 秒程度の制御を実装した。本実験では簡単なた

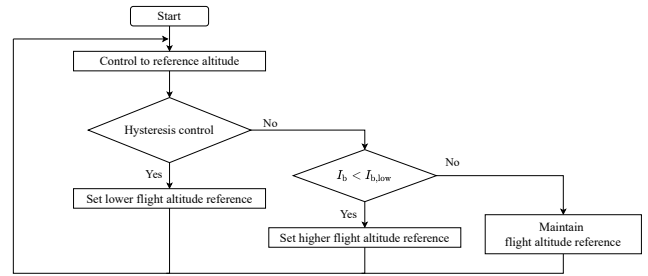


図 7 常時整流モードとするための高度指令値補正.

Fig. 7. Altitude reference correction to maintain always rectification mode.

表 1 実験パラメータ.

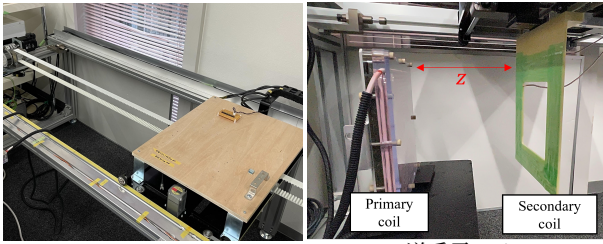
Table 1. Experimental parameters.

Parameters	Values
DC voltage source V_{DC}	50 V
Inductance L_p, L_s	98.42 μ H, 17.9 μ H
Resistance R_1, R_2	45.21 m Ω , 31.5 m Ω
Capacitance C_1, C_2	36.21 nF, 191.33 nF
Resonant frequency $f(= \omega/2\pi)$	85 kHz
Smoothing capacitor C	3900 μ H
Battery voltage V_b	22.2 V
Battery current reference I_b^*	5.2 A
Power load P_L	50 W
Number of propellers n_p	2
Current limitation gain $\alpha_{b,high}, \alpha_{b,low}$	1.05, 0.95
Preliminary altitude reference z_{ideal}	8.3 cm
Control period of flight altitude control T_s	2 ms
Unit step of altitude control deviation Δz_0	0.05 mm

め、ドローンは鉛直方向にのみ運動するものとしており、送受電コイル間の横ずれ縦ずれ・ピッチング・ローリングによる相互インダクタンス変動は無視している⁽¹⁸⁾。

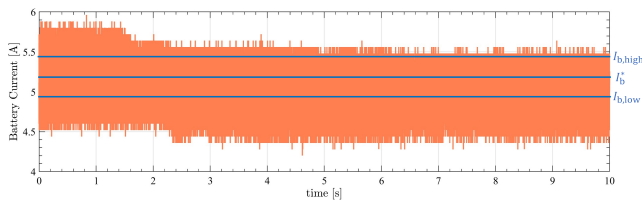
3.3 節で説明した指令値補正の有用性を検討するために電力伝送実験を行う。指令値補正無しのととき補正有りのときのバッテリー電流波形をそれぞれ Fig. 9, 10 に、飛行高度と指令値の推移を Fig. 11 に、SBAR の下アームに入力するゲート信号を Fig. 12 に示す。補正無しのととき、電流が $I_{b,high}$ を超えるときに Fig. 9 を示す通り、ヒステリシス制御が行われる。一方高度の調整を行われないため、Fig. 11 に示す通り飛行高度は一定となる。このとき SBAR のゲート信号は Fig. 12(a) となり、整流モードと短絡モードが高速に切り替わるヒステリシス制御が常に行われていることがわかる。このとき受電側 AC-DC 効率の定常での電力変換効率は 80.1% となる。

一方補正有りのとき、Fig. 10(b) に示す通り、電流が $I_{b,high}$ を超えるときにヒステリシス制御が行われる。このとき Fig. 11 の通り、高度指令値が小さくなり高度は下がる。結果、Fig. 12(b) に示す通り、受電電力が小さくなることにより短絡モードの割合が小さくなる。それにより SBAR は整

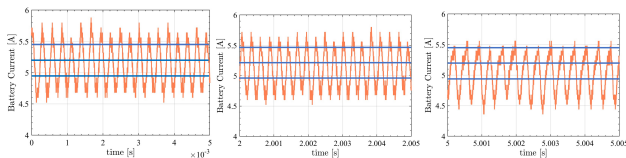


(a) テストベンチ. Test bench. (b) 送受電コイル. Primary and secondary coils.

図 8 実験の様子.
Fig. 8. Experiment Situation.



(a) 全体図. Overview.



(b) $0.000 \leq t \leq 0.005$ (c) $2.000 \leq t \leq 2.005$ (d) $5.000 \leq t \leq 5.005$

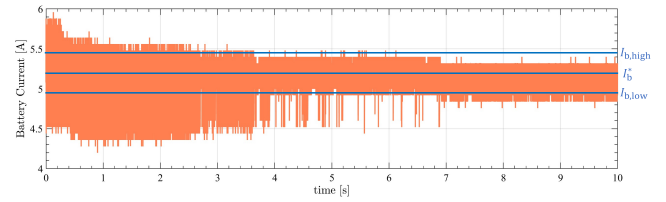
図 9 指令値補正無しのバッテリー電流波形.

Fig. 9. Battery current waveform without reference correction.

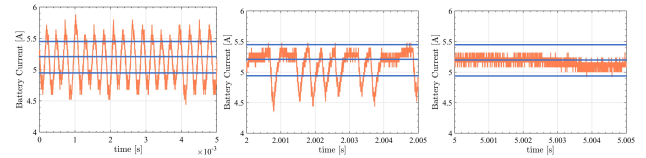
流モードのみで駆動するようになるため, Fig. 10(c),(d)に示す通り, バッテリー電流の変動は小さくなっていく. 最終的には Fig. 6(a)と同様の波形が得られた. 整流モードのときの受電側 AC-DC 効率は 81.3 % となる. よって補正無しのときと比べて 1.2 % 改善された. これは SBAR の MOSFET のスイッチング回数が減少し, スwitching 損失が低減されたためだと考えられる. また本稿で行った実験において, ドローンは相互インダクタンスが大きくなる方向に運動するため AC-AC 効率は高まり, システム全体の効率は 1.2 % 以上の改善が見込める. これにより, 提案手法である受電側整流器のスイッチング損失低減を可能とする電力制御手法の有用性が示せた.

5. 結論

本稿では飛行中のドローンへの非接触給電を想定し, ドローンの飛行高度とバッテリー電流を制御する手法を提案した. 提案手法の導入によって受電側 AC-DC 効率が改善することが実験により示した. これにより整流器の発熱を低減することで, 冷却装置の小型化, ドローンの軽量化が可能となる. 今後の研究としては, 駆動系にプロペラを使用するドローンを想定する実験ベンチを使用し, 実験を行う. ま



(a) 全体図. Overview.



(b) $0.000 \leq t \leq 0.005$ (c) $2.000 \leq t \leq 2.005$ (d) $5.000 \leq t \leq 5.005$

図 10 指令値補正有りのバッテリー電流波形.

Fig. 10. Battery current waveform with reference correction.

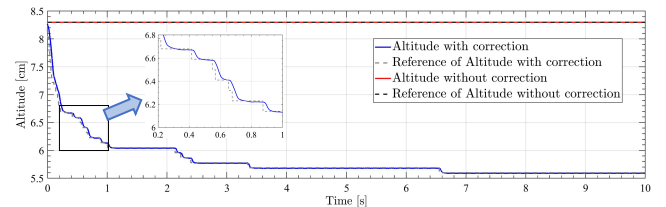
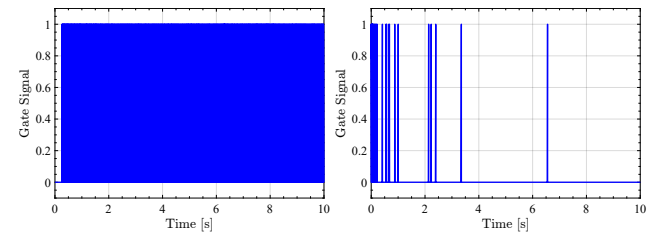


図 11 飛行高度と指令値.

Fig. 11. Flight altitude and reference.



(a) 補正無し. Without correction. (b) 補正有り. With correction.

図 12 SBAR のゲート信号.

Fig. 12. Gate signal of SBAR.

た本稿では簡単のためにドローンの運動を送電コイルに対して鉛直方向に限定したが, これには前進移動やピッチ角変動による相互インダクタンスの変動を考慮していないという問題点がある. 以上の問題点を解決するために提案手法を拡張することを今後検討する.

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 (基盤研究 A 課題番号: JP18H03768) の支援を受けたことを付記します.

文 献

- (1) D. Yallappa, M. Veerangouda, D. Maski, V. Palled and M. Bheemanna : "Development and Evaluation of Drone Mounted Sprayer for Pesticide Applications to Crops," Proc. IEEE Global Humanitarian Technology Conference, pp. 1-7 (2017)
- (2) D. Schneider: "Air Traffic Control for Delivery Drones [Top Tech 2017]," IEEE Spectrum, vol. 54, no. 1, pp. 32-33 (2017)
- (3) J. V. Dam, A. Krasne and J. L. Gabbard : "Drone-Based Augmented Reality Platform for Bridge Inspection: Effect of AR Cue Design on Visual Search Tasks," Proc. IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops, pp. 201-204 (2020)
- (4) Z. Zhang, H. Pang, A. Georgiadis and C. Cecati : "Wireless Power Transfer—An Overview," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 2, pp. 1044-1058 (2019)
- (5) K. Fujimoto, T. Hamada and H. Fujimoto : "Proposal on Model Based Current Overshoot Suppression of Receiver Side Coil in Drone Wireless Power Transfer System," Proc. Wireless Power Week (WPW), pp. 235-239 (2022)
- (6) C. Park, J. Park, Y. Shin, J. Kim, S. Huh, D. Kim, S. Park and S. Ahn : "Separated Circular Capacitive Coupler for Reducing Cross-Coupling Capacitance in Drone Wireless Power Transfer System," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 68, no. 9, pp. 3978-3985 (2020)
- (7) N. Takabayashi, N. Shinohara, T. Mitani, M. Furukawa and T. Fujiwara : "Rectification Improvement With Flat-Topped Beams on 2.45-GHz Rectenna Arrays," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 68, no. 3, pp. 1151-1163 (2020)
- (8) 居村岳広:「磁界共鳴によるワイヤレス電力伝送」, 森北出版社 (2017)
- (9) G. Lovison, T. Imura, H. Fujimoto, Y. Hori : "Secondary-side-only Phase-shifting Voltage Stabilization Control with a Single Converter for WPT Systems with Constant Power Load," IEEE Journal of Industry Applications, vol. 8, no. 1, pp. 66-74 (2019)
- (10) J. M. Arteaga, S. Aldhafer, G. Kkelis, C. Kwan, D. C. Yates and P. D. Mitcheson : "Dynamic Capabilities of Multi-MHz Inductive Power Transfer Systems Demonstrated With Batteryless Drones," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 6, pp. 5093-5104 (2019)
- (11) J. Zhou, B. Zhang, W. Xiao, D. Qiu and Y. Chen : "Nonlinear Parity-Time-Symmetric Model for Constant Efficiency Wireless Power Transfer: Application to a Drone-in-Flight Wireless Charging Platform," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 5, pp. 4097-4107 (2019)
- (12) Z. Zhang, S. Shen, Z. Liang, S. H. K. Eder and R. Kennel : "Dynamic-Balancing Robust Current Control for Wireless Drone-in-Flight Charging," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 37, no. 3, pp. 3626-3635 (2022)
- (13) Y. Gu, J. Wang, Z. Liang and Z. Zhang : "Mutual-Inductance-Dynamic-Predicted Constant Current Control of LCC-P Compensation Network for Drone Wireless In-Flight Charging," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 69, no. 12, pp. 12710-12719 (2022)
- (14) H. Zhang, Y. Chen, C. H. Jo, S. J. Park and D. H. Kim : "DC-Link and Switched Capacitor Control for Varying Coupling Conditions in Inductive Power Transfer System for Unmanned Aerial Vehicles," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 5, pp. 5108-5120 (2021)
- (15) D. Gunji, T. Imura and H. Fujimoto : "Stability Analysis of Constant Power Load and Load Voltage Control Method for Wireless In-Wheel Motor," Proc. 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia, pp. 1944-1949 (2015)
- (16) M. Sato, G. Yamamoto, D. Gunji, T. Imura and H. Fujimoto : "Development of Wireless In-Wheel Motor Using Magnetic Resonance Coupling," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 7, pp. 5270-5278 (2016)
- (17) J. Itoh, K. Mizoguchi, L. H. Nam and K. Kusaka : "Design Method of Cooling Structure Considering Load Fluctuation of High-power Wireless Power Transfer System," Proc. 4th International Future Energy Electronics Conference, pp. 1-6 (2019)
- (18) 藤本浩太, 横田健太朗, 永井栄寿, 藤本博志: 飛行中ドローンへの無線電力伝送を想定した受電コイルのピッチ角依存の結合係数のモデル化とその検証, 電気学会産業部門大会, pp. 117-120 (2021)