

# 配送用ドローンの消費エネルギーモデリングの改良

伊藤 哲<sup>1</sup> 根来 俊輔<sup>1</sup> 孔 祥博<sup>1</sup> 谷口 一徹<sup>2</sup> 富山 宏之<sup>1</sup>

**概要：**近年、ドローンは趣味用途から、農業、災害救助など幅広い用途で普及しつつある。中でも、荷物配送は実用的な用途として普及しつつある。ドローンによる荷物配送は、交通渋滞がなく、二酸化炭素の排出量も少ないため、従来のトラックを利用した荷物配送と比べて優れていると考えられている。しかし、一般的なドローンは蓄電池駆動のため、消費エネルギーの制約が厳しく、飛行時間は長くても数十分程度と言われている。そのため、ドローンを安全に運用するためには、消費エネルギーを可視化することが重要である。本論文では、従来のエネルギーモデリング技術を改良する。

**キーワード：**ドローン、消費エネルギーモデリング、重回帰分析、測定手法

## 1. はじめに

近年、荷物配送用のドローンは、有望な産業アプリケーションとして注目されている。ドローンは小型で遠隔操作が可能のため、趣味用途から、農業、災害救助など様々な分野での活用が期待されている。その中でも、ドローンを利用した荷物配送は実用化に向けて注目されている。ドローンは無人飛行であるため、人件費を削減出来るという利点がある。また、蓄電池で駆動するため二酸化炭素の排出量を削減できる。これらのように、ドローンは従来の配送と比べ多くの利点がある。そのため、様々な企業がドローンによる荷物配送の実用化を検討している [1][2]。しかし、ドローンによる荷物配送は大きく分けて2つの問題がある。1つ目は、ドローンが飛行できる時間が短いことである。ドローンはバッテリーで駆動するため、バッテリーの容量は飛行時間に大きく依存する。小型のドローンは、大容量のバッテリーを搭載することができないため、ドローンが配送を行っている途中でバッテリー切れとなり墜落する危険性がある。2つ目は、ドローンの飛行速度は搭載している荷物の重さに大きく依存することである。ドローンを利用した荷物配送では、多くの荷物を一度に配送する。多くの荷物を搭載した場合、荷物の重さが大きくなりドローンの高さを維持する力に多く利用される。そのため、ドローンの飛行速度は低下する。また、飛行速度が低下することで消費エネルギーが増加する。上記の問題を解決するために、墜落せず長時間飛行を実現するための高効率な電力管理技術が求められている。

本論文では、実際のドローンの飛行データからエネルギーモデルを構築する。文献 [3] は、ドローンの電力消費/エネルギー管理技術の研究を行っている。この文献では、飛行速度とドローンの負荷を入力とし、消費エネルギーを出力としたエネルギーモデルを構築している。しかし、この文献のエネルギーモデルはフィッティング誤差が大きいという問題がある。その理由は、重回帰分析と測定手法にあると考えられる。本論文では、これらの問題を解決するために、測定方法と重回帰分析を改良する。

本論文の構成は以下の通りである。2章では、ドローンの測定手法やエネルギーモデルに関連する研究を紹介する。3章では、エネルギー計測の方法とツールについて説明する。4章では、測定結果について述べる。5章では、エネルギーモデルについて説明する。最後に、6章で本論文を締めくくる。

## 2. 関連研究

ドローンの電力・エネルギー管理技術については、いくつかの研究がある [4][5][6]。これらの研究では、機体重量、高度、飛行速度、飛行距離など様々なパラメータを考慮し、空気力学の原理に基づいてエネルギーモデルを構築している。これらの研究では、機体重量や高度などの幾何学的な制約条件のみを用いてエネルギーモデルを構築しているが、ドローン特有の特徴が考慮されていない。そのため、ドローンを飛行させたときの消費エネルギーと大きく異なる問題点がある。理論的な影響だけでなくドローン特有の特徴を考慮したエネルギーモデルを構築する必要がある。文献 [7] では、文献 [8][9] で用いたヘリコプターの基本的な

<sup>1</sup> 立命館大学 Ritsumeikan University

<sup>2</sup> 大阪大学 Osaka University

消費電力モデルを用いて電力を測定し、構築したモデルを評価している。また文献 [10] では、文献 [11] を参考にし、DC モーターの電力モデルをベースにエネルギーモデルを構築している。また文献 [12] では、モーターだけでなくプロペラの形状に着目しドローンのエネルギー消費モデルを提案している。これらのドローンの電力/消費エネルギーモデルに関する研究では、電力は主にドローンのモーターから取得している。

ドローンのバッテリーに着目した電力/エネルギー管理技術に関する研究もいくつか存在する。Chen は、バッテリーの SOC(State of Charge) に応じてバッテリーとモーターの電力効率を変化させる非線形バッテリーモデルを提案した [13]。このシミュレータでは、提案された電池モデルと文献 [14][15] で提案された単純な電池モデルとの間で、精度が 16 % 向上している。Abdilla は、AR.Drone 2.0 において、様々な種類のリチウムイオン電池を用いて、電池容量と飛行可能時間の関係を調査した [16]。文献 [17] では、SOC だけでなく、バッテリーの状態を考慮したバッテリーモデルを構築している。

ドローン配送計画は、ドローン配送サービスを実現するための重要な研究分野の一つである [18][19]。これらの研究では、与えられた要件に対して効果的な配送計画を決定する。ドローンのワイヤレス給電は、長時間の飛行を実現するためのもう一つの研究テーマである [20]。ドローンのバッテリーを充電する方法としては、有線給電が最も一般的である。しかし、有線給電とは異なり、無線給電はサービスを提供しながらもバッテリーに給電することができる。これにより、バッテリー容量の問題を緩和することが可能となり、ドローンの長時間飛行を実現できる可能性がある。しかし、荷物配送を目的とした研究が多く行われている中で荷重による飛行速度の変化や消費エネルギーの変化を考慮したエネルギーモデルを構築した研究は少ない。また、ドローンのエネルギーモデルを行っている研究の多くは屋外で実験が行われている。屋外で実験を行った場合、風などの外的要因により正確なドローンのエネルギーモデルを構築することが困難になる。屋内で実験を行う場合飛行距離が短くなるため、より正確に飛行距離や速度を算出する必要がある。以上のことから、本論文では屋内での正確な消費エネルギーを測定する手法を提案し、荷重による消費エネルギーなどの変化を考慮したエネルギーモデルを開発する。

### 3. 消費エネルギー測定手法

ドローンの消費エネルギーを測定する方法はいくつかある。その中でも、本論文では計測した消費電力と飛行時間から消費エネルギーを算出する手法を採用する。本論文では、配送用ドローンにおける消費エネルギーを考えているため、ドローンに搭載する荷物の重さを変化させ測定を行

う。ドローンの飛行速度を測定する手法として、文献 [21] で紹介されている方法を用いる。文献 [21] では、ドローンの飛行速度のみを測定しており消費電力は測定されていない。本論文では、文献 [3] に基づき消費エネルギーを測定する。

#### 3.1 AR.Drone 2.0

本論文で使用するドローンは AR.Drone 2.0 である。AR.Drone 2.0 を図 1 に示す。AR.Drone 2.0 は、前方先端部に 30fps の 720p HD カメラも搭載しており、長さ 45cm、幅 29cm、ハルを外した状態での重量は 366g です。ドローンはハルが着脱可能で外した状態での重量は 366g である。ドローンに搭載されているカメラは飛行中の動画・画像を撮影することが可能である。機体には、3セル 1500mAh のリチウムポリマーバッテリーが搭載されている。



図 1: AR.Drone 2.0

AR.Drone 2.0 には、3軸ジャイロスコップと 3軸加速度センサーが搭載されており、機体の速度や高度を計算することができる。また、ドローンの底面には超音波センサーが搭載されており離着陸時の高度を自動的に調整でき安定したホバリングを実現している。AR.Drone 2.0 は、OpenCV をベースとしたソフトウェアライブラリ「CV Drone」を用いて制御することができる。CV Drone は、ドローンのピッチ角を指定できピッチ角によって飛行速度が変化する。本論文ではこれを使用しピッチ角と荷重を変化させた際の消費エネルギーの測定を行う。本論文では、ピッチ角を 0.05rad, 0.10rad, 0.15rad に設定した際の飛行データを取得する。

#### 3.2 電力ロガー

ドローンの消費エネルギーの測定は、文献 [3] と同様に株式会社ミクサムが開発した図 2 の電力ロガーを使用する。電力ロガーを使用することで、ドローンが飛行中にどのように電力を消費しているかを測定出来る。電力ロガーは電圧と電流を任意時間で測定し、電力を算出している。

図 3 は、ドローンに電力ロガーを取り付けた際の画像で



図 2: 電力ロガー

ある。図 3 の赤枠で囲った部分が電力ロガーである。ドローンとバッテリーの間に電力ロガーを装着することで、電力を計測している。電力ロガーを装着する際は、ドローン全体の重心がずれないように設置する必要がある。電力ロガーはスイッチが付いており、スイッチを ON にすることで消費電力を測定することが出来る。スイッチが入っている間は、バッテリーからの放電電流と端子間電圧を記録することが出来る。測定した電流値と電圧値の積で消費電力を算出し、消費電力を積分することで消費エネルギーを算出する。



図 3: 電力ロガー搭載時のドローン

ドローンが飛行する直前に電力ロガーのスイッチを入れ、電圧と電流を取得する。次に、ドローンが飛行した直後に電力ロガーのスイッチを切り、ロガーに記録されたデータを PC に転送する。電力ロガーから PC へのデータ転送には、専用のアプリケーションを使用する。サンプリング間隔はアプリケーションソフトで設定出来る。本論文では、サンプリング間隔を 0.1 秒に設定している。電力ロガーは、1mA 単位で電流値を測定可能である。また、電圧は 0.01V 単位で測定可能である。

### 3.3 電力測定手法

ドローンの飛行速度の測定には、文献 [21] の手法を拡張し用いている。文献 [21] で用いている測定手法の概要を図 4 に示す。上述の研究では、ドローンの正確な飛行速度を測定するために 4 台のカメラを使用している。ドローンを測定する区間は 5m である。ドローンは一般的に直線的に飛行することが困難である。そこで、文献 [21] では 4 台のカメラを用いてドローンが飛行する際の時間と距離を正確に導き出している。飛行時間と距離から、ドローンの飛行速度を導き出している。文献 [21] では、ドローンの飛行速度のみを計測することを目的としているが、本論文では、

ドローンの消費エネルギーも計測する必要がある。

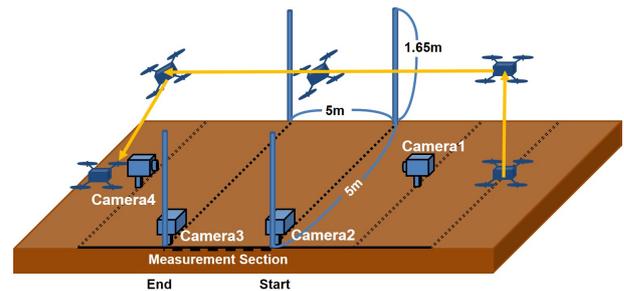
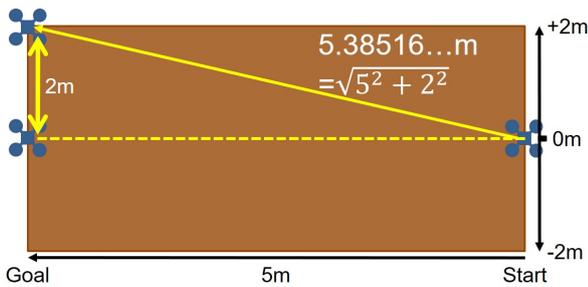


図 4: 測定手法の概要図

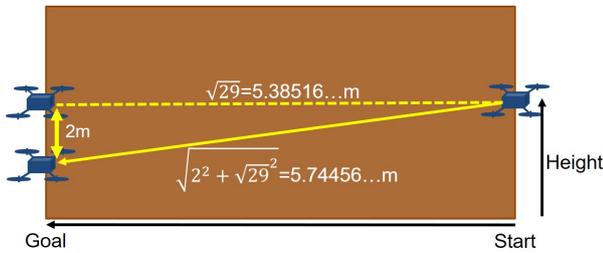
従来の測定手法では、光を利用して各カメラ画像を同期させていました。しかし、本論文では電力ロガーと各カメラ画像を同期させる必要がある。そのため、4 台のカメラのうち 1 台と電力ロガーを同期させることで全てのカメラと電力ロガーを同期させている。各カメラの同期には従来の手法で利用した光を利用する。各カメラを始動した後、カメラと電力ロガーの同期には、画像処理を用いる。電力ロガーのスイッチを ON にした後、1 台のカメラ前でドローンに離陸動作をさせる。その際の、電力量の上昇とカメラ内のドローンの動き出しを用いて同期を行う。カメラの前でドローンを一時的に稼働させると、消費エネルギーが増加する。また、カメラの前で離陸動作を行うことで、差分画像からドローンが動き出した時間を算出する。これらを組み合わせることで、電力ロガーと各カメラの画像を同期させる。

飛行距離の算出は文献 [21] の手法を用いる。4 台のカメラは図 4 のように配置する。カメラ 1 と 4 はドローンのスタート地点とゴール地点での位置を取得する。カメラ 2 と 3 はドローンのスタート地点とゴール地点を通過した時間を取得する。スタート地点とゴール地点での位置を取得することで、ドローンが測定区間内をどのような方向に飛行しているかを測定する。具体的な計算手法について説明を行う。図 5 に飛行距離の計算手法を示す。図 5(a) は測定区間を上から見た際のドローンの飛行距離を示している。ドローンの飛行した軌跡を黄色の実線で示している。ドローンがスタート地点の真ん中から飛行を開始しゴール地点で中心から 2m 離れた地点を通過したと仮定する。その際のドローンの飛行距離は三平方の定理から約 5.39m となる。次に、図 5(b) は測定区間を横から見た際のドローンの飛行距離を示している。ドローンの飛行した軌跡を黄色の実線で示している。横から見た際も同様にスタート地点とゴール地点で 2m の誤差が起きたと仮定する。その際のドローンの飛行距離は先程の飛行距離を利用すると、約 5.74m となる。

本論文では、ピッチ角を 0.05, 0.10, 0.15[rad], 荷重が



(a) 上から見た場合



(b) 横から見た場合

図 5: 飛行距離計算手法

0, 24, 48, 72, 96, 120, 144, 168[g] それぞれの組み合わせで、ドローンの消費エネルギーを求めた。各パラメータで 10 回測定を行い、消費エネルギーの平均値を求める。

#### 4. 測定結果

各パラメータでの測定手法は、3 章で説明した手法を用いる。1m あたりの消費エネルギーと飛行速度の関係を図 6 に示す。図 6 に示すように、飛行速度が速くなるにつれて、消費エネルギーが減少している。これは、飛行速度が速くなるに連れて 1m 飛行する際の時間が短くなり、1m あたりの消費エネルギーが小さくなるためである。

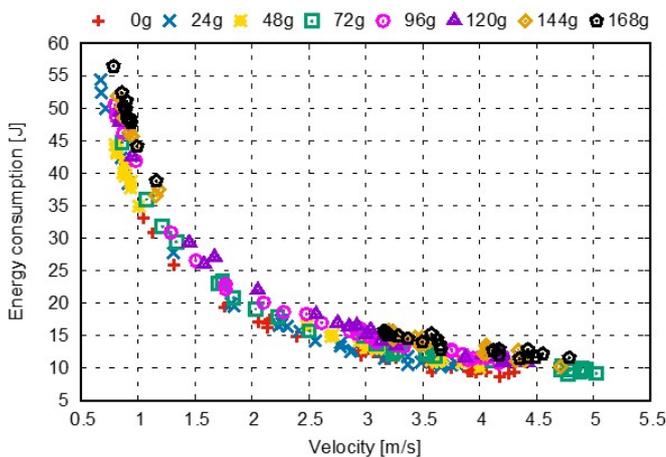


図 6: 飛行速度と消費エネルギーの関係

3 章で測定した荷重と、ドローンが 1m あたりに消費するエネルギーの関係を図 7 に示す。図 7 からは、荷重が増加したとしても消費エネルギーがあまり変化しないことが

わかる。また、0.05rad で消費エネルギーに大きく変動する。これは、0.05rad ではドローンの高さを維持するための上向きの力が大きくなり前進する力が少なくなり同じ荷重であっても、飛行時間に差が生まれてしまい、ばらつきが大きくなったと考えられる。ピッチ角が小さくなるに連れて消費エネルギーが上昇していることがわかる。これは、1m あたりの消費エネルギーを算出しているため、飛行時間が長くなるにつれて消費エネルギーが増加する。そのため、消費エネルギーが上昇していると考えられる。

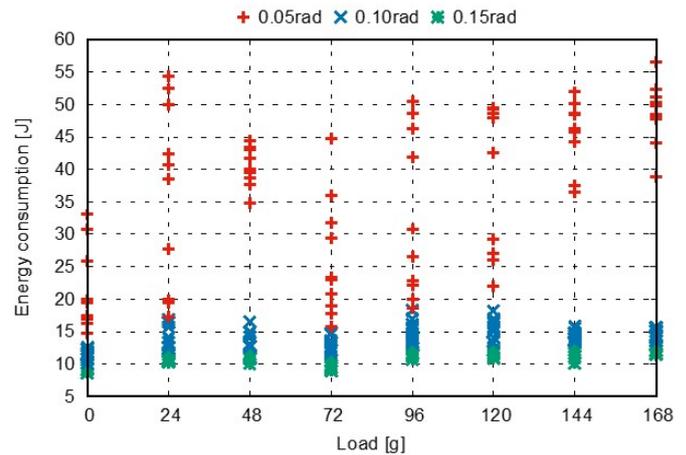


図 7: 荷重と消費エネルギーの関係

#### 5. 消費エネルギーモデリング

本章では、4 章の測定結果を用いて配送用ドローンのエネルギーモデルを構築する。エネルギーモデルの構築には重回帰分析を用いる。重回帰分析には Microsoft Excel を使用する。まず、従来手法である文献 [3] を用いて重回帰分析を行う。従来手法では、飛行速度  $v$  [m/s], 消費エネルギー  $e$  [J], 荷重  $w$  [g] を用いて重回帰分析を行っている。従来手法で重回帰分析を行った結果は、式 (1) である。

$$e = 3.288v^2 + 0.0001w^2 - 0.017vw - 25.643v + 0.066w + 57.842 \quad (1)$$

また、相関係数は 0.986 となり、フィッティング誤差は 8.41% である。式 (1) の 3 次元グラフを図 8 に示す。

図 8 より、飛行速度が 4m/s 付近までは消費エネルギーが減少していることがわかる。しかし、飛行速度が 4.5m/s 以上になると、消費エネルギー急激に増加する。本来の消費エネルギーモデルは単調減少するはずであるが増加している。飛行速度が増加すると 1m あたりの飛行時間が短くなり、1m あたりの消費エネルギーは減少する。急激に増加している原因として、重回帰分析を行った際のパラメータにあると考えられる。具体的には消費エネルギーは 1m あたりの消費エネルギーであるのに対し、飛行速度は 1 秒あたりの飛行距離である。消費エネルギーは分母が m に

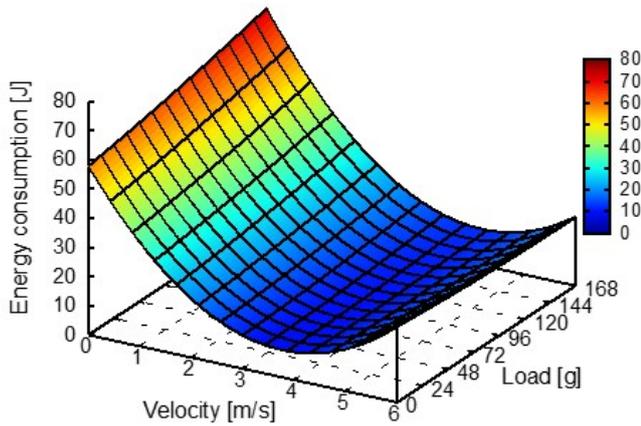


図 8: 先行手法のエネルギーモデル [3]

対して、飛行速度は分子に  $m$  が来ている。以上のことから、一つのグラフにおいて次元が一致していないことがわかる。次元が一致していないものを無理に二次関数で重回帰分析を行ったため、フィッティング誤差が大きくなり不自然な増加が発生したと考えられる。

そこで、飛行速度の逆数で重回帰分析を再度行う。飛行速度  $v$  [m/s] で重回帰分析を行ったところ、飛行速度の逆数で重回帰分析を行う。そこで、飛行速度  $v^{-1}$ 、消費エネルギー  $e$  [J]、荷重  $w$  [g] の逆数について重回帰分析を行う。上記の重回帰分析の結果は、式 (2) である。

$$e = 1.467v^{-2} + 0.000004w^2 - 0.060v^{-1}w - 30.234v^{-1} + 0.007w + 1.901 \quad (2)$$

その結果、相関係数は 0.999、フィッティング誤差は 2.87% となる。式 (2) の 3 次元グラフを図 9 に示す。

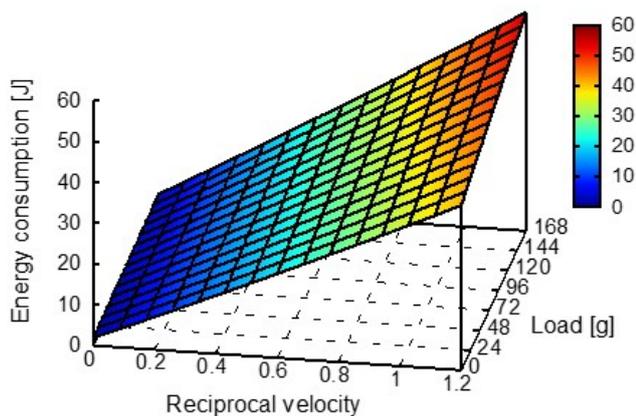


図 9: 提案手法のエネルギーモデル

図 9 から、主に飛行速度の逆数が大きくなるにつれて消費エネルギーが増加することがわかる。飛行速度の逆数が増加しているときは、飛行速度が減少しているときである。したがって、飛行速度が低下すると、消費エネルギーが増加していることがわかる。これは、飛行速度が低下すると

飛行時間が長くなり、1m あたりの消費エネルギーが増加するためである。また、荷重が増加した場合消費エネルギーが増加していることがわかる。これは、荷重を増加することでドローンを支える力が増加し、前進する力が減少する。それにより、飛行速度が低下し消費エネルギーが増加したと考えられる。従来手法でのフィッティング誤差は 8.41% であったのに対し、速度の逆数を用いた場合のフィッティング誤差は 2.87% であった。これらの結果から、従来手法に比べフィッティング誤差が約 5.5% 改善されたことがわかる。したがって、速度の逆数を用いることは、従来手法よりも有用であることがわかる。

## 6. おわりに

本論文では、既存の測定手法を拡張し、荷重やピッチ角が変化した際のドローンの消費エネルギーを測定した。測定結果から、飛行速度が上がると消費エネルギーが減少することがわかった。また、負荷が増加すると消費エネルギーが増加することがわかった。次に、測定した消費エネルギーと飛行速度、荷重の関係からドローンのエネルギーモデルを構築した。測定結果に対して重回帰分析を行い、3D グラフを作成した。このモデルは、従来手法に比べてフィッティング誤差が 5.5% 改善された。

今後の課題としては、本論文で構築した各モデルを評価することである。また、本論文で構築したエネルギーモデルと空気力学の観点から構築したエネルギーモデルを比較する必要がある。実際の環境で荷物を配送する際の消費エネルギーを測定し、エネルギーモデルを構築する必要がある。

## 参考文献

- [1] Amazon Prime Air, <https://www.amazon.com/b?node=8037720011> (Last accessed on October 22, 2021).
- [2] Project Wing, <https://x.company/projects/wing/> (Last accessed on October 22, 2021).
- [3] S. Negoro, D. Sukezane, A. Shibata, K. Maekawa, I. Taniguchi, and H. Tomiyama, "Measurement and Modeling of Quadcopter Energy with ROS," In *Proc. of Workshop on Synthesis and System Integration of Mixed Information Technologies (SASIMI)*, pp. 169-173, 2018.
- [4] C. D. Franco and G. Buttazzo, "Energy-aware Coverage Path Planning of UAVs," In *Proc. of IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*, pp. 111-117, 2015.
- [5] K. Dorling, J. Heinrichs, G. G. Messier and S. Magierowski, "Vehicle Routing Problems for Drone Delivery," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 47, no. 1, pp. 70-85, 2016.
- [6] K. Goss, R. Musmeci and S. Silvestri, "Realistic Models for Characterizing the Performance of Unmanned Aerial Vehicles," In *Proc. of International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*, pp. 1-9, 2017.
- [7] Z. Liu, R. Sengupta and A. Kurzhanskiy, "A Power

- sumption Model for Multi-rotor Small Unmanned Aircraft Systems,” In *Proc. of International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 1175-1180, 2017.
- [8] W. Johnson, *Helicopter Theory*, Courier Corporation, 2012.
- [9] J. G. Leishman, *Principles of Helicopter Aerodynamics with CD extra*, Cambridge University Press, 2006.
- [10] F. Morbidi, R. Cano and D. Lara, “Minimum-energy Path Generation for a Quadrotor UAV,” In *Proc. of International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1492-1498, 2016.
- [11] P. Tokekar, N. Karnad and V. Isler, “Energy-Optimal Trajectory Planning for Car-Like Robots,” *Autonomous Robots*, pp. 279-300, 2014.
- [12] D. T. Kien, P. Morin, “Modeling and Energy Evaluation of Small Convertible UAVs,” *Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems*, 2013.
- [13] Y. Chen, D. Baek, A. Bocca, A. Macii, E. Macii and M. Poncino, “A Case for a Battery-Aware Model of Drone Energy Consumption,” In *Proc. of International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, pp. 1-4, 2018.
- [14] M. Chen and G. A. Rincon-Mora, “Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 2, pp. 504-511, 2006.
- [15] D. Aleksandrov and I. Penkov, “Energy Consumption of Mini UAV Helicopters with Different Number of Rotors,” *Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering*, pp. 259-262, 2012.
- [16] A. Abdilla, A. Richards and S. Burrow, “Power and Endurance Modeling of Battery-Powered Rotorcraft,” In *Proc. of International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 675-680, 2015.
- [17] S. Park, L. Zhang and S. Chakraborty, “Design Space Exploration of Drone Infrastructure for Large-scale Delivery Services,” In *Proc. of International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD)*, 2016.
- [18] K. Takegami, S. Negoro, Y. Funabashi, I. Taniguchi and H. Tomiyama, “Low-Energy Routing for Deadline-constrained Delivery Drones under Windy Conditions,” *International Workshop on Networking, Computing, Systems, and Software (NCSS) in conjunction with International Symposium on Computing and Networking (CANDAR)*, 2018.
- [19] Y. Funabashi, A. Shibata, S. Negoro, I. Taniguchi and H. Tomiyama, “A Dynamic Programming Algorithm for Energy-aware Routing of Delivery Drones,” In *Proc. of International Conference on Artificial Intelligence and Data Engineering (AIDE)*, 2019.
- [20] J. Kim, J. Lee, J. P. Jeong, H. Kim, J. S. Park and T. Kim, “SAN: Self-Adaptive Navigation for Drone Battery Charging in Wireless Drone Networks,” In *Proc. of International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)*, pp.248-251, 2016.
- [21] S. Ito, S. Negoro, X. Kong, I. Taniguchi and H. Tomiyama, “A Methodology for Measuring Flight Speed of Drones in Indoor Environments,” *International Conference on Identification, Information & Knowledge in the Internet of Things (IIKI)*, 2020.