

令和 5 年 5 月 24 日現在

機関番号：14401
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2020～2022
課題番号：20K04962
研究課題名（和文）ドローンを活用したトラック配送計画の立案と評価

研究課題名（英文）Planning of Drone-assisted delivery

研究代表者

森田 浩（MORITA, HIROSHI）

大阪大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：60210176

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：ドローンなどの補助配送を活用したトラックとのハイブリッド配送モデルの構築とその最適化を行った。トラックからドローンを出発させて別の地点でドローンを回収する方式、デポからドローンを出発させてデポで回収する方式、トラックからドローンを出発させてデポで回収する方式などの定量的に比較検討した。ヒューリスティックと数値計画法を組み合わせるとより精度の高い解を与えるアルゴリズムを与えるとともに、計算時間および配送計画の有効性などの観点からも優れている方式を示した。また、旅客と荷物を混載したバスとトラックのハイブリッド輸送に関する数値モデルを考察し、ドローン配送との組み合わせにつなげるための検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

配送量の増加や配達員の不足、さらには地方における配送システムのあり方などが問題となっている中で、ドローンなどの補助配送を活用したトラック配送を検討した。山間地などでは、広範囲にわたる配送地域を効率よくカバーするために、さまざまな輸送形態を上手に組み合わせる方策を取り入れることは、地域の持続可能性を維持するためにも重要である。また、旅客と荷物を混載したバスとトラックのハイブリッド輸送に関する数値モデルを考察し、ドローン配送との組み合わせにつなげるための検討を行った。

研究成果の概要（英文）：We constructed and optimized hybrid delivery models for truck and drones. We have compared quantitatively the methods such as launching a drone from a truck and retrieving it at another location, launching drones from depot and retrieving it at a depot, and launching a drone from a truck and retrieving it at a depot. We developed mathematical programming algorithm combined with heuristics which gives a more accurate solution. The superior method from the viewpoint of calculation time as well as effectiveness of delivery plan is also presented. In addition, we considered a mathematical model for hybrid transportation of buses and trucks that mixed the parcels and passengers, which may combine with drone delivery.

研究分野：システム最適化

キーワード：配送計画 ドローン 数値最適化

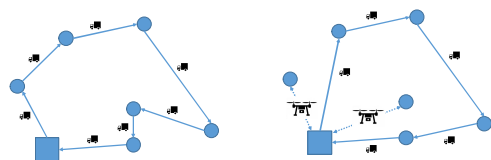
1. 研究開始当初の背景

(1) トラック配送における背景

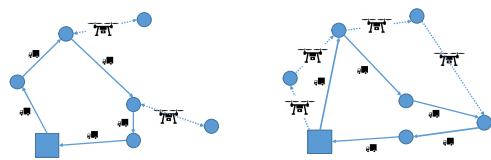
インターネット通販などの普及に伴い、小口配送が急激に増加しており、配送計画の効率化が進められている。一方で、ドライバー人員の不足や労働時間の削減、交通量の増加に伴う渋滞緩和やCO₂排出量削減などの要請もあり、トラック輸送の効率化は喫緊の課題として応えなければならない。近年、異なる輸送形態を組み合わせた配送計画についての研究がみられ、トラックによる配送に加えて、ラストマイル配送と呼ばれる最終顧客への配送手段として、電気自動車、自転車、手押し車などの補助的な輸送手段を用いた配送が考えられている。特にドローンによる配送の可能性が注目を集めており、さらなる活用の広がりが期待されている。

(2) ドローンを活用した配送計画

ドローンとトラックを組み合わせた配送計画により、配送の効率化、省エネルギー化、省力化などのさまざまな効果を生むことができる。トラックによる配送では巡回セールスマン問題として知られている最短経路問題となるが、ドローンを利用する場合には、配送センターから近距離はドローン、遠距離はトラックに分担させる方式や、トラックで顧客の近くまで運搬してからドローンで最終顧客に届ける方式、トラックからドローンを出発させて顧客に配送して、別地点でトラックがドローンを回収する方式などのさまざまな方式が考えられる。



トラックのみによる配送 近距離をドローンで配送



トラックとドローンによる配送

(3) 数理最適化による最適な配送計画の立案

巡回セールスマン問題自体がNP困難な問題でありその拡張である本問題でも最適解を求めるには多大な時間を要するため、さまざまなヒューリスティクスアルゴリズムが提案されている。しかし、問題設定を拡張したときに対する柔軟性は高くなく、局所的な最適化を繰り返しているために解の精度も高いとはいえない。そのため、そこで得られる近似解の精度は良いとはいえず、配送方法の違いを定量的に評価することがむづかかった。柔軟な問題設定に対応でき、かつ、より良好な解を導くための数理計画モデルを開発することが求められている。

2. 研究の目的

(1) トラックとドローンを組み合わせた配送計画の最適化モデルの開発

ドローンを活用したトラック配送の数理モデルを開発する。ドローンの飛行に関して、さまざまな利用形態に適応できる柔軟性をもたせ、ヒューリスティクスと最適化手法を融合させて、従来モデルからの解の質向上を目指す。そのためのアルゴリズム開発とドローン活用の有効性の評価ならびに検証を行う。

(2) ドローン活用の有効性に関する定量的分析

開発した最適化モデルによって配送計画が導き出せれば、ドローンを利用したときの効果を算定することが可能となる。省エネ、省人化、コスト削減など効果を明らかにし、ドローンの有効な利用形態を示す。また、積載可能量、配送時間、配送距離などのドローンの持つさまざまな特性が、ドローンの導入効果に及ぼす影響を定量的に分析し、ドローン活用の有効性について検証する。

(3) 多様な補助配送手段に対応できる柔軟性の確保

ドローンの他に電気自動車や自転車などの補助配送手段を利用した配送方法の他にも、さまざまなハイブリッド化による配送の高度化を考える上で、特に地域における物流のあり方を考察するために必要となる定量的な分析を行うことのできる数理モデルの構築を行う。

3. 研究の方法

(1) 配送方法のモデル化

ドローンを活用したトラック配送方式に関する調査を行い、ドローンを出発させる場所やドローンを回収する場所、ドローンの台数などによる整理を行った。まず、配送中のトラックからドローンを出発させて移動中のトラックで回収する方式FS(Flying Sidekick)-TSPを取り上げた。出発地点と回収地点を決める必要があるため、最適解を求めるための困難さはある。このモ

デルにいくつかの制約を加えることで、モデルの簡略化を考えた。配送途中でトラックを停めてドローンの出発と回収を行うモデル、配送センターでドローンの出発と回収を行うモデル、そして、配送中のトラックからドローンを出発させて配送センターで回収するものなどである。これらの配送方式に対して、数理計画モデルによる定式化を行った。

(2) アルゴリズムの構築とモデル評価

まず、最も汎用的であるが求解に時間を要している FS-TSP に対するアルゴリズムの改善に取り組んだ。より精度の高い解を求めることができたようになったことで、さまざまな条件の下での配送計画の評価や配送方式の比較を定量的に行うことができるようにした。次に、FS-TSP の派生形として PDS(Parallel Drone Scheduling)-TSP、DS(Drone Station)-TSP や RD(Return Depo)-TSP などのモデル化を行い、その特徴や優位性についての分析を行った。さらに、地方における物流配送での活用を検討していたところ、公共交通機関の維持という課題に対して、物流とのハイブリッド化が求められていることがわかり、バスと宅配のハイブリッドのあり方を検討するためのモデル化と解析を行った。将来的には、宅配においてドローンとトラックの配送の成果を活かすことが可能となる。

4. 研究成果

(1) ドローンを活用したトラック配送のモデル化

いくつかの配送方法の定式化を行った。

まず、FS-TSP は、トラックに荷物とドローンを積載し、あるノードに到着したときにトラックからドローンを出発させ、決められた配送先に荷物を届けたのち、トラックとの回収点に移動するものである。トラックも荷物の配送を行いながら、ドローンの回収点に同時に移動しなければならず、トラックとドローンを同期させる必要がある。

PDS-TSP は、配送センターでドローンを出発と回収をするもので、配送センターの近辺はドローンで配送し、その他をトラックで配送するものである。ドローンは配送先との往復を何度でも行えばよく、その間にトラックはドローンとは独立に従来通りの配送計画を行えばよい。

DS-TSP は、トラックの配送先のある地点をドローンステーションとして、ドローンの出発と回収をするものである。ドローンを使用している時間もトラックが待機していることになる。

RD-TSP は、FS-TSP で出発させたドローンは配送センターで回収するもので、伝書鳩方式である。RD や DS では、配送センターから離れた地点にドローンで配送することもでき、特に RD ではドローンは片道だけの飛行でよいという利点もある。

(2) アルゴリズム開発

FS(Flying Sidekick)-TSP ではトラックの配送経路の他にドローンの出発地と配達地と回収地を決めなければならない、その難しさには決定変数の多さが挙げられる。そこで、トラックの配送経路を決める問題 TSP とドローンの配送経路を決める問題 DRP に分割するアルゴリズムを考案した。ドローンの配送先を固定して、最短となるトラックの配送経路を求めてから、その時の最適なドローンの配送経路を求める方法である。ドローンの配送先は、トラック配送で最も時間がかかると考えられる配送先をドローンに変更するという貪欲法の考え方を適用して選択している。DRP では動的計画法を導入することで、探索回数を大幅に削減している。

PDS-TSP では、トラックで配送するノードとドローンで配送するノードに分割する問題と考えることができる。ドローンで配送する時間の合計はトラックの配送時間より短くなるという条件を満たすまで、ドローンの配送先とトラックの配送先を入れ替えながら最適な配送経路を見つけているための近傍探索を行っている。

DS-TSP と RD-TSP ではドローンを出発させる地点とドローンで配送するいくつかの地点を定めることで、配送計画と飛行計画を決定することができる。これらの問題は混合整数計画問題として定式化し、整数計画ソルバーによって解いている。

(3) 性能評価

表 1 は FD-TSP の提案アルゴリズムを従来法と比較したものである。配送先を 10 件としたときの小さい規模の問題に適用したもので、最適解は整数計画ソルバーで求めているが、実用的な時間で解くことはできていない。ヒューリスティクスによる従来法と比較すると、よりよい精度の解をほぼ同時間で解くことができています。この結果はドローンを 1 台とした場合のものである。

表 2 は PDS-TSP に対して、配送先を 30 件としたときの結果を比較したものである。提案法では、FS-TSP と同様の傾向を示しており、改善されていることがわかる。

表 1 FS-TSP の評価

	最適解との差	計算時間(s)
従来法	9.00%	0.28
提案法	3.72%	0.39
ソルバー	-	9401.13

表 2 PDS-TSP の評価

	最適解との差	計算時間(s)
従来法	8.50%	147.61
提案法	6.54%	154.01
ソルバー	-	1502.23

ドローンを複数台用いたとき、PSD-STP と RD-TSP の計算時間を比較した結果を表 3 に、配送距離の減少率を表 4 に示す。配送先を 15 件としたときの結果であり、ドローンを 0 台とした場合は、トラックのみによる配送となる。配送距離の減少率はドローンを使用しないときとの対比で算出している。PDS ではドローンの出発点を決める必要がなく決定変数が少なくなることから、計算時間は小さくなっている。ドローンの台数が増えると RD との差も大きくなっている。一方でドローンの配送先は配送センター近辺に限られるなどの制限がある。ドローンが片道飛行でよい RD の方がドローンの配送先の選択の幅が広がるため、配送距離の減少率は大きくなっている。

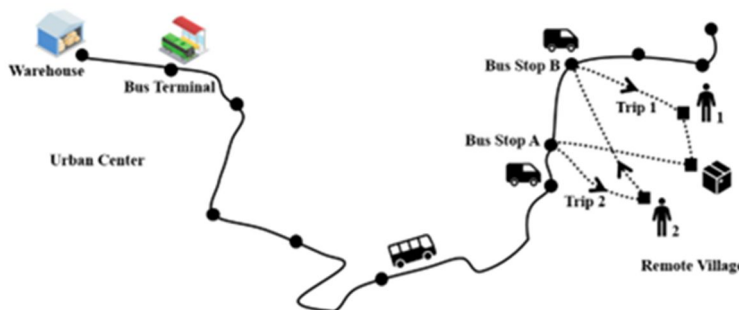
表 3 PDS-TSP と RD-TSP の比較

ドローンの台数	計算時間(s)		減少率(%)	
	PDS-TSP	RD-TSP	PDS-TSP	RD-TSP
0	3.31	3.31	-	-
1	5.79	19.20	7.39	8.48
2	14.34	28.64	13.83	16.66
3	26.27	59.54	17.88	22.20
4	31.71	86.12	21.44	27.09
5	38.95	141.77	24.71	31.48

ドローンを効果的に活用するという観点からは FS-TSP 方式が最も汎用的で優れているものの、求解にかかる時間の問題点があり、現実の実行可能性においては出発回収を現地で行わないといけないため、到着予定時刻からのずれなどの不確実性に対するロバスト性などの課題が残されている。RD-TSP は、回収に関する問題を回避させることができ、ドローンを活用する効果も見られることから、有効な手段として考えることができる。

(4) ハイブリッド輸送のあり方の検討

ドローンの活用は、都市部よりも地方の物流を維持するためにも有効であると考えている。山間部や河川で分断された地域を上空でつなぐことも有効である。過疎地などでは物流の確保とともに交通機関の維持も課題となっている。いずれにおいても、物流の効率化が求められているため、ドローンの活用



による配送の効率化が適用できると考えた。それに取り組むにあたって、まず人の輸送と荷物の輸送の統合モデルを考察することとした。バスで乗客と荷物を都市部から郊外に運び、そこからラストワンマイル配送として乗客と荷物を個々の目的地に配送する。このとき、乗客をバス、荷物をトラックで運ぶ従来の方法や、ラストワンマイル配送を乗客と荷物で別々に運ぶ方法との比較を行う数理計画モデルを作成し、その効果を定量的に評価した。乗客の利便性と運搬および物流の効率性のトレードオフを分析し、ハイブリッド輸送の有効性を示すことができた。

ラストワンマイルの物流においてドローンの活用を入れることで、さらなる効率化が目指せるものと考えており、今後取り組むべき課題の一つに挙げられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sato Kazuki, Morita Hiroshi	4. 巻 1
2. 論文標題 Determining the Optimal Parcel Delivery Method Using One Drone and One Truck	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Mathematics in Operational Research	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1504/ijmor.2022.10047093	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Morita Hiroshi, Begnini Nara Quintela	4. 巻 1
2. 論文標題 Analysis of last-mile operations for mobility and logistics in rural areas	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 World Review of Intermodal Transportation Research	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1504/writr.2022.10052632	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 佐東和樹、森田浩
2. 発表標題 ドローンとトラックを用いた配送計画問題
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuki Sato, Hiroshi Morita
2. 発表標題 Optimization of traveling salesman problem with drone
3. 学会等名 Institute for Operations Research and Management Science（国際学会）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------