

# 荷重により速度変化する荷物配送ドローンの経路計画に対する近似解法

西羅真央<sup>1</sup> 伊藤哲<sup>1</sup> 西川広記<sup>1,2</sup> 孔祥博<sup>1</sup> 富山宏之<sup>1</sup>

**概要:** 本論文は、荷物配送ドローンの経路最適化問題を扱う。既存研究の多くは、荷重に関わらず、ドローンの飛行速度が一定であることを仮定している。飛行速度が荷重の関数であることを想定した研究も存在するが、その関数は複雑であり、汎用的な数値最適化ソルバを用いて経路最適化問題を解くことは困難である。本研究は飛行速度の関数を近似することにより、経路最適化問題を整数線形計画問題に帰着させる。これにより、汎用的な数値最適化ソルバを用いた求解が可能となる。

**キーワード:** 荷物配送ドローン, 配送計画問題, 整数線形計画法, 線形近似

## 1. はじめに

本論文では、荷重による飛行速度の変化を考慮したドローン配送計画 (FSVRP) [1]に対する整数線形計画法を用いた手法を提案する。この問題は、配送拠点を出発して全ての荷物を顧客に配送し、配送拠点に戻る最適な経路を求める。ここでは、荷重による飛行速度の変化を考慮して、飛行時間の最短経路を求める問題に注目する。

図1に問題の例を示す。"0"と書かれたノードが配送拠点を、他の3つのノードは顧客を示す。箱の中の数字は荷物の重量を示し、各ノードを結ぶエッジの数字は2地点間の距離を示す。巡回セールスマン問題(TSP)の最適な経路を図2(a)に示す。総飛行距離は146(=43+52+24+27)、総飛行時間は102(=36+36+15+15)となる。図2(b)にFSVRPの最適な経路を示す。この経路の総飛行距離は146(=27+24+52+43)であり、TSPの最適な経路と同じである。しかし、総飛行時間は93(=21+15+33+24)であり、TSPの最適な経路の飛行時間よりも短い。図2(a)では、まず顧客2を訪問し、荷重43の最も軽い荷物を下ろす。その後、ドローンは荷重84の荷物を持って飛行を続ける。図2(b)では、まず顧客1を訪問し、重量の最も重い荷物50を下ろす。これにより以降の配送中はより速く飛行することができる。この例は、TSPの最適な経路がFSVRPの最適な経路と同じとは限らないことを示す。

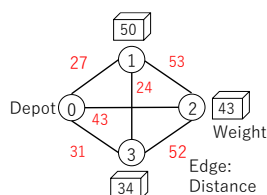


図 1. 問題の例

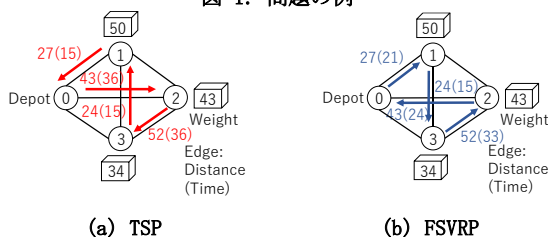


図 2. 最適な経路

## 2. 荷重によって飛行速度が変化する配送計画

はじめに、配送する荷物が $N$ 個与えられている。一般性を損なわないように、2個以上の荷物は同じ顧客には配送されない。そのため、顧客の数も $N$ としている。荷物には1から $N$ までの番号が付けられ、荷物 $i$  ( $1 \leq i \leq N$ )が配送されるべき顧客を、顧客 $i$ またはポイント $i$ と呼ぶ。本論文では、ドローンが全ての荷物を一度の飛行で配送できることを前提としている。ドローンは配送拠点を出発する際、全ての荷物を積み出発する。荷物の総重量がドローンの最大積載量を超える場合、配送計画の前に荷物をグループに分割する必要があるが、分割方法に関しては本論文では対象としていない。

$d(i_1, i_2)$ をポイント $i_1$ と $i_2$ の間の距離とする。また、 $x(j)$ は配送計画の決定変数であり、 $j$ 番目の訪問客とする。経路の始点と終点は配送拠点であるため、次のように定義する。

$$x(0) = x(N+1) = 0 \quad (1)$$

また、全ての顧客が必ず一度訪問されるので、次のように定義される。

$$1 \leq x(j) \leq N \quad (1 \leq j \leq N) \quad (2)$$

$$x(j_1) \neq x(j_2) \quad (1 \leq j_1, j_2 \leq N, j_1 \neq j_2) \quad (3)$$

$w(i)$ を荷物 $i$ の荷重とし、 $W(j)$ はドローンが $j$ 番目の訪問先を出発するときの総重量とする。ドローンが配送を開始すると、すべての荷物が積まれるため、次式が成り立つ。

$$W(0) = \sum_{i=1}^N w(i) \quad (4)$$

ドローンが $j$ 番目 ( $1 \leq j \leq N$ )のポイント $x(j)$ に訪問した時、荷重 $w(x(j))$ の荷物を下ろす。よって、ポイント $x(j)$ を訪問し終えた時の総重量は次のように定義される。

$$W(j) = W(j-1) - w(x(j)) \quad (5)$$

ポイント $i_1, i_2$ の間の飛行時間を $t(i_1, i_2)$ とする。ドローンが $i_1$ から $i_2$ に飛行する時間は、 $i_1, i_2$ 間の距離を、荷重を変数とした関数である飛行速度 $v$ で割った値となる。 $j$ 番目と $(j+1)$ 番目間の飛行時間は次のように定義される。

$$t(x(j), x(j+1)) = d(x(j), x(j+1))/v(W(j)) \quad (6)$$

FSVRPは、総飛行時間が最も短い経路を求める。したがって、目的関数は次のように定義される。

$$\text{Min } T = \sum_{j=0}^N d(x(j), x(j+1))/v(W(j)) \quad (7)$$

<sup>1</sup> 立命館大学  
<sup>2</sup> 日本学術振興会

### 3. 整数線形計画法を用いた FSVRP

本章では、汎用の ILP ソルバを用いて、第 2 章で述べた問題を解く方法について述べる。ILP ソルバを用いて問題を解くために、目的関数を線形化して近似した関数を示す。

線形化されていない飛行速度は次の式で成り立つ[1]。

$W_{drone}$  はドローン本体の重量とする。

$$v(w) = k \cdot P \cdot \sin(\arccos((W_{drone} + w) \cdot g / P)) \quad (8)$$

図 3 の曲線は式(8)の逆数を表している。この図の縦軸は飛行速度の逆数である。また、横軸は荷物の重量を表しており、最大積載量は AR Drone 2.0[2]を参考にしている。荷物の重量  $w$  は、 $0 \leq w \leq 200$  の範囲内とする。図中の直線については、最小二乗法を採用して線形近似を行っている。近似による式(9)からの誤差を示す R 二乗値は 0.9019 であった。

$$1/v(w) \approx 0.0009w + 0.1736 \quad (9)$$

最後に、第 2 章の式(7)の目的関数を線形近似に変換して ILP ソルバで解くように再定義する。

$$\text{Min } T = \sum_{j=0}^N d(x(j), x(j+1)) \times (0.0009w + 0.1736) \quad (10)$$

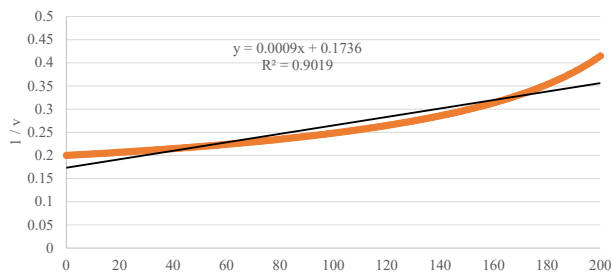


図 3. 最小二乗法による線形近似

### 4. 評価実験

本章では実験に用いた 5 つの探索アルゴリズムについて述べる。各手法の説明は以下の通りである。

- DP-FSVRP：動的計画法で FSVRP を解く。
- DP-TSP：動的計画法で TSP を解く。
- BF-FSVRP：全探索アルゴリズムで FSVRP を解く。
- CPLEX-single：目的関数の線形近似に基づき、単一スレッドで CPLEX を用いて FSVRP を解く。
- CPLEX-multi：同じく線形近似に基づき、複数のスレッドで CPLEX を用いて FSVRP を解く。

顧客数は 5 から 20 で、それぞれ 20 の実験データをランダムに生成した。求解時間は、実時間で 3600 秒に制限されている。実験には、AMD Ryzen 7 PRO 4750G (8 コア, 16 スレッド) と 64GB のメインメモリを使用した。

図 4 は、DP-FSVRP で正規化した各手法の総飛行時間を示している。実験結果は、CPLEX が DP-FSVRP とほぼ同ルートを得ることを示す。実際には、両者の間には平均で 0.2829% の差がある。

図 5 は、各手法の求解時間を示す。BF-FSVRP は、顧客数 12 を超えると 3600 秒以内で最適解が得られない。顧客数が 5 から 12 まで、CPLEX はオーバーヘッドが発生するため、DP-FSVRP がより早く最適解を見つける。顧客数 14 以上では CPLEX-single と CPLEX-multi の求解時間が DP よりも短くなる。また、CPLEX-multi はマルチスレッドで実行されるため、CPLEX-single よりも短い求解時間を実現できる。以上の結果から、我々の提案する手法は、これまでの手法よりも配送計画問題を高速に解くことが可能である。

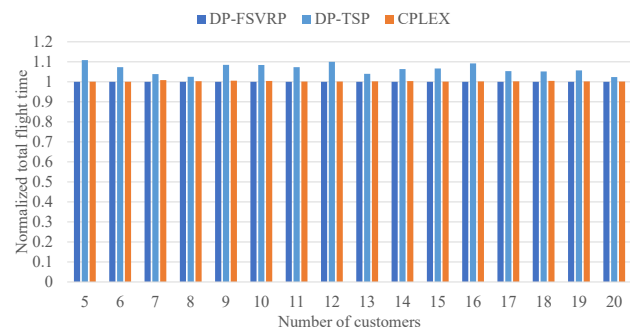


図 4. 総飛行時間

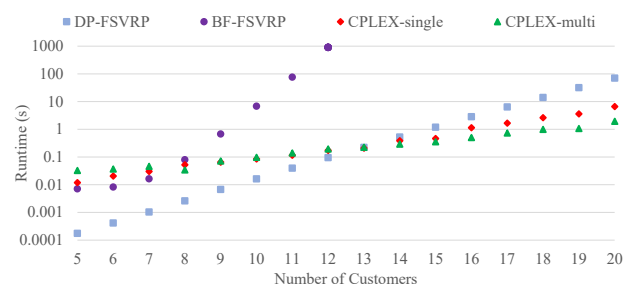


図 5. 求解時間

### 5. おわりに

本論文では、荷重による飛行速度の変化を考慮したドローン配送計画に対する整数線形計画法を用いた手法を提案した。実験の結果、提案手法はこれまでの手法よりも早く最適解を見つけることができる。今後は、風が吹いている状況を考慮する予定である。

**謝辞** 本研究の一部は、科研費 20H04160, 20H00590, 20J21208 の支援を受けている。

### 参考文献

- [1] Y. Funabashi, I. Taniguchi, H. Tomiyama, “Work-in-progress: Routing of delivery drones with load-dependent flight speed,” *IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS)*, 2019.
- [2] T. Krajník, V. Vonásek, D. Fišer, J. Faigl, “AR-Drone as a platform for robotic research and education,” *International Conference on Research and Education in Robotics*, 2011.