

## トラックとドローンの併用による配達効率化分析

05001163 筑波大学 \*劉 楊成漢 LIU Yangchenghan  
01205430 筑波大学 鈴木 勉 SUZUKI Tsutomu

## 1. はじめに

近年、通販の発展につれて、宅配便の需要が急速に増加している。国土交通省の調査によると、2018年の宅配便取扱個数は42億個を突破した[1]。しかし、このような膨大な需要量に対して、宅配事業者は人手不足や業績悪化で微減傾向にある。そこで、近年発展している無人機輸送が焦点になっている。ドローンは飛行が速く、また道路網にとらわれることなくショートカットが可能となるため、エネルギーの利用効率が高いと考えられ、多くの物流関連企業等が無人機の配送方式を競って開発している。例えば、UPSはドローン発射台をトラックの上に設置し、ドライバーはドローンに荷物を固定し、自動的に離陸して荷物を配送するという新方式を構想して実験している。本研究は、様々な考えられるドローンの配達方式のうち、トラックとドローンが連携する配達パターンによって、配達時間の短縮がどの程度可能なことを分析することを目的とする。

## 2. 問題設定

仮想区域は $[0, 100]^2$  (1単位=100m) の正方形領域の範囲内に、中心(50,50)におかれたデポからランダムに配置された需要点まで配達することを考える。ドローンの速度は60km/h、トラックの速度は31.34(=40/1.276)km/hとし(1.276は道路距離/直線距離の期待値[6])、距離はユークリッド距離で計算する。ドローンの最大飛行時間制限 $e$ は120~600秒の範囲内で設定し、各点での停留時間は0秒とする。

## 3. HUBTSP モデル

トラックがデポを出発して、いくつかのハブを巡回移動し、トラックがハブに停止している間に、そのトラックからいくつかのドローンを発射して配達を行うことを考える。ドローンは直行往復移動で配達するので、巡回直行のTSP問題になる。この問題に対しては、 $k$ -means法で配達先をクラスタ化し、クラスタの中心をハブとして、各ハブのクラスタの中の箇所全てに配達終了後、トラックに帰還して次のハブに行くという案が提案されている(Chang & Lee, 2018 [5])。しかし、 $k$ -means法は連続的な方法で確定したクラスタの中心へは、山、川、田畑が多い過疎地域ではトラックが行くことが現実的ではない場合が考えられる。そこで、ハブを需要点の一

つに設定する方式を以下の離散的最適化問題 HUBTSPとして考える。パラメータと定式化は以下の通りである。

$T$	総配達時間
$C$	顧客の集合
$c$	顧客の数
$N_0$	$\{0\} \cup C$
$N_+$	$C \cup \{c+1\}$
$N$	$\{0\} \cup C \cup \{c+1\}$
$e$	ドローンの最大飛行時間制限
$v$	ドローンの台数
$t_j$	$j$ 点におけるトラックの待機時間

## 【HUBTSP】

$$\text{Min } T = \sum_{\substack{i \in N_0, \\ i \neq j}} \sum_{j \in N_+} x_{ij} \tau_{ij} + \sum_{j \in C} t_j \quad (1)$$

$$\text{s. t. } t_j \geq 2y_{ij} \cdot \tau'_{ij} \quad \forall i \in C, j \in C, i \neq j \quad (2)$$

$$2\tau'_{ij} \leq e \quad \forall i \in C, j \in C, i \neq j \quad (3)$$

$$\sum_{\substack{i \in N_0, \\ i \neq j}} x_{ij} + \sum_{i \in N_0} y_{ij} = 1 \quad \forall j \in N_+ \quad (4)$$

$$\sum_{\substack{j \in N_+, \\ j \neq k}} x_{0j} = 1 \quad (5)$$

$$\sum_{\substack{i \in N_0, \\ c \neq j}} x_{ij} = \sum_{\substack{k \in N_+, \\ j \neq k}} x_{jk} \quad \forall j \in C \quad (6)$$

$$\sum_{\substack{j \in C, \\ i \neq j}} y_{ij} \leq M \sum_{\substack{j \in C, \\ i \neq j}} x_{ij} \quad \forall i \in C \quad (7)$$

$$\sum_{\substack{i \in C, \\ i \neq j}} y_{ij} \leq v \quad (8)$$

$$u_i - u_j + 1 \leq (c+2)(1-x_{ij}) \quad (9)$$

$$\forall i \in \hat{C}, j \in N_+, i \neq j$$

$$1 \leq u_i \leq c+2 \quad \forall i \in N_+ \quad (10)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N_0, j \in N_+, i \neq j \quad (11)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in C, j \in C \quad (12)$$

HUBTSP のヒューリスティックアルゴリズムも提案する。まず、 $e$ 以内で配達できる点数が最も多くなる点をハブとして選出し、貪欲法で PMS(parallel machine scheduling)のハブの時間を計算する。カバーできない点について、この工程を  $e$  以内で配達できる点数が2点以下になるまで繰り返し、それらのハブの時間と TSP で計算したトラックで配達点の時間の和をもって、総配達

時間  $T$  とする。

#### 4. MFSTSP モデル

FSTSP はドローン 1 台をトラックに搭載し、ある地点でドローンを発射し、その後トラックとドローンを同時に走行（飛行）させ、適切な配達先で回収するモデルである。ヒューリスティックアルゴリズムが Murray & Chu[4]により提案された。ここでは複数台の FSTSP のアルゴリズム（以降 MFSTSP と呼ぶ）を提案する（図 1）。

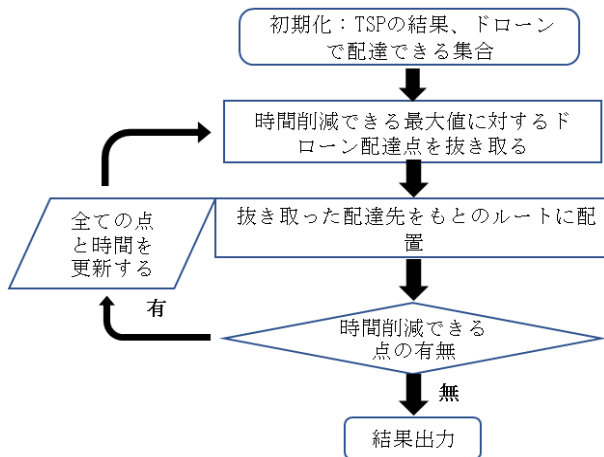


図 1 MFSTSP アルゴリズム

#### 5. 比較

中心に置かれたデポと、そのデポから 30 単位の位置に正六角形の各頂点の周りの  $r$  単位内にランダムな  $v(=5)$ 個の点（頂点を含む）を配置した需要を生成し、合計 7つのクラスタからなる 35 点の需要分布を設定する。

このときの HUBTSP と MFSTSP による配達経路を図 2 に示す。ドローン 5 台の場合、 $r = 10$  ( $e=120$  以上では  $r=10$  の範囲内の点が全てドローンで配達できるので  $e=120s$  とする) では HUBTSP の配達時間がやや短く、 $r = 30$  (同様に  $e=360s$  とする) では MFSTSP の配達時間が短い (A1, A2 および B1, B2)。 $e$  が  $r$  に比して上記より短い場合は MFSTSP が有利である (C1, C2)。ドローン 3 台の場合も同様の結果であるが、ドローン 1 台の場合は  $e$  の値に係わらず MFSTSP の方が優位になる。

中心となるデポの周り  $r$  の範囲内にランダムな 35 点を設定した例では、ドローン 1 台の場合、MFSTSP が優位であり (D3)、ドローン 3 台または 5 台の場合、 $e$  が 600s 未満の場合、HUBTSP が優れているが、7つのクラスタの場合と同様に、 $e$  が 600s 以上 (D1, D2) になると HUBTSP が有利となる (全ての配達先へデポから届けるという単純な PMS 問題になるため)。

なお、本研究は、JSPS 科研費 19H02374 による成果の

一部である。

#### 参考文献

- [1] 国土交通省 平成 29 年度宅配便取扱実績について. [http://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha04\\_hh\\_000157.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha04_hh_000157.html)
- [2] Dantzig, George, Ray Fulkerson, and Selmer Johnson "Solution of a large-scale traveling-salesman problem." *Journal of the Operations Research Society of America* 2(4) (1954): 393-410.
- [3] Dantzig, George B., and John H. Ramser "The truck dispatching problem." *Management Science* 6(1) (1959): 80-91.
- [4] Murray, Chase C., and Amanda G. Chu "The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 54 (2015): 86-109.
- [5] Chang, Yong Sik, and Hyun Jung Lee "Optimal delivery routing with wider drone-delivery areas along a shorter truck-route." *Expert Systems with Applications* 104 (2018): 307-317
- [6] 腰塚武志, 小林純一. 道路距離と直線距離. 日本都市計画学会学術研究論文集 18 (1983): 43-48.

<b>A1</b> cluster = 7 $r = 10$ $e = 120s, v = 5$ HUBTSP $T = 2,785s$	<b>B1</b> cluster = 7 $r = 30$ $e = 360s, v = 5$ HUBTSP $T = 3,279s$	<b>C1</b> cluster = 7 $r = 30$ $e = 240s, v = 5$ HUBTSP $T = 3,810s$
<b>A2</b> cluster = 7 $r = 10$ $e = 120s, v = 5$ MFSTSP $T = 3,031s$	<b>B2</b> cluster = 7 $r = 30$ $e = 360s, v = 5$ MFSTSP $T = 3,157s$	<b>C2</b> cluster = 7 $r = 30$ $e = 240s, v = 5$ MFSTSP $T = 3,319s$
<b>D1</b> cluster = 1 $r = 50$ $e = 600s, v = 5$ HUBTSP $T = 1,508s$	<b>D2</b> cluster = 1 $r = 50$ $e = 600s, v = 5$ MFSTSP $T = 3,762s$	<b>D3</b> cluster = 1 $r = 50$ $e = 600s, v = 1$ MFSTSP $T = 4,015s$

図 2 HUBTSP と MFSTSP による配達経路の比較