

トラックとドローンを併用した配達効率化に関するモデル分析

劉 楊成漢・鈴木 勉

Model Analysis on Delivery Efficiency Improvement Combining Truck and Drone

Yangchenghan LIU and Tsutomu SUZUKI

Abstract: In the case of trucks equipped with drones to deliver couriers, the drones need to be launched at an appropriate location on the truck's route and recycled at other appropriate locations on the route, or both at the same location launching and recycling. Since the size of the drone is small relative to the truck, it is possible to carry multiple drones on the truck. This paper defines an integer linear programming model and its heuristic algorithm for a distribution mode in which a truck is equipped with multiple drones and parks waiting (HUBTSP), and proposes another heuristic algorithm that truck carries multiple drones in which parallel delivery mode (MFSTSP) is designed to calculate the total delivery time quickly and accurately. For different needs distribution, we find the most suitable solution under different conditions.

Keywords: ドローン配達(drone delivery), 配達経路問題(route problem of delivery), ヒューリスティックアルゴリズム(heuristic algorithm)

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(国土交通省)。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(ドローン)が注目されている。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

劉楊成漢：〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1
総合研究棟 B722 号室
筑波大学大学院システム情報工学研究科
Tel：029-853-5600 (8203)
E-mail：s1820537@s.tsukuba.ac.jp

ンによって、配達時間の短縮がどの程度可能なのか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 60 km/h, トラックの速度は 31.3 km/h (=40/1.276)とし (1.276 は腰塚・小林(1983)による道路距離/直線距離の期待値), 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は 120~900 秒の範囲内で設定し、需要点での配達のための停留時間は 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 (1 飛行について 1 個だけ積載可能) を同時に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方案が提案されている(Chang and Lee, 2018). しかし、連続的な方法で確定したクラスタの中心へは、山・川・田畑等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
τ_{ij}	トラックによる i から j までの走行時間
τ'_{ij}	ドローンによる i から j までの飛行時間
x_{ij}	トラック経路の 0-1 変数
y_{ij}	ドローン経路の 0-1 変数

[HUBTSP]

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

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

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

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

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

$$\sum_{i \in N_0} x_{i,c+1} = 1 \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N_0} x_{ij} = \sum_{k \in N_+, j \neq k} x_{jk} \quad \forall j \in C \quad (7)$$

$$\sum_{j \in C, i \neq j} y_{ij} \leq M \sum_{j \in C, i \neq j} x_{ij} \quad \forall i \in C \quad (8)$$

$$\sum_{i \in C, i \neq j} y_{ij} \leq v \quad (9)$$

$$u_i - u_j + 1 \leq (c+2)(1-x_{ij}) \quad (10)$$

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

$$1 \leq u_i \leq c+2 \quad \forall i \in N_+ \quad (11)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (12)$$

$$\forall i \in N_0, j \in N_+, i \neq j$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in C, j \in C \quad (13)$$

目的関数(1)は、ドローンとトラックの両方について総配達時間 T を最小化する. 制約条件(2)は、それぞれのハブの中、ドローンの配達時間に基づいて t_j の下限を与える(Dantzig and Ramser, 1959). 制約条件(3)はドローンの持久力を制限する. 制約条件(4)は、各顧客がトラックまたはドローンのいずれかによって一度だけ訪問されることを保証する. 制約条件(5)はトラックがデポから一度だけ出発することを示す. 制約条件(6)はトラックがデポに戻ることを保証する. (7)は顧客先の点に入るトラックがその点から出なければならないことを指定する. (8)はハブからドローンが発射できることを保証する (M は十分大きな数). 制約条件(9)は一つのハブから v 台のドローンが発射できることを示す. (10)は追加ルート of the constraintを与える. 制約条件(11)~(13)は決定変数を定義する.

定式化された問題を数理計画問題として解くと、計算量が膨大となるため、以下のヒューリスティックアルゴリズムを提案する. 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の配達時間(Dantzig et al., 1954)の和をもって総配達時間 T とする. このヒューリスティックアルゴリズムでは、上述の定式化から緩和し、ハブの候補地にデポも含め、ドローンの数よりも多くの点のハブの周囲にあることを考慮して、1 台のドローンでも複数回配達できると設定した.

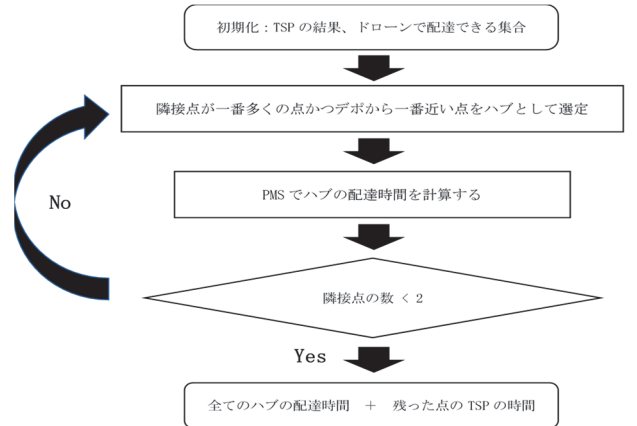


図 1 HUBTSP のヒューリスティックアルゴリズム

4. MFSTSP モデル

Flying Sidekick TSP (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 and Chu (2015)により提案された。ここでは、これを参考に、複数台のドローンによる FSTSP のアルゴリズム（以降、MFSTSP と呼ぶ）を提案する（図 2）。このアルゴリズムは、現時点の最大節約を見つける貪欲アルゴリズムを用いて計算する。

また、MFSTSP の短縮効果を検証するために、配達時間 600 秒のドローン 1 台の場合について、100 個のランダムな点分布で FSTSP と MFSTSP の配達時間を計算した（図 3）。点数が増えると配達時間が長くなるが、MFSTSP の方が短くできることがわかる。

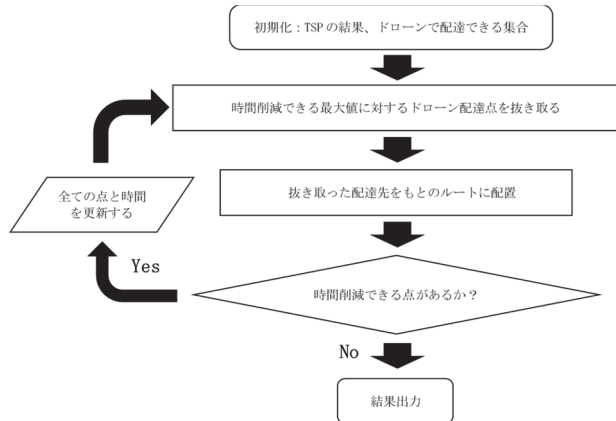


図 2 MFSTSP のヒューリスティックアルゴリズム

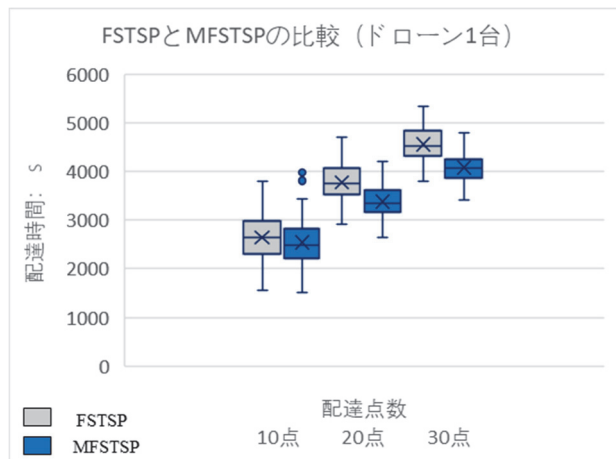


図 3 FSTSP と MFSTSP の比較（ドローン 1 台の場合）

5. HUBTSP と MFSTSP の比較

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。

cluster = 7 $r = 10$ $e = 120 \text{ sec}, v = 5$ HUBTSP $T = 2,800 \text{ sec}$	cluster = 7 $r = 20$ $e = 240 \text{ sec}, v = 5$ HUBTSP $T = 3,143 \text{ sec}$	cluster = 7 $r = 10$ $e = 120 \text{ sec}, v = 1$ HUBTSP $T = 3,631 \text{ sec}$
cluster = 7 $r = 10$ $e = 120 \text{ sec}, v = 5$ MFSTSP $T = 2,903 \text{ sec}$	cluster = 7 $r = 20$ $e = 240 \text{ sec}, v = 5$ MFSTSP $T = 3,083 \text{ sec}$	cluster = 7 $r = 10$ $v = 0$ TSP $T = 3,443 \text{ sec}$
cluster = 1 $r = 50$ $e = 600 \text{ sec}, v = 5$ HUBTSP $T = 1,243 \text{ sec}$	cluster = 7 $r = 50$ $e = 600 \text{ sec}, v = 5$ HUBTSP $T = 2,840 \text{ sec}$	cluster = 7 $r = 50$ $e = 720 \text{ sec}, v = 5$ HUBTSP $T = 1,306 \text{ sec}$
cluster = 1 $r = 50$ $e = 600 \text{ sec}, v = 5$ MFSTSP $T = 2,638 \text{ sec}$	cluster = 7 $r = 50$ $e = 600 \text{ sec}, v = 5$ MFSTSP $T = 2,908 \text{ sec}$	cluster = 7 $r = 50$ $e = 720 \text{ sec}, v = 5$ MFSTSP $T = 2,606 \text{ sec}$

図 4 HUBTSP と MFSTSP による配達経路の比較（青実線：トラック経路，赤破線：ドローン経路）

このときの HUBTSP と MFSTSP による配達経路を図 4 に示す。ドローン 5 台の場合は、 $r=10$ (ドローン配達時間 $e=120$ 秒) では HUBTSP の配達時間の方がやや短い。 $r=20$ では、 $r=10$ より点の分布が分散するため MFSTSP の方が優れている。ドローン 1 台の場合は e の値に係わらず MFSTSP の方が優位になっている (HUBTSP はドローン 1 台のとき、TSP より配達時間が長くなるため無意味である)。

中心に 1 つだけクラスタがある場合、すなわち、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 台の場合は MFSTSP が優位なのは当然であるが、ドローン 5 台の場合は r に対応したドローン配達時間では、 $e=120$ 秒からでは $r=10$ の範囲内の点が全てドローンで配達できるため、HUBTSP が優れている。7 つのクラスタの場合と同様に、 e で全ての点がカバーできるようになると、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、HUBTSP が必ず有利になる。

また、ドローン台数の違いについて比較する (図 5, 図 6) と、HUBTSP はドローン台数の増加につれて、配達時間 T が急減するが、MFSTSP では減少が緩や

かである。そして、両方ともに $e=120$ 秒の場合はドローン台数による影響は小さい。

ドローンの飛行時間制限 e による違いについては、中心に 1 つだけのクラスタがある場合、HUBTSP では $e=120 \sim 360$ 秒の場合 T は下がるが、 $e=480$ 秒の場合は上昇し、 $e=600$ 秒の時にまた急速に下がるという結果になった。7 つのクラスタの場合は、 $e=360$ 秒までは時間短縮の効果は明らかであるが、それ以降は同じドローン台数の下では e による短縮効果はほとんど見られない。一方、MFSTSP では e の増大に従って配達時間はやや短くなるが、 $e=480$ 秒以上では $e=360$ 秒以下のときより短縮効果がやや大きくなる。

6. 結論と今後の課題

本研究の結果から、ドローンの台数が多い場合は HUBTSP が優れているが、ドローンが 3 台以下の場合は、トラックと併走可能な MFSTSP の利点が活かされ、時間短縮の効果が大きいことが明らかとなった。また、需要点の分布がクラスタ化されている場合は HUBTSP が適しているが、そうでない場合は MFSTSP が有利となることが明らかとなった。今回は移動時間で評価したが、コストや環境の側面からの評価の導入や、実際の地域で分析することについては今後の課題である。

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：

- 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
- 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.
- Chang, Y.S., Lee, H.J. “Optimal delivery routing with wider drone-delivery areas along a shorter truck-route.” *Expert Systems with Applications* **104** (2018): 307-317.
- Dantzig, G.B., Ramser, J.H. “The truck dispatching problem.” *Management Science* **6**(1) (1959): 80-91.
- Dantzig, G., Fulkerson, R., Johnson, S. “Solution of a large-scale traveling-salesman problem.” *Journal of the Operations Research Society of America* **2**(4) (1954): 393-410.
- Murray, C.C., Chu, A.G. “The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery.” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* **54** (2015): 86-109.

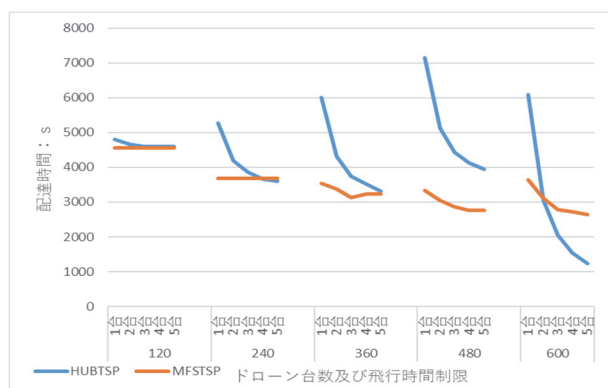


図 5 中心 1 クラスタ, $r=50$ の場合の HUBTSP と MFSTSP のドローン台数と飛行時間制限の比較

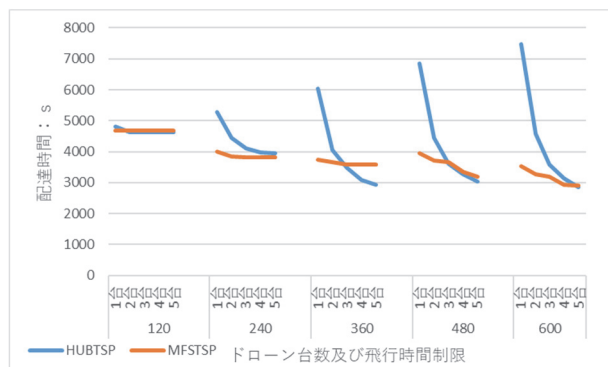


図 6 7 クラスタ, $r=30$ の場合の HUBTSP と MFSTSP のドローン台数と飛行時間制限の比較