

ドローン併用配送計画問題に対する局所探索法 Local search algorithms for the Vehicle Routing Problem with Drones

井関 智也¹⁾ 片山 謙吾¹⁾
Tomoya Iseki Kengo Katayama

1 まえがき

ラストワンマイル物流に対する改善策の一つとして、既存のトラックのみの配送にドローンを追加することで配送効率の向上につながると期待されている。このようなドローンとトラックを連携させた配送については、フライングサイドキック巡回セールスマン問題 (Flying Sidekick Traveling Salesman Problem, FSTSP) [1] をはじめとした、様々な配送モデルが検討されている。FSTSP は 1 台のドローンを搭載した 1 台のトラックで配送する場合の総配送時間の最小化を目的とした組合せ最適化問題であり、ドローンとトラックを組み合わせた最も基本的な配送モデルである [1]。FSTSP の発展形として、ドローンを搭載した複数台のトラックによる配送を想定したドローン併用配送計画問題 (Vehicle Routing Problem with Drone, VRPD) が挙げられる [2]。VRPD に対する局所探索法の研究は限られているため、本研究では VRPD に対する複数の近傍探索を設計し、それらを組み合わせて構成した局所探索法 (LS) を示す。提案 LS の探索性能を評価するために、反復局所探索法と多スタート局所探索法の枠組みのもとで性能比較を行う。

2 ドローン併用配送計画問題

ドローン併用配送計画問題 (Vehicle Routing Problem with Drone, VRPD) [2] は、従来の容量制約付き配送計画問題 (Capacitated Vehicle Routing Problem, CVRP) を拡張し、ドローン (Drone, D) を搭載した K 台のトラック (Truck, T) で全ての顧客 N を巡回 (荷物を配達) し、出発地 (デポ) に戻る際の最大完了時間を最小化する解 S を求める問題であるが、本研究における VRPD ではドローンの運用が配送時間にもたらす影響をより詳細に示すために、目的関数を変更し、総移動時間の最小化を目的とする。VRPD における全てのドローンと全てのトラックはそれぞれ同種のものとする。

VRPD の主な制約を以下に示す。

- D は各 T それぞれに 1 台搭載される。
- D の最大積載量を超える荷物は D で配送できない。
- D の最大サービス時間を超えてはならない。
- D は T を出発し、1 度顧客を訪問後、T に回収される。

3 VRPD に対する局所探索法

本研究では VRPD の近傍を探索するために 5 つの近傍探索を組み合わせて局所探索法を構成した。以下に、設計した 5 つの近傍探索について示す。

3.1 ドローン出発・到着地点 Shift 近傍探索 (daSh)

各トラックのルート ($Troute$) 上のドローン出発地点 d 、ドローン配送顧客 j 、ドローン到着地点 a で構成されるドローンのルート ($droute$) において、新たな $droute$ を構築できる区間を得るために、各 $droute$ 内の配送時間が増加しない限り d 、 a を手前 (図 1 では左) にシフトする。

図 1 に daSh 近傍の一例を示す。図 1 の左側は daSh 近傍探索の適用前、右は適用後の解の例を表しており、四角はトラックのみが配送可能な顧客を、丸はドローン配送も可能な顧客であることを示している。図 1 の例では、 $droute(3,6,5)$ に対してドローン出発地点 d とドローン到着地点 a を手前 (左) にシフトし $droute(1,6,3)$ に変更する。これにより、新たな $droute(3,4,5)$ の構築が可能となる。

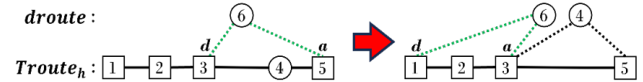


図 1 daSh 近傍の一例 ($droute$ 構築例を含む)

3.2 2 ルート間ドローン割当 Swap 近傍探索 (2DSw)

配送時間を削減するために、異なるトラックの 2 ルート ($Troute_h$, $Troute_{h'}$) からの $droute$ においてドローンで配送される顧客 j , j' の割当ての交換を試みる。配送時間が削減されるならば、交換後の $droute$ に更新する。

図 2 に 2DSw 近傍探索の例を示す。 $Troute_h$ からの $droute(2,4,3)$ と $Troute_{h'}$ からの $droute(6,10,7)$ に対して、移動時間の改善を試みるために、各ドローンが訪問する顧客の割当てを入れ替える。図 2 の例では、この入れ替え処理によって移動時間が改善され、2 つの $droute$ が $(2,10,3)$ と $(6,4,7)$ に更新される。

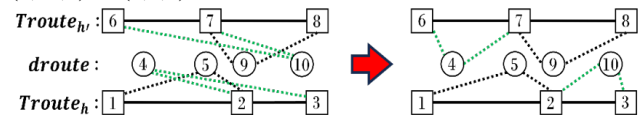


図 2 2DSw 近傍の一例

3.3 2 ルート間ドローン割当 Shift 近傍探索 (2DSh)

あるトラックのルート ($Troute_h$) からのドローン配送顧客 j' の割当てを、異なるトラックのルート ($Troute_{h'}$) 上の 2 顧客を出発・到着地点とする新たな $droute$ にシフトすることで配送時間が削減されるならば、 j' の割当てをシフトする。

図 3 に 2DSh 近傍探索の例を示す。 $Troute_h$ からの $droute(1,5,2)$ に対して、ドローンが訪問する顧客 5 の割当てを、 $Troute_{h'}$ に移動させ、移動時間の改善を試みる。図 3 の例では、シフト処理により移動時間が改善されたため、元の $droute(1,5,2)$ が削除され、 $Troute_{h'}$ からの新しい $droute(8,5,9)$ に更新される。

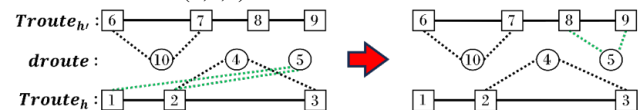


図 3 2DSh 近傍の一例

3.4 1 ルート間ドローン割当 Swap 近傍探索 (1DSw)

配送時間を削減するために、同一の $Troute$ 上の 2 つの $droute$ においてドローンで配送される顧客 j , j' の割当ての交換を試みる。配送時間が削減されるならば、交換後の $droute$ に更新する。

1) 岡山理科大学

図 4 に 1DSw 近傍探索の例を示す. 同一の *Troute* 上の 2 つの *droute*(1,5,2) と (2,4,3) の移動時間の改善を試みるために, それぞれの *droute* においてドローンが訪れる顧客の割当てを入れ替える. 図 4 の例では, この入れ替え処理によって移動時間が改善されるため, 2 つの *droute* は (1,4,2) と (2,5,3) に更新される.

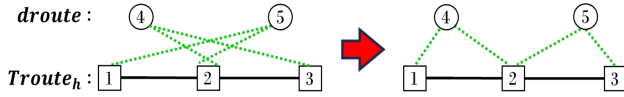


図 4 1DSw 近傍の一例

3.5 1 ルート間ドローン割当 Shift 近傍探索 (1DSH)

ある *droute* のドローン配送顧客 j の割当てを, 同一の *Troute* 上の 2 顧客を出発・到着地点とする新たな *droute* にシフトすることで配送時間が削減されるならば, j の割当てをシフトする.

図 5 に 1DSH 近傍探索の例を示す. 移動時間の改善を図るため, *droute*(1,6,2) に対して, ドローンが訪問する顧客 6 の割当てを, 同一の *Troute* 上の異なる 2 地点を出発地点と到着地点とする新しい *droute* にシフトする. 図 5 の例では, シフト処理により移動時間が改善されるため, 元の *droute* は削除され, 新しい *droute*(3,6,4) に更新される.

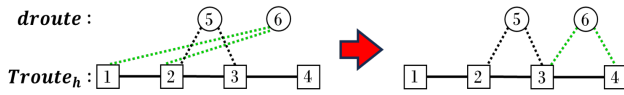


図 5 1DSH 近傍の一例

4 実験結果

提案 LS は 5 つの近傍探索で構成され, その適用順序に応じて 120 の LS を構築できる. 近傍探索の有効な適用順序を評価するために, 反復局所探索法 (ILS) と多スタート局所探索法 (MLS) の枠組みのもとで比較実験を行った. 本実験における ILS, MLS は, VRPD の基となる複数台のトラックのみの配送ルートとして CVRP の解を生成し, その CVRP の解に VRPD の初期解生成法を適用したものを提案 LS の初期解とした [3]. また, ILS と MLS の LS 部分は, 120 の LS それぞれを実行した.

ILS と MLS について以下に示す.

反復局所探索法:

ILS は LS と局所解を脱するための摂動処理で構成される. 繰り返し回数は対象問題例の顧客数とし, 摂動処理として, 全体の 25% の *droute* をランダムに削除する. 削除されたドローン配送の顧客は, 対応するトラック配送に割り当て直される.

多スタート局所探索法:

MLS はランダムな初期解に対して LS を繰り返し適用する. 繰り返し回数は対象問題例の顧客数の 5 倍とし, ランダムな初期解として, 実験で対象とした VRP の問題例の最適解に対して, 10% 以下の顧客にランダムスワップ処理を施す.

実験条件として, 既存研究を参考に, トラックの速度を 40km/h, ドローンの速度を 60km/h, ドローン最大稼働時間を 30 分と仮定し, ドローンの最大積載量を 10 ~ 40 に変化させて行った. 対象問題例は VRP のベンチマーク問題集 CVRPLIB より, 6 つの問題例 (E-n101-k14, E-n101-k8, P-n101-k4, E-n76-k14, E-n76-k8, P-n76-k4) を取り上げる. 各アルゴリズムは C++ によってコード化し, コンパイラは g++(Ver11.4.0) を使用した. すべ

ての計算は, 計算機 Intel(R) Core(TM) i7-1360T 2.20GHz RAM32.0GB 上で実行した.

表 1 に ILS と MLS の比較結果を示す. 表 1 の左から対象問題例, ドローンの最大積載量, 5 種類の近傍探索の適用順序で構成した局所探索法における ILS, MLS の結果を表している. 表 1 は各問題例において最良の結果を示した局所探索法から抜粋して示しており, 表中の値は各解法で得られた解の各問題例の最適解からの改善率 (%) を表している. なお, 改善率 (%) は $\frac{C(\pi) - C(\pi^*)}{C(\pi^*)} \times 100$ によって算出した. 式中の $C(\pi)$ は得られた解 π の評価値, π^* は対象となる VRP 問題例の最適解値を表している. また, 各問題例における最良値を太字で示した.

表 1 より, ILS は MLS の 1/5 の繰り返し回数にもかかわらず, ほとんどの場合において ILS が MLS よりも良い結果を示した. また, ドローンの最大積載量が大きくなるほど, 解が良くなる傾向を観測した. これは, ドローンで配送できる顧客数が多ければ多いほど, ドローン配送によってもたらされる移動時間の短縮が大きくなることを示唆している. 表 1 の下方 average の結果から, 近傍探索の適用順序「2DSw_2DSh_daSh_1DSw_1DSH_」で構成される ILS が平均して良い結果を示した.

表 1 対象問題例における MLS と ILS の比較結果

| 問題例 | 最大積載量 | 2DSw_2DSh_daSh_1DSw_1DSH_ | | 1DSH_2DSw_daSh_2DSh_1DSw_ | | 2DSw_1DSh_daSh_2DSh_1DSw_ | |
|------------|-------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|
| | | MLS | ILS | MLS | ILS | MLS | ILS |
| E-n76-k14 | 10 | -2.6638 | -2.6638 | -2.6638 | -2.6638 | -2.6638 | -2.6638 |
| | 20 | -9.8027 | -9.4098 | -9.8027 | -9.4098 | -9.8027 | -9.4098 |
| | 30 | -15.967 | -18.151 | -15.967 | -15.95 | -15.967 | -17.281 |
| | 40 | -17.352 | -19.623 | -17.352 | -18.465 | -17.352 | -18.412 |
| E-n76-k8 | 10 | -4.2484 | -4.2484 | -4.2484 | -4.2484 | -4.2484 | -4.2484 |
| | 20 | -12.487 | -13.225 | -12.487 | -13.703 | -12.487 | -13.703 |
| | 30 | -18.39 | -21.051 | -18.39 | -20.829 | -18.579 | -19.762 |
| | 40 | -19.895 | -21.104 | -19.895 | -21.265 | -19.895 | -21.104 |
| P-n76-k4 | 10 | -7.2204 | -7.2204 | -7.2204 | -7.2204 | -7.2204 | -7.2204 |
| | 20 | -13.763 | -15.329 | -13.763 | -15.045 | -13.763 | -14.655 |
| | 30 | -21.658 | -22.803 | -21.658 | -22.803 | -21.658 | -22.803 |
| | 40 | -21.331 | -22.01 | -21.331 | -23.145 | -22.223 | -23.145 |
| E-n101-k14 | 10 | -4.8691 | -5.5614 | -4.8691 | -5.5614 | -4.8691 | -5.5614 |
| | 20 | -13.47 | -13.968 | -13.47 | -13.968 | -13.47 | -13.968 |
| | 30 | -17.336 | -17.481 | -17.336 | -17.324 | -17.336 | -17.324 |
| | 40 | -18.3 | -18.297 | -18.3 | -18.127 | -18.3 | -18.478 |
| E-n101-k8 | 10 | -11.08 | -12.598 | -11.08 | -12.157 | -11.08 | -12.157 |
| | 20 | -17.505 | -19.413 | -17.505 | -20.15 | -17.505 | -20.086 |
| | 30 | -20.383 | -22.227 | -20.66 | -22.406 | -20.383 | -22.406 |
| | 40 | -21.024 | -22.653 | -21.024 | -22.424 | -21.024 | -22.424 |
| P-n101-k4 | 10 | -13.196 | -15.017 | -13.196 | -15.282 | -13.196 | -15.282 |
| | 20 | -21.882 | -22.584 | -21.882 | -22.612 | -21.882 | -22.612 |
| | 30 | -22.902 | -23.725 | -22.923 | -24.132 | -22.902 | -24.132 |
| | 40 | -23.454 | -24.145 | -23.454 | -24.921 | -23.454 | -24.921 |
| average | | -15.424 | -16.438 | -15.437 | -16.409 | -15.469 | -16.407 |

5 むすび

本論文では VRPD の解の探索において重要な近傍探索を 5 つ提示した. 実験の結果から, 提案 LS は MLS より ILS において良好な結果を示し, ILS において特に良好な近傍探索の適用順序を示した. 今後の発展として, 他のメタ戦略への導入などが考えられる.

参考文献

- [1] C. C. Murray and A. G. Chu. The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 54, pp. 86–109, 2015.
- [2] X. Wang S. Poikonen, B. Golden. The vehicle routing problem with drones: several worst-case results. *Optimization Letters*, Vol. 11, pp. 679–697, 2016.
- [3] Iseki T. Ito S., Katayama K. Iterated local search metaheuristic for the vehicle routing problem with drones. *Proceedings of 3rd International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications*, 2024.