



地上設備を考慮した地域内輸送の効率的運用に関する研究

堀, 悟

(Degree)

博士 (システム情報学)

(Date of Degree)

2023-03-25

(Date of Publication)

2024-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8657号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100482405>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博 士 論 文

地上設備を考慮した 地域内輸送の効率的運用に関する研究

2023 年 1 月

神戸大学大学院 システム情報学研究科

堀 悟

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	関連研究	4
1.2.1	乗合を行う交通機関の運行計画の立案	4
1.2.2	車両とドローンを連携させた宅配荷物の配送計画の立案	6
1.3	研究の方針	7
1.4	本論文の構成	7
第2章	需要予測情報による駐車場運用を含む乗合タクシー配車方式	10
2.1	緒言	10
2.2	乗合タクシー配車問題	11
2.3	駐車場運用を含む乗合タクシー配車方式	13
2.3.1	乗客への車両割当方式	13
2.3.2	駐車場決定方式	17
2.4	ランダムな道路モデルによる評価	18
2.4.1	評価モデル	18
2.4.2	結果	23
2.5	実際の道路形状に基づいた道路モデルによる評価	28
2.5.1	評価モデル	28
2.5.2	結果	30
2.6	考察	31
2.6.1	車両台数による待ち時間の違い	31
2.6.2	移動需要パターンによる待ち時間の違い	31
2.6.3	駐車場配置による待ち時間の違い	32
2.6.4	道路削減率, 道路モデルによる待ち時間の違い	32
2.6.5	駐車場使用状況	33
2.7	結言	33
第3章	車両とドローンの連携による宅配荷物の配送計画立案の近傍探索方式	34
3.1	緒言	34

3.2	車両・ドローン連携による宅配荷物配送計画立案問題	35
3.3	ドローン併用近傍探索方式	38
3.3.1	アプローチ	38
3.3.2	初期解の生成	38
3.3.3	改良操作	45
3.4	シミュレーションによる評価	48
3.4.1	評価モデル	48
3.4.2	結果	50
3.4.3	評価	60
3.4.4	計算量についての考察	61
3.5	結言	62
第4章	車両とドローンの連携による宅配荷物の配送計画立案の先読み探索方式	64
4.1	緒言	64
4.2	近傍探索方式の問題点	64
4.3	ドローン併用先読み探索方式	66
4.3.1	アプローチ	66
4.3.2	提案アルゴリズム	67
4.4	シミュレーションによる評価	72
4.4.1	評価モデル	72
4.4.2	近傍探索方式との比較	72
4.4.3	先読みパラメータによる比較	75
4.5	小規模問題での最適性の考察	82
4.6	計算量についての考察	83
4.6.1	総当たりで最適解を求める場合の計算量の定式化	83
4.6.2	先読み探索方式の計算量の定式化	84
4.6.3	考察	84
4.7	結言	88
第5章	結論	89
5.1	本研究のまとめ	89
5.2	今後の課題	91
	参考文献	93
	研究業績	98

本論文の構成	103
謝 辞	105

图目录

FIGURE 1-1 STRUCTURE OF THIS THESIS	9
FIGURE 2-1 SYSTEM ARCHITECTURE	11
FIGURE 2-2 EXAMPLE OF VEHICLE ALLOCATION.....	16
FIGURE 2-3 ROAD MODELS AND FACILITY LOCATIONS	20
FIGURE 2-4 SIMULATION RESULTS (50% OF THE ROADS ARE REMOVED / THE DISTRIBUTIONS OF COMMUTE DEMANDS ARE NORMAL DISTRIBUTION).....	24
FIGURE 2-5 SIMULATION RESULTS (THE DISTRIBUTIONS OF COMMUTE DEMANDS ARE NORMAL DISTRIBUTION)	25
FIGURE 2-6 SIMULATION RESULT (THE DISTRIBUTIONS OF COMMUTE DEMANDS ARE UNIFORM DISTRIBUTION)	26
FIGURE 2-7 USAGE OF PARKING LOTS.....	27
FIGURE 2-8 APPROXIMATING METHOD OF ROAD MODEL	28
FIGURE 2-9 ROAD MODELS BASED ON ACTUAL ROAD NETWORKS.....	29
FIGURE 2-10 SIMULATION RESULTS.....	30
FIGURE 3-1 PROCESS OF NEAREST NEIGHBOR METHOD.....	39
FIGURE 3-2 APPROACH TO APPLYING THE NEAREST NEIGHBOR METHOD (VEHICLE IS CARRYING A DRONE.)	40
FIGURE 3-3 APPROACH TO APPLYING THE NEAREST NEIGHBOR METHOD (VEHICLE IS NOT CARRYING A DRONE)	41
FIGURE 3-4 WEIGHTS OF VEHICLE DELIVERY REQUEST AND DRONE AIRFIELD	44
FIGURE 3-5 PROCESS OF INITIAL SOLUTION GENERATION	45
FIGURE 3-6 RELOCATION AND EXCHANGE	46
FIGURE 3-7 REFINEMENT WITH REGARDS TO VEHICLE DELIVERY REQUESTS THAT CANNOT BE DELIVERED WITHIN TIME WINDOW	47
FIGURE 3-8 ROAD MODELS	49
FIGURE 3-9 NECESSARY TIME.....	53
FIGURE 3-10 THE NUMBER OF PARCELS DELIVERED WITHIN THE DELIVERY TIME WINDOWS.....	54
FIGURE 3-11 RELATIONSHIP BETWEEN NECESSARY TIME AND THE NUMBER OF PARCELS DELIVERED WITHIN THE DELIVERY TIME WINDOWS (1)	55

FIGURE 3-12 RELATIONSHIP BETWEEN NECESSARY TIME AND THE NUMBER OF PARCELS DELIVERED WITHIN THE DELIVERY TIME WINDOWS (2)	56
FIGURE 3-13 RELATIONSHIP BETWEEN NECESSARY TIME AND THE NUMBER OF PARCELS DELIVERED WITHIN THE DELIVERY TIME WINDOWS (3)	57
FIGURE 3-14 RELATIONSHIP BETWEEN NECESSARY TIME AND THE NUMBER OF PARCELS DELIVERED WITHIN THE DELIVERY TIME WINDOWS (4)	58
FIGURE 3-15 DIFFERENCE OF NECESSARY TIME COMPARED TO THE PROPOSED METHOD	59
FIGURE 3-16 THE NUMBER OF PARCELS	60
FIGURE 4-1 EXAMPLE WHERE THE NEAREST NEIGHBOR SEARCH METHOD DOES NOT PROVIDE THE OPTIMAL SOLUTION	65
FIGURE 4-2 EXAMPLE WHERE THE NEAREST NEIGHBOR SEARCH METHOD PROVIDES THE OPTIMAL SOLUTION	67
FIGURE 4-3 LOOK-AHEAD SEARCH METHOD	68
FIGURE 4-4 NECESSARY TIME AND THE NUMBER OF PARCELS DELIVERED WITHIN THE DELIVERY TIME WINDOWS (1).....	73
FIGURE 4-5 NECESSARY TIME AND THE NUMBER OF PARCELS DELIVERED WITHIN THE DELIVERY TIME WINDOWS (2).....	74
FIGURE 4-6 COMPARISON OF SOLUTIONS FOR EACH SEARCH WIDTH	76
FIGURE 4-7 COMPARISON OF SOLUTIONS FOR EACH LOOKAHEAD DEPTH	77
FIGURE 4-8 COMPUTATION TIME OF LOOK-AHEAD SEARCH METHOD.....	78
FIGURE 4-9 DIFFERENCE IN NEXT DESTINATION WHEN WIDTH IS INCREASED	80
FIGURE 4-10 DIFFERENCE IN NEXT DESTINATION WHEN DEPTH IS INCREASED	81

表目次

TABLE 1-1 CHALLENGES OF THIS THESIS.....	4
TABLE 2-1 ARRIVAL TIME OF PASSENGER 1 AND 3	16
TABLE 2-2 TYPES OF TRAVEL DEMAND.....	21
TABLE 2-3 TRAVEL DEMAND PATTERNS.....	22
TABLE 2-4 FACILITY LOCATION AND TRAVEL DEMAND PATTERN IN EACH CASE.....	22
TABLE 3-1 COMPARISON OF COMPUTATION TIME AND ORDER OF THE NEAREST NEIGHBOR SEARCH METHOD	62
TABLE 4-1 COMPARISON WITH OPTIMAL SOLUTION (ROAD MODEL 1)	83
TABLE 4-2 COMPARISON WITH OPTIMAL SOLUTION (ROAD MODEL 2)	83
TABLE 4-3 COMPARISON OF COMPUTATION TIME AND ORDER OF EACH METHOD (BRUTE-FORCE SEARCH)	85
TABLE 4-4 COMPARISON OF COMPUTATION TIME AND ORDER OF EACH METHOD (NEAREST NEIGHBOR SEARCH).....	85
TABLE 4-5 COMPARISON OF COMPUTATION TIME AND ORDER OF EACH METHOD (LOOK-AHEAD SEARCH)	85
TABLE 4-6 COMPARISON OF COMPUTATION TIME AND ORDER (LOOK-AHEAD SEARCH, LOOK-AHEAD DEPTH: 3)	87
TABLE 4-7 COMPARISON OF COMPUTATION TIME AND ORDER (LOOK-AHEAD SEARCH, SEARCH WIDTH: 20)	87

第1章

序論

1.1 研究の背景

国内では人口減少が進展し、これに伴い、特に地方部においては、公共交通に代表される交通インフラの維持、運営が困難な地域が急増している[1][2]。このような地域においては、高齢者の割合が増加の一途を辿っており[3]、自ら車を運転できず、日常生活に必要な移動手段を確保できない移動弱者が増加を続けている。

また、人口減少が進む地域では物流の効率が低下する一方、移動弱者の増加に伴い、食料品や日用品の宅配などのニーズが高まっている[4]。これに加え、少子高齢化の影響により、宅配ドライバーの人手不足が深刻になり始めており[5]、物流インフラの維持が困難となる地域も出てきている。このように、少子高齢化とこれに伴う人口減少の影響を受け、地方部においては、人の移動手段の確保と物流機能の確保が大きな課題となっており、貨客輸送の効率的な運用が強く求められている。

貨客輸送を効率的に行うためには、輸送を担う移動体がどのような順序で、出発地点や目的地点を訪れるべきかを考える必要があるが、移動需要が無い際には、移動体はどこかで待機する必要がある、効率的な輸送のためには待機場所の選択方法も考慮する必要がある。

また、複数の移動体を連携させながら輸送を行う場合には、移動体の結節点となる場所にどのタイミングで訪れるかや、どの場所を訪れるかを考慮する必要がある。

このように、貨客輸送を効率的に行うためには、輸送を担う移動体が、どのような順序で出発地点や目的地点を訪れるかを考えるだけでなく、移動体が待機する場所や他の移動体との結節点などの地上設備を、どのタイミングで訪れ、そして、訪れる地上設備をどのように選択するかも考慮しながら計画を立てる必要がある。

このため、本論文では、地域内輸送の効率的運用を目的に、移動体の待機場所や他の移動体との結節点などの地上設備への訪問も含む形での、住民や荷物の輸送計画の立案方式について提案する。

待機場所については、直近の移動需要が無い際に、将来需要に効率的に対応可能な

場所を選択することが重要であるが、荷物の配送は基本的には前日に需要が分かっており、また、配送時間帯を指定しない要求もあるため、予め計画をある程度平準化させた上で配送することが可能なので、当日中に将来需要に備えて待機する必要があるケースは少ない。一方、人の移動は、荷物の配送と比べて時間が重要である場合が多く、1日の中で需要が多い時間帯と需要が少ない時間帯の偏りが発生しやすい。このため、待機場所の選択が輸送効率に大きな影響を与える。以上より、待機場所の訪問も含む形での輸送計画の立案については、住民の移動要求を対象として検討する。

ここで、住民の移動要求をこれまで以上に効率的に対応する手段として、乗合タクシーが検討されており、各地で導入が進められている[6]。タクシーで乗合を行う方法としては、駅周辺などにあるタクシー乗り場で待っている人の中で、目的地が近い人同士を見つけ出し、同時に乗車させてそれぞれの目的地で降車させるものがある。ただし、この方法では同じ乗車場所に同じタイミングで目的地が近い人が存在しないと乗合を行うことができない。効率的に乗合を行うためには、複数の乗客の出発地と目的地を一元的に把握した上で、タクシーの配車計画を決定する必要がある。

乗客の移動要求については、前日などある程度前もって把握できるものもあるが、例えば、当日に急遽病院に行く必要が出る場合や、他の予定との兼ね合いで移動時間が直前まで分からない場合もある。また、施設を訪れた場合には、そこでの用事を済ますのに必要となる時間が予め分からない場合もある。このため、利便性の高い移動手段を提供するためには、リアルタイムに発生する要求への対応も必要になる。

この際、乗客の待ち時間を短縮し、利便性を向上させるためには、乗客から移動要求が出された際に、車両が乗客の近くに存在していることが重要となる。

乗合を前提とした交通機関の効率的な運行方法については、様々な取り組みが見られるが、移動要求が無い際には既定の路線を走行しているか、既定の場所で待機している前提となっており、上述したような待機場所の訪問も考慮に入れた形での配車方式についての検討は見られない。

複数の移動体を連携させた輸送については、荷物の配送の効率化に向けて、従来まで用いられてきた車両に加えて、ドローンを活用することへの関心が高まっている[7][8]。特に、交通の便が悪い山間部や離島において、その有用性が期待されており、各地で実証実験が進められている[9][10]。ドローンを活用することにより、川などの道路のないルートを直線的に結び、高速で宅配荷物を無人で宅配先に運ぶことが可能

となるが、現状では、荷物の搭載を無人で行うことは難しく、荷物の搭載の際には基本的には人手が必要となる。また、バッテリーの制約もあり、バッテリーの交換が必要となることがあるが、この際にも人手が必要とされることが多い。

このような荷物の搭載やバッテリーの交換について、専任の担当者を充てて対応する方法も考えられるが、専任の担当者を立ててしまうとコストや要員確保の面でのメリットが十分に得られない。このため、ドローン専任の担当者を用意するのではなく、宅配ドライバーが荷物を配送しながら、同時に、ドローンへの荷物の搭載やバッテリーの交換などを行う形で、1名の宅配ドライバーが車両とドローンの双方を用いて配送を行う方式が考えられる。この方式では、車両によって、ドローンを配送先の近くまで他の荷物と混載して運ぶため、ドローンの就航距離を短縮することも可能であり、うまく運用することにより、一層の効率化が期待される。

このような方式により、効率的な配送を実現するためには、配送箇所の訪問順序だけでなく、車両とドローンの結節点となるドローンの離着陸場の訪問順序を考慮に入れた形で配送計画を立案することが重要となる。このため、他の輸送手段との結節点の訪問も含む形での輸送計画の立案については、車両とドローンを用いた荷物の配送計画を対象として検討する。

なお、荷物の配送については、上述したように、基本的には前日に需要が分かっており、予め計画を立てておいた上で配送する形が主である。ただし、荷物の再配達や集荷は、当日中においても、正午などの一定の時刻までは受け付けていることが多く、利便性向上のためにはこのような要求への対応も必要である。このため、前日夜、または、当日朝に実施することを前提とした配送計画の立案と、当日の配送中に実施することを前提とした配送計画の立案の双方を対象とする。

荷物の配送は、特に国内においては、再配達を減らすために配送時間帯を指定するサービスが普及しており、車両とドローンを用いて配送を行う際にも、配送時間帯指定を考慮した形での計画立案が求められる。

配送箇所とドローンの離着陸場の訪問順序の場合の数は非常に大きく、総当たりにより最適解を求めることは、計算時間が膨大で実用的でない。そこで、ドローンを利用した配送計画問題に対して、配送時間帯指定のない場合については、ヒューリスティックな手法が多く報告されている[11][12]。しかし、配送時間帯指定のある場合の配送計画に対しては、問題の簡単化のため不自然な制約を設けた計画手法がいくつか提

案されている[13]が、実用的でない。

以上から、本研究では以下の課題を解決することを目的とする。各課題の位置づけを Table 1-1 に示す。

- (1) 乗客の待ち時間短縮のための、駐車場運用を含む乗合タクシーの配車計画の立案
- (2) 宅配効率化のための、ドローン離着陸場への訪問を考慮した配送計画の立案
 - i. 当日の配送中に実施することを前提とした配送計画の立案
 - ii. 前日夜、または、当日朝に実施することを前提とした配送計画の立案

Table 1-1 Challenges of this thesis

Role of ground facilities	Target	Challenge
Waiting Point	Resident movements	Planning of shared taxi dispatch including parking operation to reduce passenger waiting time (Chapter 2)
Connection point with another transportation mode	Parcel delivery	Planning of delivery plan considering visits to drone airfields to improve delivery efficiency response to real-time demands (Chapter 3)
		Planning of delivery plan considering visits to drone airfields to improve delivery efficiency responding to default demands (Chapter 4)

1.2 関連研究

1.2.1 乗合を行う交通機関の運行計画の立案

乗客の移動要求に応じて、車両の移動経路を決定する問題は一般に DARP (Dial-A-Ride Problem) と呼ばれており、様々な観点からの取り組みが存在する[14]。

特に乗合を前提としたものとしては、オンデマンドバスへの適用を前提に、既定路線が存在する環境で、乗客の移動要求に応じて一定の幅の範囲内で経路を変更する、寄り道型デマンドバスについての取り組みがある[15]。また、効率的な既定路線の設計に関する研究もなされている[16]。これらは、タクシーのように、既定路線が存在

せず、乗客の移動要求のみに応じて経路を決定する場合には適用できない。

同じくオンデマンドバスに関する取り組みとしては、エリア内のあらゆる場所を出発地や目的地として設定することができる、フルデマンド型についてのものもある[17][18]。ただし、ここでは、車両の乗車人数に制限が与えられておらず、タクシーのように小型の車両を用いる場合には適用することができない。

車両の乗車人数に制約があるものとしては、車両の乗り換えを考慮に入れたもの[19]、乗客に乗車地点まで歩いてもらったり、降車地点から歩いてもらったりすることを前提に運行計画を決定するもの[20]、曜日毎に変動する需要に対して、施設への到着時間などの一貫性を持たせながら運行計画を決定するもの[21]など、多くの取り組みがなされている。ただし、これらの取り組みは、移動要求は予め既知として計画を決定しており、動的な要求が発生するケースには対応できない。

動的な移動要求に対応するための運行計画の立案についても、同様に多数の取り組みが存在する。DARPはNP困難な組合せ最適化問題であり、発生する移動要求にリアルタイムに対応するためには、処理時間が重要となる。このため、特に処理時間を意識した取り組みが多くみられる。この中には、移動要求のベクトルとの角度が小さくなる移動ベクトルを持つ車両を、要求に対応する車両として選択するもの[22]、乗客の近傍の車両を要求に対応する車両として選択するもの[23]、地図をグリッドに分割し、グリッド間の距離を予め計算することにより、乗客を最も早く目的地に連れていくことができる車両を近似的に高速に選択するもの[24]、組み合わせ最適化問題に一般的に適用されるメタヒューリスティックアルゴリズムである Greedy randomized adaptive search procedure を適用するもの[25]などがある。

また、北京[26]やニューヨーク[27][28][29]などの大都市のタクシー利用データを用いて、乗合タクシーの効果を検証した取り組みもある。

これらの取り組みは、動的に発生する移動要求に対応しているが、将来の需要予測情報は活用していない。このため、将来の需要予測情報を用いることにより、更なる効率化をめざす取り組みがある[30][31][32]。これらの取り組みは、効率的な乗合を可能とするために、乗客を目的地に運ぶ際の経路を将来の需要予測情報を用いて決定しているが、乗客を乗せていない場合の車両の位置については、その場で止まっている[31]、空間的に平準化するように再配置する[32]などしており、先に述べたような、乗客から移動要求が出される前段階の待機場所への訪問も考慮に入れた形での配車方式

については示されていない。

1.2.2 車両とドローンを連携させた宅配荷物の配送計画の立案

ドローンを活用した宅配荷物の配送は、各種サーベイ論文に見られるように、多くの研究が進められている[33][34][35][36]。

この中で、車両とドローンを組み合わせた宅配荷物の配送方式としては、リアルタイムに発生する配送要求に効率的に対応できるように、配送センターから車両で配送すべきか、ドローンで配送すべきかを決定するものがある[37][38]。これらは都度発生する配送要求のみを対象としており、1 日分の配送要求が既知の場合の計画立案方式については対象としていない。

1 日分の配送要求が既知の場合の計画立案方式としては、時刻表が存在するバスを前提とし、ドローンがバスに離着陸しながら宅配荷物を配送するものがある[39]。これは車両の運行計画は決まっているものとしてドローンの配送計画を立案しており、車両の運行計画については検討の対象としていない。また、車両は配送を行わず、ドローンのみが配送を行うとしている。

車両とドローンを組み合わせた形での、1 日分の配送要求が既知の場合の計画立案方式については Murray らの取り組みがある[11][12]。これらは、1 名の宅配ドライバーを前提とした、車両とドローンによる効率的な配送計画の立案方式を検討している。ただし、配送時間帯は考慮にいていない。

配送時間帯を考慮にいたしたものとしては、Ham の取り組みがある[40]。これは、車両とドローンを組み合わせた計画立案方式を検討しているが、車両とドローンは個別で荷物の配送を行っている。すなわち、ドローンは配送センターで荷物を受け取り、荷物の配送後は再度配送センターに戻って荷物を受け取るという動きをしており、車両と連携した形での配送は行っていない。

同様に、配送時間帯を考慮にいたしたものとしては、Pugliese らの取り組みがある[13]。これは、ドローンが車両で荷物を受け取り、荷物の配送後は車両に戻って荷物を受け取るという前提での計画立案方式を検討している。ただし、ドローンは離陸した場所と同じ場所には着陸できない、同じ場所から 2 回以上離陸できないなど、実運用を考えるといくつか不自然な前提が置かれている。

1.3 研究の方針

前節までに述べた課題を踏まえた、本研究の方針を説明する。

(1) 需要予測情報による駐車場運用を含む乗合タクシー配車方式

乗客から移動要求が出される前段階の待機場所も考慮に入れた、乗り合いタクシーの配車方式を提案する。従来、乗客を目的地に運ぶ際の経路の決定のみに用いられてきた需要予測情報が、車両の待機場所の決定にも活用できることに着目し、需要発生が見込まれるエリアの近くの駐車場に多くタクシーを待機させることにより、乗客の待ち時間短縮を図る。そして、シミュレーションによって、待ち時間の短縮効果を評価する。

(2) 車両とドローンの連携による宅配荷物の配送計画立案のための近傍探索方式

車両とドローンを組み合わせた形での配送計画の立案方式を提案する。配送指定時間帯と、配送先やドローンの離着陸場までの移動時間をもとに逐次的に次の訪問先を決めることにより、配送計画を作成する。これにより、配送途中での集配先の追加にも対応可能な計算時間で、効率的な配送計画を作成することを狙う。そして、シミュレーションによって、指定時間帯内に配送可能な荷物の個数と配送に要する時間を評価する。

(3) 車両とドローンの連携による宅配荷物の配送計画立案のための先読み探索方式

配送前日の夜、もしくは、当日の朝に1日分の配送計画を作成することを想定し、近傍探索方式を拡張した、より効率的な配送計画の立案方式を提案する。訪問箇所の複数の候補を先読みし、よい結果が得られる移動先を逐次的に選択することにより、より効率的な配送計画を作成することを狙う。そして、シミュレーションによって、指定時間帯内に配送可能な荷物の個数と配送に要する時間を評価する。また、小規模な問題を用いて最適性を評価する。

1.4 本論文の構成

本論文は全5章から構成され、第2章以降を以下のように構成する。

第 2 章では、需要予測情報による駐車場運用を含む乗合タクシー配車方式を提案する。まず 2.2 節で対象とする問題の定義を述べ、2.3 節で乗客への車両割当方式と駐車場決定方式について説明する。2.4 節ではランダムな道路モデルによる評価を行い、続いて、2.5 節で実際の道路形状に基づいた道路モデルによる評価を行う。2.6 節で考察を行い、2.7 節で全体をまとめる。

第 3 章では、車両とドローンの連携による宅配荷物の配送計画立案のためのドローン併用近傍探索方式を提案する。3.2 節で対象とする問題の定義を述べ、そして、3.3 節で提案方式における初期解の生成方法と解の改良操作について説明する。3.4 節で方式の性能評価と計算量についての考察を行い、3.5 節で全体をまとめる。

第 4 章では、車両とドローンの連携による宅配荷物の配送計画立案のための先読み探索方式を提案する。4.2 節では 3 章のドローン併用近傍探索方式の問題点を示し、4.3 節では改良アプローチを示すとともに提案アルゴリズムを説明する。4.4 節で近傍探索方式との比較を行い、また、先読みのパラメータを変化させた場合の解の比較を行う。4.5 節で小規模な問題における最適性の考察を行い、4.6 節で計算量についての考察を行う。最後に 4.7 節で全体をまとめる。

第 5 章では、総論として本研究で得られた成果を要約し、今後の課題を述べる。

各章の関係を Figure 1-1 に示す。

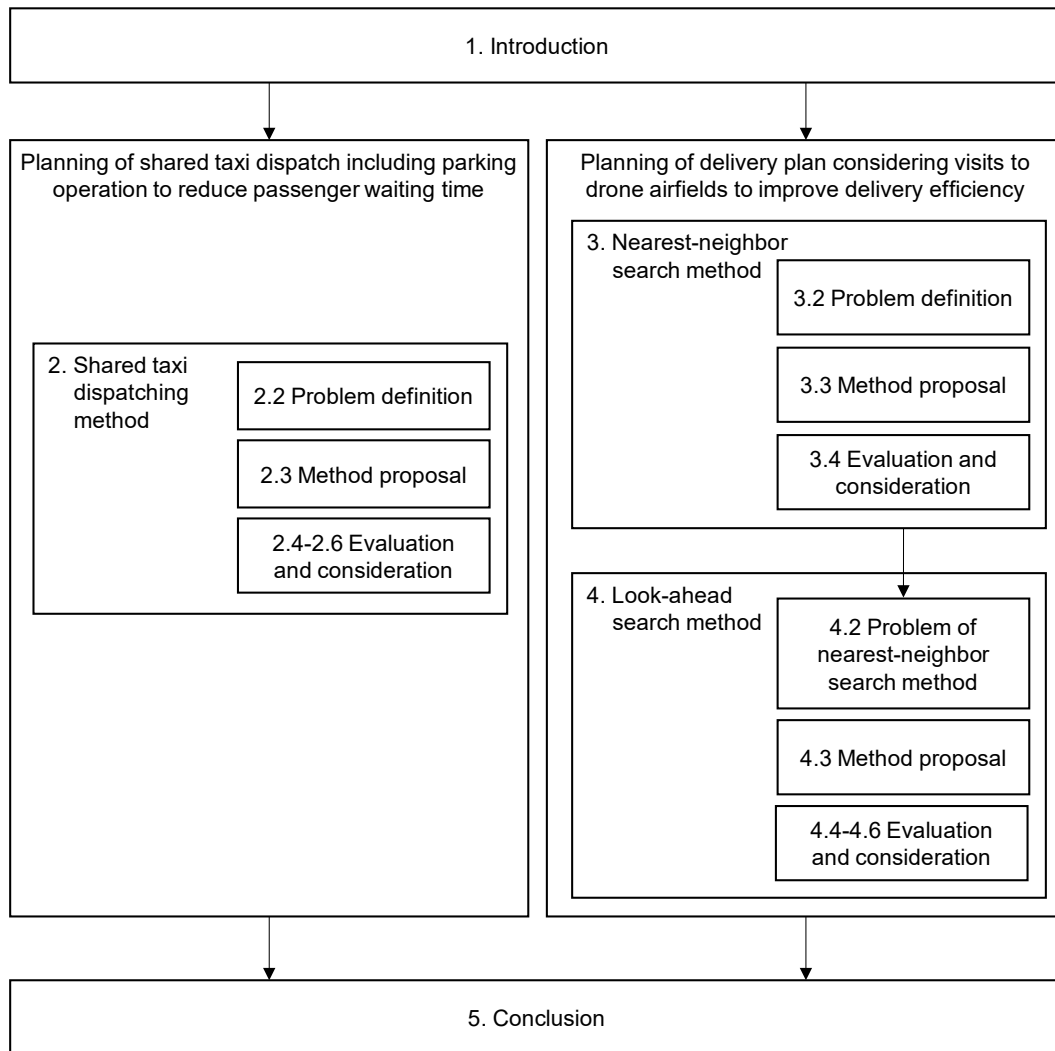


Figure 1-1 Structure of this thesis

第2章

需要予測情報による駐車場運用を含む 乗合タクシー配車方式

2.1 緒言

本章では、住民のリアルタイムな移動要求への効率的な対応に関して、乗客の待ち時間短縮を狙い、需要予測情報を用いて待機する駐車場を決定する乗合タクシーの配車方式を提案する。

国内では少子高齢化が進展し、特に地方部においては高齢者の割合が増加の一途を辿っている[3]。これに伴い、移動弱者も増加を続けており、解決に向けてはコミュニティバスの導入などが進められているが、別の動きとして、各種の法規制の緩和による新たな交通手段の提供についての検討がなされてきた[41]。この1つに乗合タクシーの認可があり、今後の地方部の住民の足を担う手段として期待されている。

ここで、利用者の移動需要に基づき乗降地点を効率よく辿って運行するデマンド交通の運行方式は大きく以下の4つに分類される[42]。

- (1) 迂回路方式：路線バスとして基幹ルートを実行しながら、事前のデマンド受付により迂回ルートを適宜経由、定められた停留場で乗降する方式
- (2) フレックスルート方式：あらかじめ停留所は定めておくが、停留所候補を繋ぐルートはデマンドに応じて決める方式
- (3) ドアトゥドア方式：停留所は路線を定めずに、乗客が指定した任意の乗降場所を運行する方式
- (4) フルデマンド方式：ドアトゥドア&ダイヤフリー&リアルタイム予約（運行中車両へのデマンドの可能）のデマンド運行が可能。すなわち「いつでも、どこでも、すぐに」を実現する方式

本章では、ユーザの利便性の高いフルデマンド方式を前提とした配車方式を扱う。

1.2.1 節に示したように、乗合を前提とした交通機関の効率的な運行方法については様々な取り組みが存在するが、移動要求が出される前段階における、車両の待機場所

となる地上設備である駐車場の運用も考慮に入れたものは見られない。

このため、本章では、現在コミュニティバスが導入されているような地方部を対象とした、駐車場運用も含む効率的な乗合タクシーの配車方式を提案する。以下では、まず 2.2 節で対象とする問題の定義を述べる。そして、2.3 節で提案方式を説明する。続いて 2.4 節、2.5 節でランダムな道路網と実際の道路網を対象とした評価実験の結果を示し、2.6 節で考察を行う。

2.2 乗合タクシー配車問題

本問題においては、複数の乗客の移動要求は一元的に把握されているとし、移動要求を基にして複数のタクシーの配車方式を決定する。また、各タクシーの位置は同じく一元的に把握されているとする。これらは、乗客はスマホなどを用いて移動要求をサーバに送信し、また、タクシーは携帯網などを用いて自身の位置情報を逐次サーバに送信し、サーバから返される配車指示を運転手用の端末に表示するなどで実現することを想定している。前提とするシステム構成を Figure 2-1 に示す。

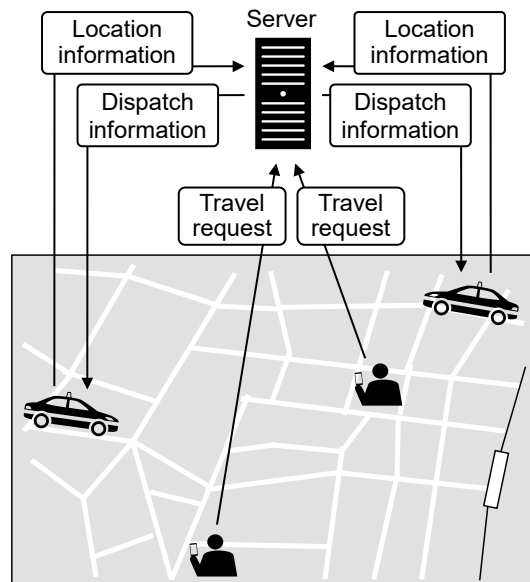


Figure 2-1 System architecture

通常のタクシーでは、乗客がいない場合や迎車中でない場合は乗客を探すために流し運転をすることが多いが、ここでは、移動要求は全て一元的に管理され、これをもとに配車方式を決定する形とし、流し運転については考慮しない。また、乗客がいな

い場合や迎車中でない場合に、不必要に道路を走行したり、道端に停車していたりすると、他の車両の交通の妨げになる可能性があり、また、車両として電気自動車を使用する際は、バッテリー容量の制約で比較的短い周期での充電が必要となる場合もあるため、乗客がいない車両や迎車中でない車両は駐車場で待機しているとする。

車両については、バスのような大型のものではなく、通常のタクシーのような大きさのものを想定し、乗合可能人数の上限が存在するとする。

乗合を行う際には、後から要求を出した乗客の乗降順によっては、既に車両が割り当たっている乗客の目的地への到着時刻が、当初予定より遅れることがある。ただし、あまりに大幅に遅れてしまうとサービスとして使いづらいものになってしまうため、新たに移動要求が発生した際には、既に車両に割り当たっている乗客の目的地への到着時刻が、車両に割り当てられた際に求められた到着時刻から、一定時間以上遅くならないように車両を割り当てる。以降、この時間を最大遅延可能時間と呼ぶ。

また、新たな乗客を車両に割り当てる際は、既に車両に割り当たっている乗客を他の車両に割り当てたり、乗客の乗降順は変更したりはせずに、これらは既定のものとして、新たな乗客への車両の割り当てと、乗車と後車の順番の決定を行う。

実際の状況においては、移動要求を出した際に、待ち時間が長くなることが分かった場合には、乗客が要求を取り下げ、他の移動手段を検討することがあるが、ここでは、全ての移動要求は乗合タクシーで対応するとし、移動要求が出された際には、必ずいずれかの車両を割り当て、乗車と後車の順番を決定する。

移動時間については、実際には渋滞状況や信号での停車などの様々な要因によって変動するが、ここでは距離に比例して定まるとする。また、乗り降りに要する時間は考慮しない。最後に移動需要については、過去の移動需要の情報から、施設毎に分布の種類や分布に関するパラメータが推定でき、これを需要予測情報として使用できるものとする。ここでの需要予測情報は、時間帯毎に、ある地点からある地点、ある地点からランダムな地点、ランダムな地点からある地点、ランダムな地点からランダムな地点への移動需要が、どのような分布で発生するかを示した情報である。

上記のような条件のもと、本問題では、乗車位置での乗客の待ち時間の平均を最小にすることをめざす。

以上纏めると、本問題は、タクシーの位置、発生した移動要求、需要予測情報が既知という前提のもと、既に車両に割り当たっている乗客の目的地への到着時刻が、車

両に割り当てられた際に求められた到着時刻から、一定時間以上遅くならないという制約を満たしながら、乗車位置での乗客の待ち時間の平均が最小になるよう、移動要求が発生した際には乗客を載せる車両と乗降順を、また、車両が乗客を降ろした際に乗客の割り当てが無くなった際には待機する駐車場を、それぞれ決定する問題である。

この際、乗客の待ち時間を短くするには、乗客から移動要求が出された際に車両が乗客の近くに存在していることが重要となる。これを実現するためには、移動需要が発生した際に、車両が近くの駐車場で待機しているよう、待機する駐車場を適切に決定することが課題となる。

2.3 駐車場運用を含む乗合タクシー配車方式

2.3.1 乗客への車両割当方式

乗客からの移動要求をサーバが受信した際の、乗客への車両の割り当て方法について述べる。

一般に、デマンドバスのような乗合を行う車両の最適な配分および経路探索を行う問題は動的な巡回セールスマン問題と等価であり、最適解を求めることは計算量の面で困難である。このため、マルチエージェントによるオークションシステムを応用して準最適解を求める、逐次最適挿入法という手法が提案されてきている[17]。

逐次最適挿入法は計算量が少なく、また、これまでの実証実験においても実用上問題ない結果が得られることが確認されており、リアルタイムに発生する要求に応じて車両を割り当てるにおいて好適な手法である。ここでは、この逐次最適挿入法をベースに車両割当方式を検討する。

逐次最適挿入法では、車両毎に、既に移動要求を出している乗客の乗車と降車の順序に関する情報を管理する。新たに移動要求が発生した際には、車両毎に、この情報に対して、新規の移動要求の乗車と後車を挿入し、これにより生じる既存の乗客の遅延と新たな移動要求の到着時刻の和をコストとして求める。乗車と後車の挿入は全ての組合せについて行い、コストが最小となるものを、1つの車両における、乗車と後車の挿入箇所として求める。なお、既存の乗客の遅延が一定以上大きくなる場合や、新たな移動要求の到着時刻が一定以上遅くなる場合は、その車両は乗客には割り当てないとする。これを全ての車両について行い、コストが最小となる車両を乗客に割り

当てる。

なお、上記のように、逐次最適挿入法では、乗合可能人数の制約は考慮されていない。一方、今回は乗合可能人数の制約を考慮する必要がある。また、逐次最適挿入法では、既存の乗客の遅延が一定以上大きくなる場合や、新たな移動要求の到着時刻が一定以上遅くなる場合は、その車両は乗客に割り当てないため、結果的に、乗客にバスが割り当たらない場合もあるが、本問題では全ての移動要求を乗合タクシーにより満たすため、乗客にはいずれかの車両を必ず割り当てる必要がある。

まず、乗合可能人数の制約について、逐次最適挿入法では、車両毎に、既に移動要求を出している乗客の乗車と降車の順序に関する情報を管理しており、この情報により、あるタイミングでの乗車人数が分かるため、この情報を用いて制約を満たす形で乗車と降車の順序を決定する。すなわち、新たな移動要求の乗車と後車を挿入する際に、乗客の乗車と降車の順序に関する情報を使用して、全てのタイミングで乗合可能人数を超えない乗車と後車の挿入箇所の組合せのみを候補として抽出する。

次に、全ての移動要求を乗合タクシーにより満たすために、逐次最適挿入法での車両割り当てを行わない条件を緩和する。具体的には、新たな移動要求の到着時刻の遅延に関する制約を設けないことにより、常に新たな移動要求にいずれかの車両が割り当たるようにする。

以下、具体的な処理を記す。

各車両は乗合可能人数と最大遅延可能時間が予め定められている。また、逐次最適挿入法と同様に、車両には、既に移動要求を出している乗客の乗車と降車の順序に関する情報が紐づけられている。例えば、ある時刻に乗客 1 が乗車中で、乗客 2 の乗車場所に向かっており、その後、乗客 1 の目的地、乗客 2 の目的地に向かう車両は、(乗客 2—乗車、乗客 1—降車、乗客 2—降車) という情報が紐づけられている。

新たに乗客からの移動要求を受信した際には、全車両について、下記の制約を満たしながら、最も早い時刻に新規乗客が目的地に到着可能な乗車、降車の順序を求める。すなわち、先に述べた乗客の乗車と降車についての順序のいずれの位置に新規乗客の乗車と降車を挿入すれば、新規乗客が最も早い時刻に目的地に到着できるかを求める。そして、全車両の中から最も早い時刻に新規乗客が目的地に到着可能な車両を割り当てる。

ここで、上で述べた制約は以下の 2 つである。

- ① 同時に車両に乗車する人数が、予め定められている乗合可能人数を超えない。
- ② 既に車両が割り当てられている乗客の目的地への到着時刻が、車両が割り当てられた際に求められた到着時刻から、予め定められている最大遅延可能時間以上遅くならない。

上記方式を疑似コードで記載したものを以下に示す。

```
1: for 車両 in 車両リスト:
2:     for 乗車順序 in 乗降順序リスト:
3:         for 降車 in range(乗車順序, len(乗降順序リスト)):
4:             if 乗車人数 <= 最大乗車人数:
5:                 if 他の乗客の到着遅延時間 <= 最大遅延可能時間:
6:                     if 新規乗客の到着時刻 < 新規乗客の最速到着時刻:
7:                         新規乗客の最速到着時刻 := 新規乗客の到着時刻:
8: 新規乗客の最速到着時刻が最も早い車両を選択;
```

次にこの方式の具体的な動作例を Figure 2-2 を用いて示す。Figure 2-2 では 2 台の車両があり、乗客 1 には車両 A が、乗客 2 には車両 B が既に割り当たっている。ここで、新規に乗客 3 が移動要求を送信した場合について述べる。なお、ここでは、Figure 2-2 で示した位置に車両が存在する時刻を 0、格子の 1 辺を車両が移動するのに要する時間を 1 とする。また、乗合可能人数は 2 名、最大遅延可能時間は 2 とする。

車両 A が乗客 3 を乗せる場合は、乗車、降車の順序としては、以下の 6 ケースがある。

1. (乗客 1—乗車, 乗客 1—降車, 乗客 3—乗車, 乗客 3—降車)
2. (乗客 1—乗車, 乗客 3—乗車, 乗客 1—降車, 乗客 3—降車)
3. (乗客 1—乗車, 乗客 3—乗車, 乗客 3—降車, 乗客 1—降車)
4. (乗客 3—乗車, 乗客 1—乗車, 乗客 1—降車, 乗客 3—降車)
5. (乗客 3—乗車, 乗客 1—乗車, 乗客 3—降車, 乗客 1—降車)
6. (乗客 3—乗車, 乗客 3—降車, 乗客 1—乗車, 乗客 1—降車)

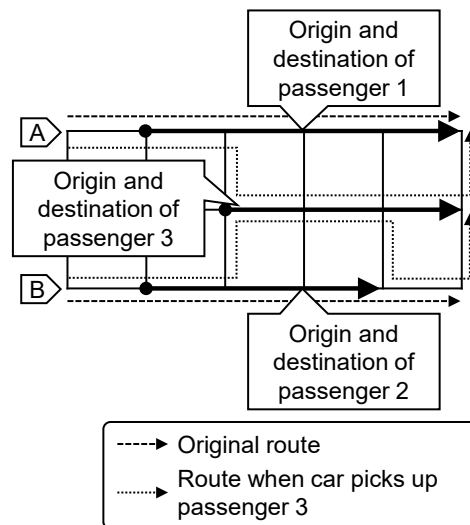


Figure 2-2 Example of vehicle allocation

Table 2-1 Arrival time of passenger 1 and 3

Case	Arrival time of passenger 1	Arrival time of passenger 3
1	5	12
2	7	8
3	7	6
4	9	10
5	11	10
6	15	6

それぞれのケースにおける乗客 1 の目的地への到着時刻と乗客 3 の目的地への到着時刻は Table 2-1 のようになる。

当初の乗客 1 の目的地への到着時刻は 5 であり，最大遅延可能時間が 2 であることから，乗客 1 の目的地への到着時刻が 7 を超えているケース 4，ケース 5，ケース 6 は候補から外れる。ケース 1，ケース 2，ケース 3 はいずれも最大遅延可能時間に関する制約を満たしており，この中で，ケース 3 が乗客 3 の目的地への到着時刻が 6 で最も早いため，車両 A に乗車する場合の乗車，降車の順序となる。なお，Figure 2-2 の点線がこの際の経路である。

次に車両 B が乗客 3 を乗せる場合を考える。当初の乗客 2 の目的地への到着時刻は 4 であり、(乗客 2—乗車, 乗客 3—乗車, 乗客 2—降車, 乗客 3—降車) という順序の際に、乗客 2 の目的地への到着時刻が 6 で、最大遅延可能時間に関する制約を満たしており、かつ、乗客 3 の目的地への到着時刻が 8 で最も早いため、車両 B に乗車する場合の乗車、降車の順序となる。車両 A の場合と同様に、Figure 2-2 の点線がこの際の経路である。

最後に車両 A に乗車する場合と車両 B に乗車する場合を比較し、車両 A に乗車する方が乗客 3 の目的地への到着時刻が早いため、車両 A の割り当てが決定される。

なお、前述したように、車両の割り当ては、一度決定したら変更されることはなく、新たな乗客からの移動要求が送られてきた場合は、既存乗客への車両の割り当ては固定されているものとして、新規乗客への車両の割り当て方を決定する。

2.3.2 駐車場決定方式

車両は、乗車中の乗客がおらず、かつ、今後乗車させる乗客に割り当てられていない際に、いくつか設定されている駐車場のいずれかで待機するよう指示される。

この際、将来の移動需要に対して効率的に対応するには、移動需要が発生した際に、車両が近くの駐車場で待機していることが重要となる。これを実現させるためのアプローチとして、本節で提案する方式では、移動需要が多く見込まれるエリアの駐車場に待機する車両が多くなり、移動需要があまり見込まれないエリアの駐車場に待機する車両が少なくなるように、待機する駐車場を決定する。

まず、以下により、待機を指示する時刻における各駐車場の移動需要の観点からの重みを求める。

$$weight_i(t) = \sum_j \frac{travel\ demand_j(t + t_{ij})}{distance_{ij}} + random\ travel\ demand(t)$$

i は駐車場、 j は需要発生位置、 t は時刻を示している。 $travel\ demand_j(t)$ は時刻 t において、対象エリア全体で発生すると予測されている需要の量に対する、位置 j に発生すると予測されている需要の量の割合であり、前提とする需要予測情報から求められる。 t_{ij} は駐車場 i から位置 j まで車両が走行するのに要する時間、 $distance_{ij}$ は駐車場 i と位置 j の距離を示している。重みの計算において $travel\ demand_j(t + t_{ij})$ としているのは、ある地点での需要発生を見越して、前もって駐車場で待機させるためである。ま

た、 $random\ travel\ demand(t)$ は時刻 t において、対象エリア全体で発生すると予測されている需要の量に対する、ランダムに発生すると予測されている需要の量の割合であり、これも前提とする需要予測情報から求められる。

以上より、この重みは需要が大きいと予測される位置に近い駐車場ほど大きくなる。次に以下により各駐車場の優先度を求める。

$$preference_i(t) = \frac{weight_i(t)}{\sum_i weight_i(t)} carNum(t) - allocatedNum_i(t)$$

$carNum(t)$ は時刻 t において駐車場に待機するよう指示される車両の数を、 $allocatedNum_i(t)$ は時刻 t において駐車場 i に待機するよう指示されている車両の数を示している。優先度は重みが大きいほど大きくなり、その駐車場に待機するよう指示されている車両の数が大きいほど小さくなる。

そして、この優先度が最も大きい駐車場に対して車両を割り当てて、待機する駐車場として選択する。すなわち、駐車場に待機する車両数の比率が、上で求めた重みの比率にできるだけ近くなるように駐車場を選択することになる。

なお、説明した処理は、駐車場に移動中の車両や駐車場で待機中の車両に対しても実行される。このため、ある駐車場に向かっている途中に、別の駐車場の近くで大きな移動需要発生が予測される状況になった場合には、向かう駐車場を変更することもある。同様に、駐車場で待機中に、別の駐車場の近くで大きな移動需要の発生が予測される状況になった場合は、待機する駐車場を途中で変更することもある。

また、駐車場で待機中の車両が新規の乗客を割り当てると駐車場に待機している車両数が減少する。これにより、駐車場の優先度に変化が生じるため、移動要求発生の影響を受けて、待機する駐車場が変更になる場合もある。

2.4 ランダムな道路モデルによる評価

2.4.1 評価モデル

現在コミュニティバスが導入されているような地域を想定して評価モデルを設定する。道路形状と存在する施設、駐車場、乗客の移動需要、車両に関するモデルをそれぞれ説明する。

(1) 道路形状

道路形状は 1 辺が 400m の格子を縦横それぞれ 10 個並べたものを基本とする。ただし、そのままでは道路数が多すぎるため、ここから一定の割合で道路を削除した形状としており、30%、50%、70%の割合でランダムに道路を削除した。この際、削除の仕方によってはある地点が極端に不便になることが起こりうる。そこで、それぞれの割合において 5 つの道路形状を作成し、各地点から、後述する施設への平均距離が中間のものとなる道路形状を選択した。今回の道路形状における、各地点から施設への平均距離は、削除割合が 30%、50%、70%のものについて、それぞれ 3.2km, 5.1km, 6.0km である。

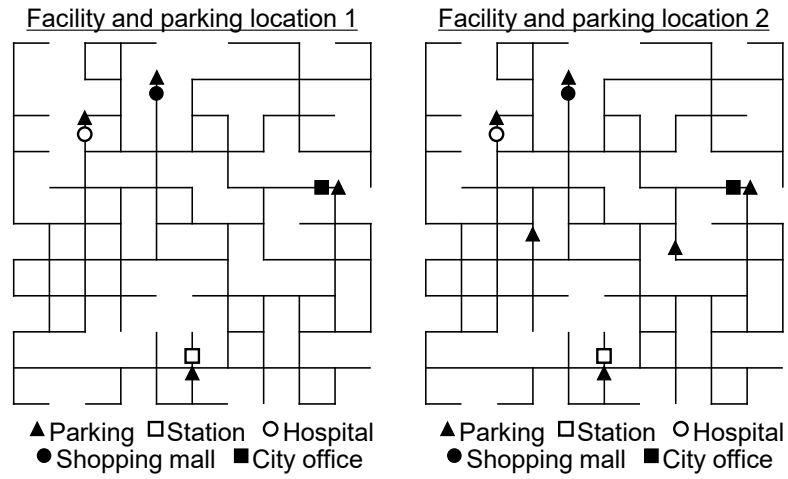
(2) 施設

施設としては、駅、病院、ショッピングモール、役所を想定する。病院、ショッピングモール、役所は駅からある程度離れた地点に存在することを想定する。

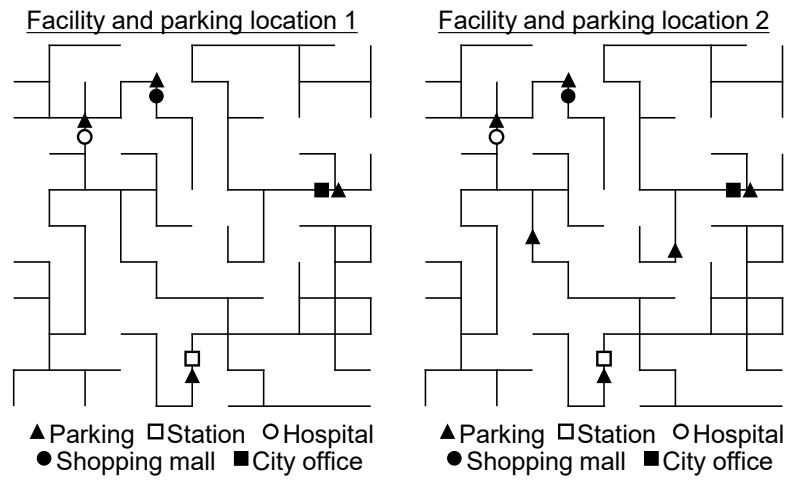
(3) 駐車場

車両の待機場所となる地上設備である駐車場については、施設近辺にのみ存在する場合と駅と他施設の間地点付近にも存在する場合の 2 つの場合で評価した。駐車場は十分に大きいとし、駐車場の台数制限は考えない。

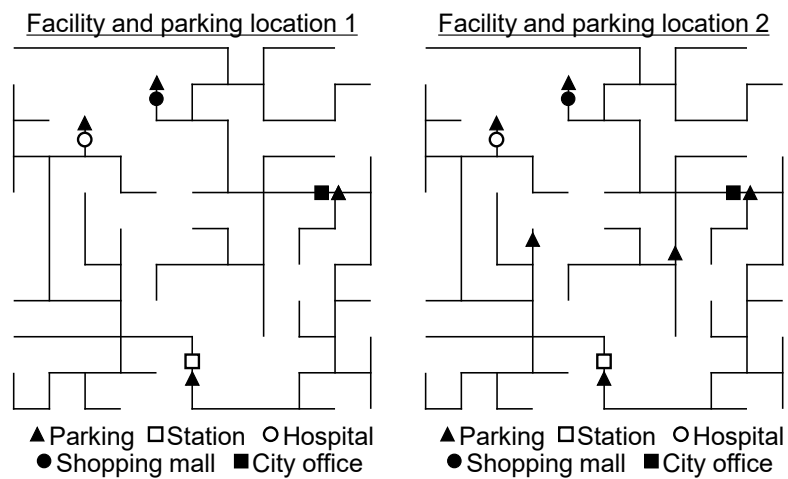
評価に使用した道路形状と施設配置、駐車場配置を Figure 2-3 に示す。



(a) 30% of the roads are removed



(b) 50% of the roads are removed



(c) 70% of the roads are removed

Figure 2-3 Road models and facility locations

(4) 移動需要

移動需要としては Table 2-2 に示す 6 種類を想定した。合計人数は 100 人とし、前記 6 種類の割合と、病院、ショッピングモール、役所の需要における出発地点の割合が Table 2-3 で示される値の場合での評価を行った。以降、各パターンを移動需要パターン 1 のように記す。評価を行った施設配置、駐車場配置と移動需要パターンの組合せを Table 2-4 に示す。

Table 2-2 Types of travel demand

Type	Description
Random	Origin location and destination location are random.
Work	Consists of the following 2 travel demands. ① Origin location is random. Destination location is the station. ② Origin location is the station. Destination location is the origin location of ①. The distribution of ① and ② is (a) or (b). (a) Normal distribution (The mean and standard deviation of ① is 8 o'clock and 30 minutes. The mean and standard deviation of ② is 18 o'clock and 60 minutes) (b) Uniform distribution (The range of ① is from 7 o'clock to 9 o'clock. The range of ② is from 16 o'clock to 20 o'clock)
School	The distribution is basically the same as that of Work. The distribution of ① and ② is (a) or (b). (a) Normal distribution (The mean and standard deviation of ① is 8 o'clock and 30 minutes. The mean and standard deviation of ② is 16 o'clock and 30 minutes) (b) Uniform distribution (The range of ① is from 7 o'clock to 9 o'clock. The range of ② is from 15 o'clock to 17 o'clock)
Hospital	Consists of the following 2 sub-patterns. The ratio is described later. ① Comes from the station and returns to the station. ② Comes from a random location and returns to the same location.

	Travel demand to the hospital is uniform distribution from 8 o'clock to 16 o'clock. The staying time is normal distribution with the mean of 2 hours and the standard deviation of 30 minutes.
Shopping mall	The distribution is basically the same as that of Hospital. Travel demand to the shopping mall is uniform distribution from 10 o'clock to 20 o'clock. The staying time is normal distribution with the mean of 2 hours and the standard deviation of 30 minutes.
City office	The distribution is basically the same as that of Hospital. Travel demand to the city office is uniform distribution from 9 o'clock to 17 o'clock. The staying time is normal distribution with the mean of 30 minutes and the standard deviation of 10 minutes.

Table 2-3 Travel demand patterns

Pattern	1	2	3	4
Random	0.15	0.4	0.15	0.4
Work	0.05	0.05	0.05	0.05
School	0.1	0.1	0.1	0.1
Hospital	0.2	0.1	0.2	0.1
Shopping mall	0.4	0.25	0.4	0.25
City office	0.1	0.1	0.1	0.1
Starting point to facilities	Station: 0.5 Random: 0.5	Station: 0.5 Random: 0.5	Station: 0 Random: 1	Station: 0 Random: 1

Table 2-4 Facility location and travel demand pattern in each case

Case	1	2	3	4	5	6	7	8
Facility and parking location	1	2	1	2	1	2	1	2
Travel demand pattern	1	1	2	2	3	3	4	4

(5) 車両

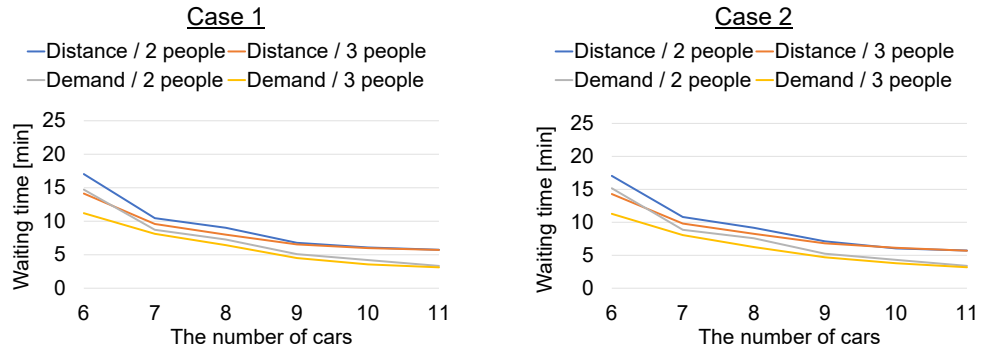
通常時のタクシーの速度は 20km/h 前後、降車時間は 60 秒強である[43]。今回は乗り降りに要する時間を考慮に入れていないため、速度を若干遅めに 18km/h と設定する。台数は 7 台から 12 台、乗合可能人数は 2 名と 3 名、乗合いを行う際の最大遅延可能時間は 100 秒の場合で評価した。

2.4.2 結果

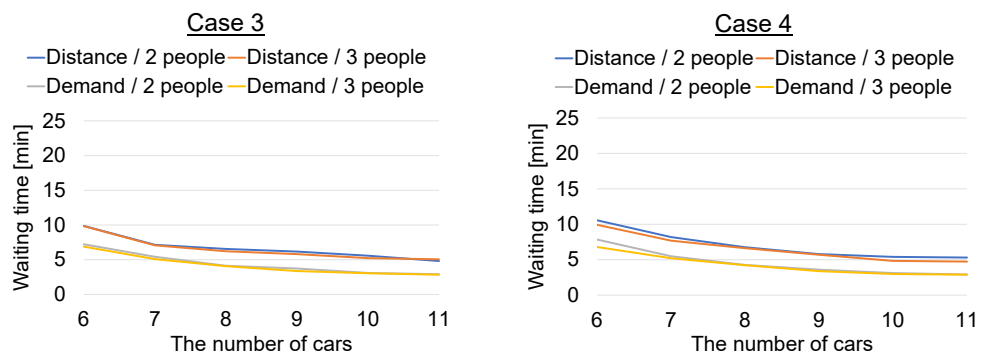
前記したモデルに関して、2.3 節で示した方式についてシミュレーションによる評価を行った。また比較のために、待機する駐車場として、車両に最も近い駐車場を選択する方式での評価も行った。道路削減率が 50%で、通勤と通学の需要が正規分布で発生する際の乗客の平均待ち時間の変化を Figure 2-4 に示す。

凡例の「距離 (distance)」は前記した車両に最も近い駐車場を選択する方式、「需要 (demand)」は 2.3.2 節で示した駐車場決定方式での結果であることを示している。同じく凡例の「2 名」「3 名」は乗合可能人数を示している。

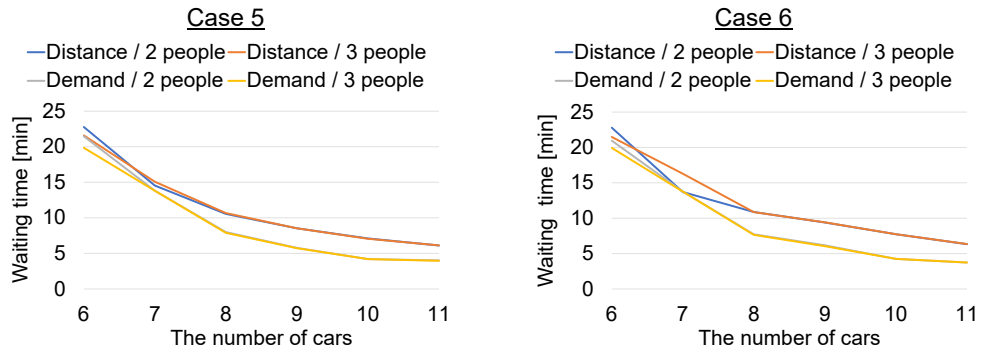
また、道路削減率が 30%、50%、70%の各場合における、車両台数が 8 台、乗合可能人数が 3 名の際の乗客の平均待ち時間を Figure 2-5 に示す。ここでは、移動需要を 5 回発生させ、各試行における乗客の平均待ち時間の平均と標準偏差を示している。提案方式での平均待ち時間は、車両に最も近い駐車場を選択する方式と比べると、道路削減率が 30%の場合に平均 27.4%、50%の場合に平均 26.5%、70%の場合に平均 25.4%、それぞれ減少している。



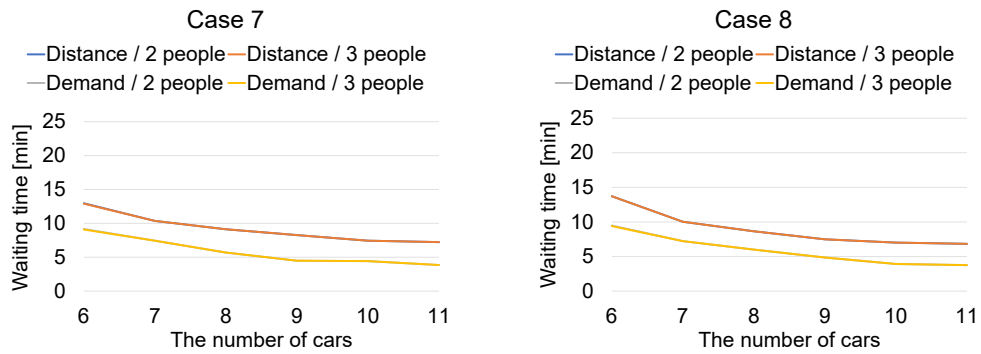
(a) Travel demand pattern 1



(b) Travel demand pattern 2

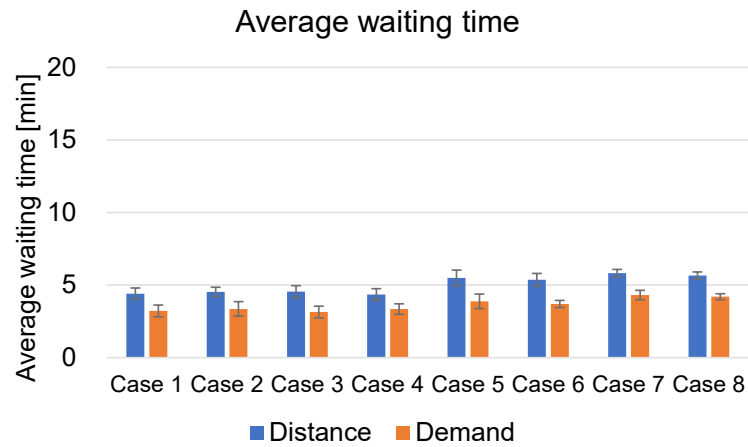


(c) Travel demand pattern 3

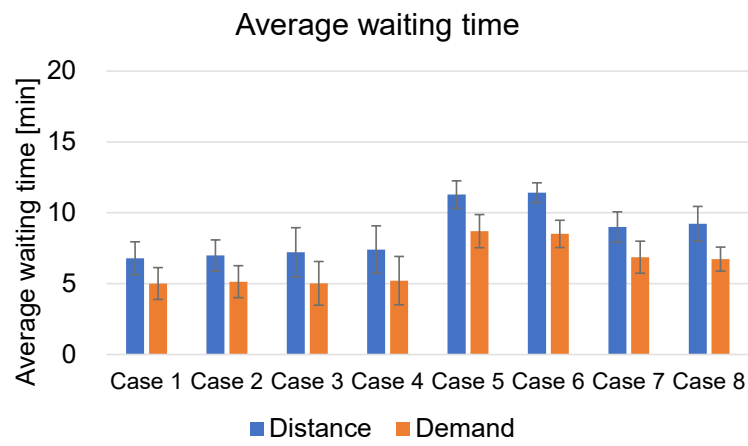


(d) Travel demand pattern 4

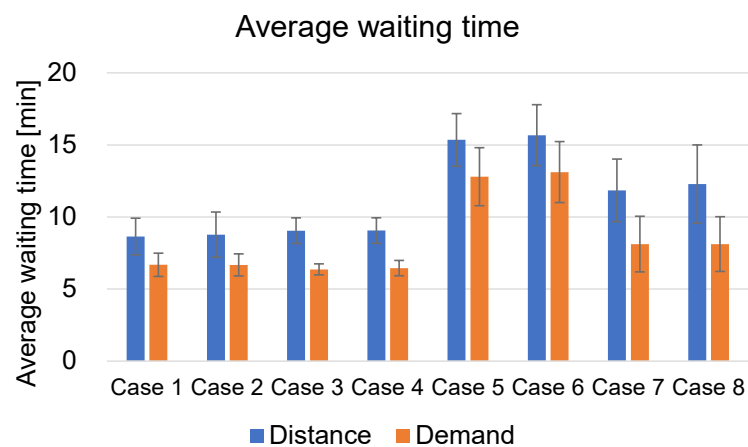
Figure 2-4 Simulation results (50% of the roads are removed / The distributions of commute demands are normal distribution)



(a) 30% of the roads are removed



(b) 50% of the roads are removed



(c) 70% of the roads are removed

Figure 2-5 Simulation results (The distributions of commute demands are normal distribution)

次に、車両台数が 8 台、乗合可能人数が 3 名、道路削減率が 50%、通勤と通学の需要が一様分布の際の乗客の平均待ち時間を Figure 2-6 に示す。上記と同様に、移動需要を 5 回発生させ、各試行における乗客の平均待ち時間の平均と標準偏差を示している。提案方式での平均待ち時間は、車両に最も近い駐車場を選択する方式と比べると、平均 30.3%減少している。

最後に、車両台数が 8 台、乗合可能人数が 3 名、道路削減率が 50%、通勤と通学の需要が正規分布の際の、各駐車場に停車している車両台数とその合計台数の時間変化を Figure 2-7 に示す。ここでは、ケース 1 において車両に最も近い駐車場を選択する方式を取った場合の結果と、ケース 1、ケース 3 において 2.3.2 節で示した駐車場決定方式を取った場合の 3 つの結果を示している。

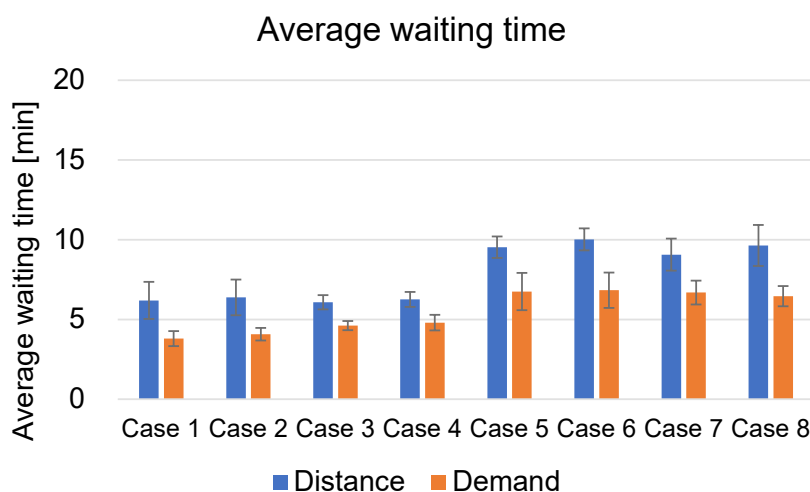
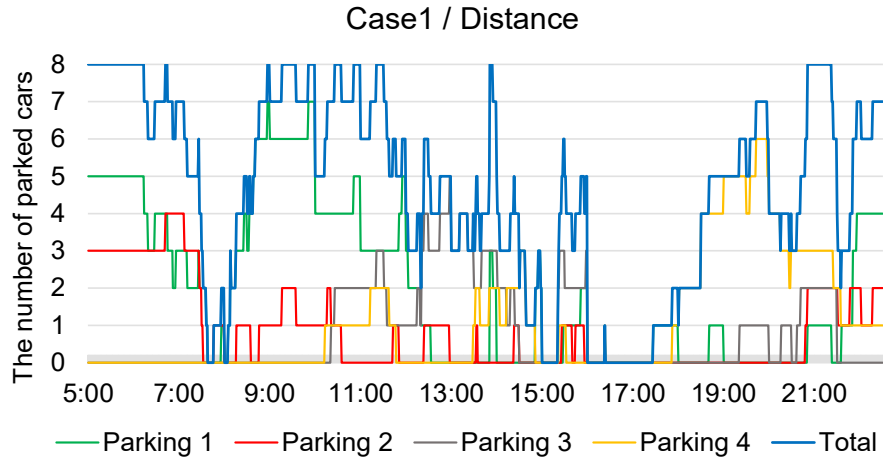
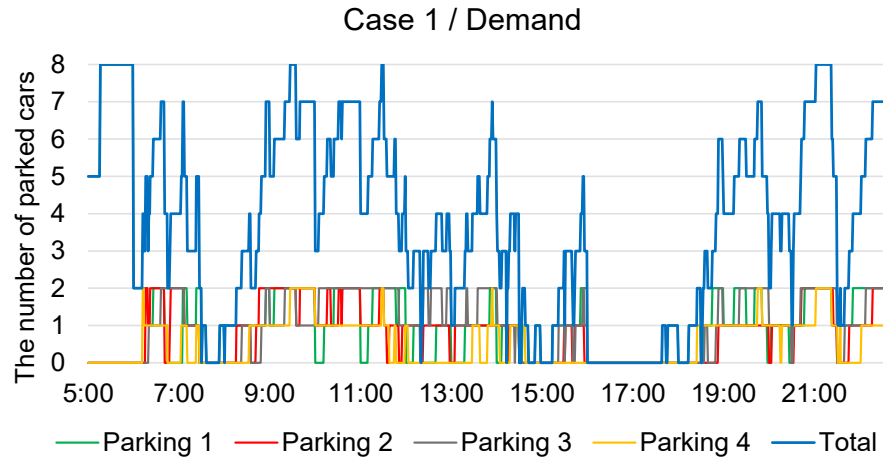


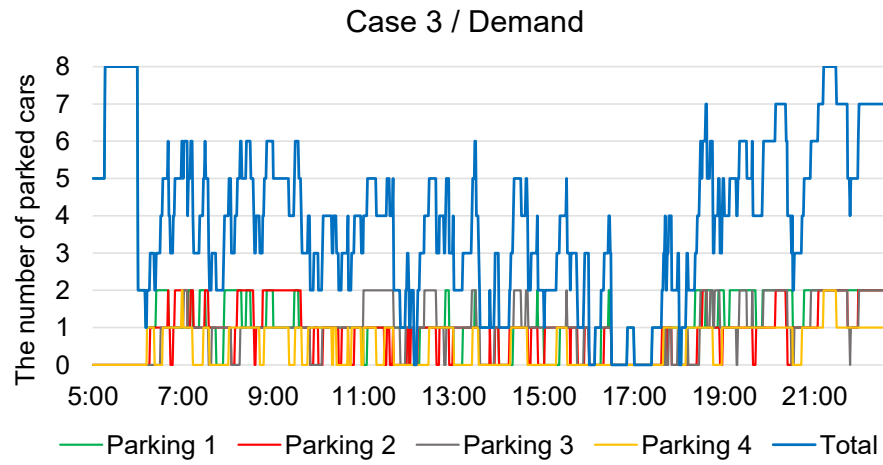
Figure 2-6 Simulation result (The distributions of commute demands are uniform distribution)



(a) Case1 (Method using only distance information)



(b) Case1 (Proposed method)



(c) Case 3 (Proposed method)

Figure 2-7 Usage of parking lots

2.5 実際の道路形状に基づいた道路モデルによる評価

2.5.1 評価モデル

前節ではランダムに生成した道路モデルを用いて、提案方式の評価を行ったが、本節では日本国内の実際の道路形状ならびに施設配置に基づいた道路モデルを作成し、これを用いて提案方式の評価を行う。

実際の道路形状は OpenStreetMap のデータを使用し、車道の情報を抽出する。エリアの広さは前章と同様に 4km 四方とする。そして、抽出した道路形状を 50m メッシュの道路形状で近似する。

近似方法を Figure 2-8 を用いて説明する。実際には 4km 四方の広さなので、50m メッシュが縦横それぞれ 80 個並ぶが、ここでは図示の便宜上、縦横それぞれ 3 個並べたもので説明する。

Figure 2-8 での破線が実際の道路形状の一部、①、②がその端点を示している。A～P は 50m メッシュの道路形状のノードを示している。

まず、実際の道路形状の端点と、これに最も近い 50m メッシュの道路形状のノードとを対応付ける。すなわち、①に対応づくノードは A、②に対応づくノードは K になる。次に、対応付けられたノードを結ぶ最短経路を実際の道路形状に対応付ける。最短経路が複数存在する場合は任意の経路を対応付ける。Figure 2-8 においては、例えば A-E-F-J-K という経路が対応付けられる。

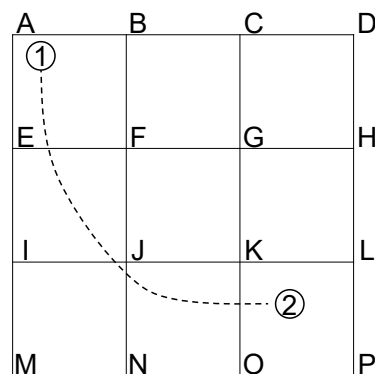
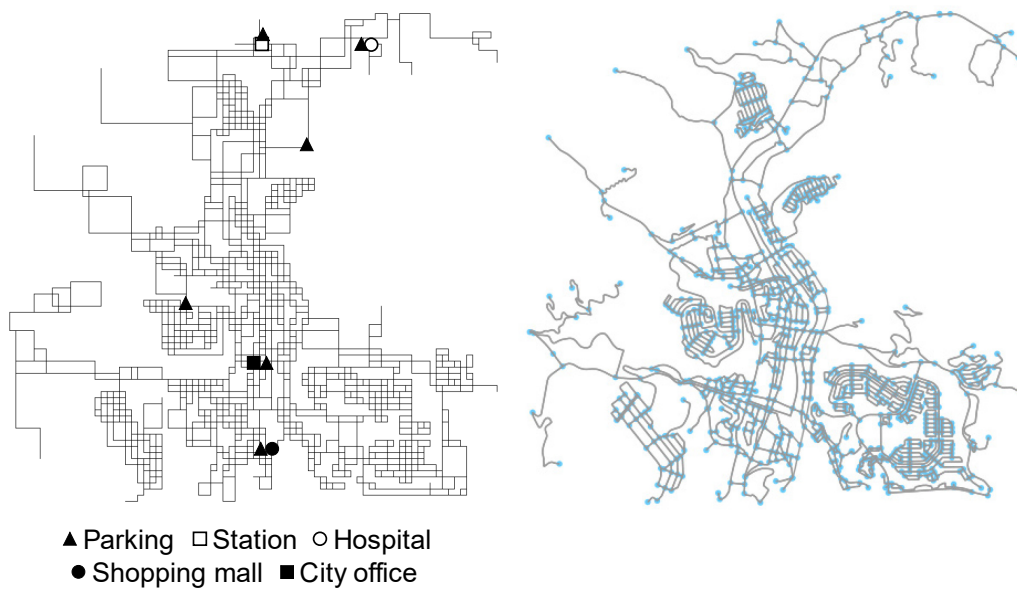


Figure 2-8 Approximating method of road model



(a) Road model 1



(b) Road model 2

Figure 2-9 Road models based on actual road networks

このようにして、実際の道路形状と 50m メッシュの道路形状との対応付けを行い、50m メッシュの道路形状の中で、実際の道路形状と対応付けられなかった経路を削除した道路形状を評価に使用する。なお、2.4.1 節と同様に、駐車場は十分に大きいとし、駐車場の台数制限は考えない。

評価に使用した道路モデルと、基とした実際の道路形状を Figure 2-9 に示す。図の

右が実際の道路形状、左が 50m メッシュ道路形状である。各地点から施設への平均距離は、Road model 1 が 2.8km, Road model 2 が 3.3km となっており、2.4.1 節で示したランダム作成の場合の 30%削減の道路形状に近いものに相当している。

2.5.2 結果

前記したモデルに関して、2.3 節で示した方式についてシミュレーションによる評価を行った。ここでは、車両台数は 8 台、乗合可能人数は 3 名とし、移動需要を 5 回発生させ、各試行における乗客の平均待ち時間の平均と標準偏差を求めた。また比較のために、待機する駐車場として、車両に最も近い駐車場を選択する方式での評価も行った。方式による乗客の平均待ち時間の違いを Figure 2-10 に示す。

提案方式での平均待ち時間は、車両に最も近い駐車場を選択する方式と比べると、Road model 1 の場合に平均 46.4%, Road model 2 の場合に平均 41.0%, それぞれ減少している。

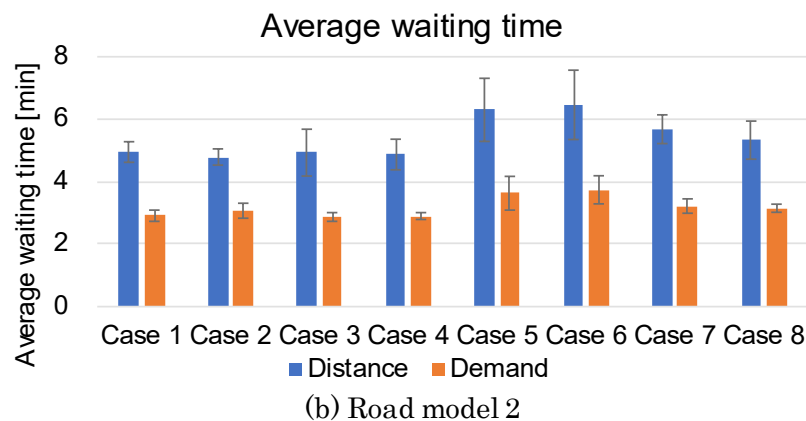
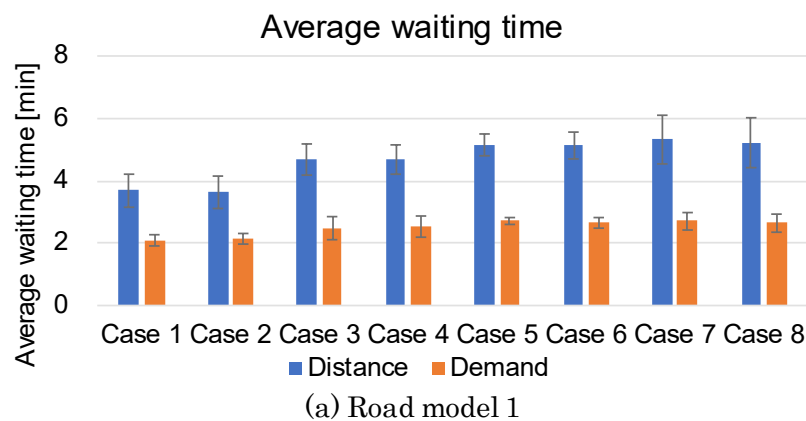


Figure 2-10 Simulation results

道路形状毎に比べると、施設からの平均距離が短い Road model 1 の方が、どの Case においても、平均待ち時間が 2%から 30%短くなっている。平均距離が 3.2km であった前節の道路削減率 30%のランダムモデルと比べると、平均距離 2.8km の Road model 1 ではわずかに待ち時間が短縮されている。また、平均距離 3.3km の Road model 2 では、車両に最も近い駐車場を選択する方式ではわずかに待ち時間が増加する場合が多く、一方、提案方式ではわずかに待ち時間が短縮されている。

2.6 考察

2.6.1 車両台数による待ち時間の違い

いずれのケースにおいても基本的には提案方式での待ち時間が小さくなっているが、Figure 2-4 に示すように、待ち時間が 15 分から 20 分を超えるような車両台数の場合は、配車方式の違いによる待ち時間の差は小さく、むしろ、乗合可能人数の違いによる差の方が大きい。逆に、待ち時間がこれらを下回るような車両台数の場合は、乗合可能人数による差は小さくなり、配車方式の違いによる差が大きくなっている。

これは、車両台数が一定の数より少ない場合は、駐車場に待機している時間が短くなるため配車方式による効果が出なくなり、また、乗車要求が発生した際に、駐車場に待機して余っている車両が存在することが少なく、乗合可能人数による影響が大きくなるためであると考えられる。

逆に、車両台数が一定の数より多い場合は、駐車場に待機している時間が長くなるため配車方式による効果が現れ、また、乗車要求が発生した際に、駐車場に待機して余っている車両が存在することが多く、乗合可能人数による影響が小さくなるためであると考えられる。

2.6.2 移動需要パターンによる待ち時間の違い

Figure 2-4 に示すように、移動需要パターン 2 や移動需要パターン 4 のようにランダムな移動需要の割合が大きい方が、車両台数が少ない場合においても待ち時間が 30%程度小さくなっている。

これは、ランダムな移動需要の割合が小さくなると移動需要の偏りが大きくなるが、

人数に対して車両台数が少ない場合には、この偏りに対応できるような形で予め配車することができず、待ち時間が大きくなるためであると考えられる。逆にランダムな移動需要の割合が大きい場合は、ある乗客の目的地の近くに他の乗客の出発地が存在することが比較的多くなるため、車両台数が少なくても効率的な移動が可能であることが考えられる。

Figure 2-6 に示すように、通勤、通学の移動需要を正規分布から一様分布に変化させた場合でも、待ち時間の傾向は変わらず、分布の種類は大きな影響を与えないと考えられる。

2.6.3 駐車場配置による待ち時間の違い

Figure 2-4 に示すように、今回は駐車場の配置による違いはあまり見られなかった。提案方式においては、主な需要の発生元である施設に隣接した駐車場を選択することが多く、車両に最も近い駐車場を選択する方式においては、主な目的地である施設に隣接した駐車場を選択することが多い。このように、双方の方式において、施設に隣接した駐車場が選ばれることが多く、施設の中間に位置する駐車場で待機するケースが少ないため、駐車場の配置による違いがあまり見られなかったと考えられる。

2.6.4 道路削減率、道路モデルによる待ち時間の違い

Figure 2-5 に示すように、道路削減率によって全体的な待ち時間の増減は見られたが、ケースや駐車場決定方式による差異についての傾向は大きくは変わらなかった。

また、待ち時間は、各地点から施設への平均距離におおよそ比例している。道路削減率 30%、50%、70%の道路モデルにおける各地点から施設への平均距離の比は 1:1.6:1.9 であり、車両台数が 8 台、乗合可能人数が 3 名の場合の各ケースの待ち時間の比の平均は 1:1.7:2.3 であった。

実際の道路形状に基づいた道路モデルでも、ランダムに作成した道路モデルと同様に、待ち時間は各地点から施設への平均距離におおよそ比例している。上記と同じく道路削減率 30%の道路モデルを基準とした場合の Road model 1 と Road model 2 の各地点から施設への平均距離の比は 1:0.88:1.02 であり、車両台数が 8 台、乗合可能人数が 3 名の場合の各ケースの待ち時間の比の平均は 1:0.81:0.98 であった。

2.6.5 駐車場使用状況

Figure 2-7 に示すように、駐車場使用状況については、提案方式の方が使用している駐車場が分散しており、また、駐車場に止まっている車両が少ない。駐車場の分散については、駐車場決定の際に距離のみを使用する場合は、例えば通勤、通学時間帯に駅への移動需要が集中する際に、多数の車両が同一の駐車場を使用していることが考えられる。逆に、提案方式では需要予測に応じて駐車場を決定するが、今回評価したケースでは比較的需要在分散しているため、使用する駐車場も分散していると考えられる。提案方式の場合の方が駐車場に止まっている車両が少ない理由としては、提案方式においては必ずしも自身から近い駐車場を決定するとは限らず、駐車場に向かうために走行している時間が長いということと、2.3.2 節でも述べたように、駐車場に停まっていたとしても、状況の変化により駐車場間を移動する場合があるということの2つが考えられる。

2.7 結言

本章では、乗客の待ち時間短縮を目的として、需要予測情報を用いて待機する駐車場を決定する乗合タクシーの配車方式を提案した。提案方式では、需要予測情報に基づいて駐車場の重みを求め、重みに比例する形で、乗客に割り当てていない車両を駐車場に待機させる。これにより、将来、需要が発生した際に、素早く乗客を迎えに行くことを狙いとしている。提案方式を、ランダムな道路モデルと実際の道路形状に基づいた道路モデルの双方においてシミュレーションにより評価し、乗客が割り当てていない車両を、最も近い駐車場に待機させる方式と比較して、乗客の待ち時間が25.4%から46.4%短縮できることを確認した。

提案方式では、乗り合いの際の最大遅延可能時間は一律としていたが、実際には乗客の状況によって許容される遅延時間は異なることが考えられる。今回は、乗客が移動したいタイミングで要求を送る前提としているが、例えば駅から移動する際には、列車の到着時間に合わせて前もって要求を送りたいケースも考えられる。また実適用に向けては、利便性のみならず、運用コストなど含めた費用対効果の観点で、本方式が効果的となる条件を明確化することも課題となる。

第3章

車両とドローンの連携による宅配荷物の 配送計画立案の近傍探索方式

3.1 緒言

本章では、荷物配送の要求への効率的な対応に関して、配送時間帯指定を考慮した、車両とドローンの連携による宅配荷物の配送計画の立案方式を提案する。提案方式は、配送途中での荷物の再配達や集荷要求の追加に対応できるよう、効率的な計画を短時間で立案することを狙いとする。

近年の e コマース市場の拡大に伴い、宅配便の取扱量は増加の一途を辿っている。特に国内では少子高齢化の流れもあり、宅配ドライバーの人手不足が深刻な問題になり始めている[5]。この解決手段の 1 つとして、特に、交通の便が悪い山間部や離島において、ドローンの活用が期待されており、各地で実証実験が進められている[9][10]。また、このような取り組みは海外でも多数行われており[44][45][46]、世界的な潮流になり始めている。

ドローンを活用することにより、宅配荷物を無人で宅配先に運ぶことが可能となり、宅配荷物の配送の効率化が期待できる。しかし、現状では、荷物の配送のみは無人で行うことができるものの、荷物の搭載やバッテリーの交換を考慮すると、実際の運用においては人手が必要とされることが多い。

荷物の搭載やバッテリーの交換について、ドローンの離着陸場毎に専任の担当者を充てて対応することもできるが、ドローンの離着陸場の数だけ担当者が必要となってしまう、コストや要員確保の面でのメリットが得られず、当初の目的である宅配荷物の配送の効率化が実現できない。

このため、宅配ドライバーが荷物を配送しながら、適宜、車両とドローンの結節点となるドローンの離着陸場を訪れ、車両に搭載した荷物をドローンに載せ替えることにより、1 名の宅配ドライバーが車両とドローンの双方を用いて配送を行う方式が考えられる。

また、宅配便の利用の増加に伴い、再配達される荷物も増加しており、これによる損失が社会課題になり始めている。例えば、2015 年段階での国内における再配達による社会的損失は、CO₂ 排出量に関して年間約 42 万トン、労働力に換算して年間約 9 万人にのぼるとされている[47]。国土交通省が 2015 年に実施した、宅配便で再配達をした利用者のアンケート調査結果によると、1 回目の配達で受け取れなかった理由としては、「配達が来るのを知らなかった」が約 42%で最も多くなっている[48]。このため、再配達減少のためには配送時間帯が指定できることが重要であり、車両とドローンを用いて配送を行う際にも、配送時間帯指定を考慮した形での計画立案が求められる。

車両とドローンを用いて配送を行う際に、配送箇所とドローンの離着陸場の最適な訪問順序を決定する方法としては、総当たりによるものが考えられるが、訪問順序の場合の数は非常に大きく、荷物の数によっては 1 日で計算が終わらないため、実運用に適用することは難しい。そこで、ドローンを利用した配送計画問題に対して、配送時間帯指定の無い場合については、ヒューリスティックな手法が多く報告されている。しかし、配送時間帯指定のある場合の配送計画に対しては、訪問順序の場合の数を少なくするために、ドローンは離陸した場所と同じ場所には着陸できない、同じ場所から 2 回以上離陸できないなど、地上設備の扱いについて不自然な制約を設けた計画手法が提案されているが[13]、実用的でない。

このため、本章では配送時間帯の指定が存在する場合における、車両とドローンを組み合わせた形の効率的な宅配荷物の配送方式を提案する。以下では、まず 3.2 節で対象とする問題の定義を述べる。そして、3.3 節で提案方式を説明する。続いて 3.4 節で実験の結果を示し、考察を行う。

3.2 車両・ドローン連携による宅配荷物配送計画立案問題

本論文では車両 1 台とドローン 1 台の組合せを対象とする。

1 日における配送開始時刻と配送終了時刻が存在し、また、配送先の中には、配送時間帯が指定されているものも存在する。指定される配送時間帯は、1 日における配送開始時刻と配送終了時刻の間の時間帯が設定される。

荷物の個数や配送時間帯の指定のされ方によっては、全ての荷物を指定時間帯に配

送可能な計画が求まらない場合もある。このような場合には、事業者が、求められた配送計画を見て、その計画を採用するか、その日の配送荷物を減らすかなどの判断をすることを想定する。このため、ここでは全ての荷物が指定された時間帯に配送できない場合も実行可能解として認めるとする。そして、指定時間帯内に配送できる荷物の個数が最大となる解を求める。また、指定時間帯内に配送できる荷物の個数が最大となる解が複数存在する場合は、この中から所要時間が最小となる解を求める。

住居は一般には通行量が多い道路付近に多く存在し、ここから離れるほど疎に存在する。そして、配送要求も同様の傾向で存在すると想定される。このため、配送要求の配置の基準となる道路（以下、幹線道路）を設定し、これを元に配送要求を配置する。

従来研究においては、配送要求に応じて、ある住居に車両で配送するか、ドローンで配送するかを動的に決定するものもある。しかし、実際にドローンで配送される荷物を受け取るには離発着陸場の設置などの何らかの設備や準備が必要になるため、車両で配送するか、ドローンで配送するかを動的に決定することは運用面で難しいと考えられる。このため、車両で配送するエリアとドローンで配送するエリアは予め固定されているとする。

ここで、基本的には、配送要求の密度が大きいエリアが、車両での配送が有利であり、配送要求の密度が小さいエリアがドローンでの配送が有利である。本章の問題設定では、住居は一般には幹線道路付近で多く存在し、ここから離れるほど疎に存在するという想定のもとで配送要求を配置しているため、幹線道路から距離が近いエリアが配送要求の密度が大きいエリアに対応する。このため、幹線道路からの距離によって車両で配送するエリアとドローンで配送するエリアを分割し、幹線道路からの最小距離が閾値以内のエリアは車両で配送するエリア、幹線道路からの距離が閾値を超えるエリアはドローンで配送するエリアとする。

車両は配送センターを出発し、担当分の荷物の配送が完了すると配送センターに戻る。ドローンは、車両に搭載された状態で配送センターを出発してもよいし、最初の荷物を搭載した状態で単独で配送センターを出発してもよい。また、車両に搭載された状態で配送センターに戻ってもよいし、最後の荷物を配送した後に単独で配送センターに戻ってもよい。

車両は自身が1日に配送する荷物と、ドローンが1日に配送する荷物を搭載可能と

する。すなわち、車両が配送開始時に配送センターを出発した後は、配送が完了するまで、荷物の回収のために配送センターに立ち寄る必要は無い。

一方、ドローンが一度に搭載可能な荷物は1つとする。すなわち、荷物を配送する度に、次に配送する荷物を車両から積み替える必要がある。実際には積載量の制約で、ドローンでは配送できない荷物も存在するが、最近では、通常の宅配には十分と思われる30kgを超える積載量を備えたドローンが開発されるなど、積載量が問題になることは少なくなっているため、ドローンで配送できない荷物の存在は想定しない。また、航続可能距離も伸びているため、対象エリア内では航続距離の制約は存在しないとする。電池の交換も車両の運転手が荷物の積載時に適宜行うものとし、電池切れは起こらないとする。

ドローンが離着陸するには一定のスペースが必要になるため、ドローンは予め定められた離着陸場、もしくは、配送センターのみで離着陸できるとする。ドローンへの荷物の搭載は人手で行うことを想定し、ドローンが離陸する際には車両のドライバーがドローンの離着陸場に存在しているとする。なお、ドローンは離陸した場所と同じ場所に戻ってもよいし、別の場所に戻ってもよい。また、同じ離着陸場を何度使用してもよい。

以上纏めると、本問題は、車両による配送要求の位置と配送指定時間帯、ドローンによる配送要求の位置と配送指定時間帯を入力とし、配送指定時間帯内に配送可能な荷物の個数が最大となり、配送指定時間帯内に配送可能な荷物の個数が最大となる解が複数存在する場合は、この中から、所要時間が最小となるような解を求める問題となる。ここで、求められる解は、車両が、配送要求、もしくは、ドローンの離着陸場を訪問する順序と、ドローンが、配送要求、もしくは、ドローンの離着陸場を訪問する順序によって構成される。なお、上述したように、車両とドローンは同じ離着陸場を何度訪れてもよい。

本問題は時間制約付き巡回セールスマン問題を拡張したものとなり、NP 困難な問題に属するため、厳密解を求めるための計算量は非常に大きくなる。このため、リアルタイムに発生する要求への対応も可能な計算量で効率的な解を求めることが課題となる。

3.3 ドローン併用近傍探索方式

3.3.1 アプローチ

車両のみを対象とした時間制約付き配送計画問題を高速に求める解法として、最近傍法[49]で初期解を求め、その後、少しずつ解を変更することにより、解を改良させるものがある[50][51]。

最近傍法は、各段階で残された配送要求毎の重みを求め、重みが最小となる配送要求を次に訪問する箇所として選択する形で、時系列に解を生成する。この方式により、短い計算時間で解を求めることができ、荷物の再配達や集荷要求の追加のようなリアルタイムな要求の変化への対応は容易であるが、車両のみを対象とした配送計画問題を対象としているため、車両がドローンの離着陸場を訪れるタイミングは別途検討する必要がある。

最近傍法では、車両が配送箇所に到達するまでの時間と、配送指定時間帯などの関係から優先して訪れるべき配送箇所を決定するが、本節で提案する方式では、これに、車両がドローンの離着陸場に到達するまでの時間と、ドローンがドローンの離着陸場に到達するまでの時間を考慮に加える形で、配送箇所とドローンの離着陸場の中で優先して訪れる箇所を決定する。これにより、車両による配送とドローンによる配送をバランスよく行い、効率的に配送することを狙う。

3.3.2 初期解の生成

まず、元となる最近傍法での各段階での配送要求毎の重みについて記す。最近傍法では、 b_i^v を配送要求 i の配送指定時間帯の開始時刻、 e_i^v を配送要求 i の配送指定時間帯の終了時刻、 r_i を車両が配送要求 i まで移動するのに要する時間、 t を現在時刻とした場合に、各段階での配送要求毎の重みを以下で求める。

$$weight_i = \max(b_i^v - t, r_i) \cdot (e_i^v - t)$$

そして、重みが最小となる配送要求を次に訪問する箇所として選択する形で、時系列に解を生成する貪欲法の一つである。

最近傍法の動作を Figure 3-1 を用いて説明する。図の左側は、時刻 t_a における未配送の配送要求毎の重みを示している。このとき、配送要求①の重みが 100 で最小なの

で、次の訪問箇所として配送要求①を選択する。

図の右側は、配送要求①に到着した際の様子を示している。この際、時刻は t_b となっており、この段階での未配送の配送要求毎の重みを再度計算する。このとき、配送要求③の重みが 90 で最小なので、次の訪問箇所として配送要求③を選択する。

このような動作を全ての荷物を配送し終えるまで繰り返すことによって経路を生成する。

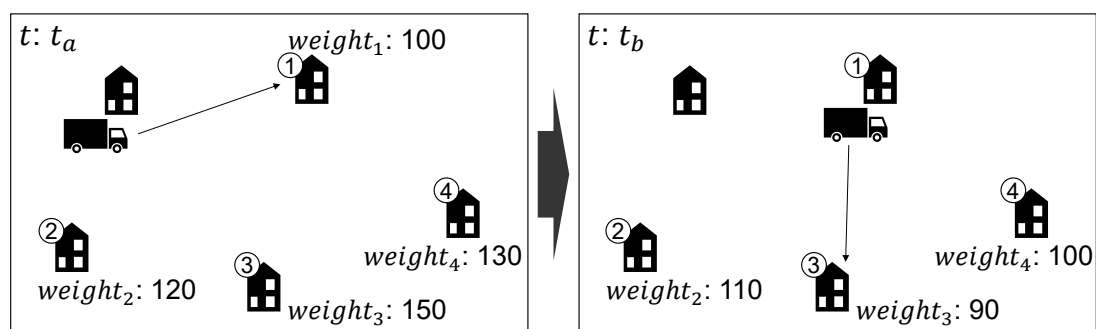


Figure 3-1 Process of nearest neighbor method

なお、上記の重みは概念的には、早く配送可能な要求ほど優先（重みの乗算の第 1 項に対応）して配送し、また、配送期限まで時間的余裕がない要求ほど優先（重みの乗算の第 2 項に対応）して配送するような動作をすると理解することができる。

次に、提案手法における最近傍法の拡張方法について記す。なお、上述の最近傍法は車両による配送のみを対象としているため、今回の問題設定に対応させるためには、車両がドローンの離着陸場に向かい、そこからドローンを飛び立たせる場合と、車両がドローンの離着陸場に向かい、ドローンを回収する場合の検討をする必要がある。

まず、車両がドローンを搭載している際の考え方を Figure 3-2 を用いて説明する。ここでは、未配送の車両による配送箇所の数が L 、ドローンの離着陸場の数が M 、未配送のドローンによる配送箇所の数が N であるとする。

未配送の車両による配送箇所については、最近傍法同様に、配送箇所の数である L 個の重みを計算する。ドローンの離着陸場については、そこからドローンがどの配送箇所に向かうかを含めて重みを計算する。すなわち、1 つのドローンの離着陸場に対して、 N 個の重みが計算できるため、合計で MN 個の重みを計算する。

未配送の車両による配送箇所の重みが最小になる場合は、Figure 3-2 の左下にある

ように、通常の最近傍法と同様、車両は重みが最小となる配送箇所を訪れる。一方、**Figure 3-2** の右下にあるように、ドローンの離着陸場の重みが最小になる場合は、重みが最小となる離着陸場を車両が訪れるとともに、その離着陸場から、重みが最小となった際の配送箇所をドローンが訪れる。

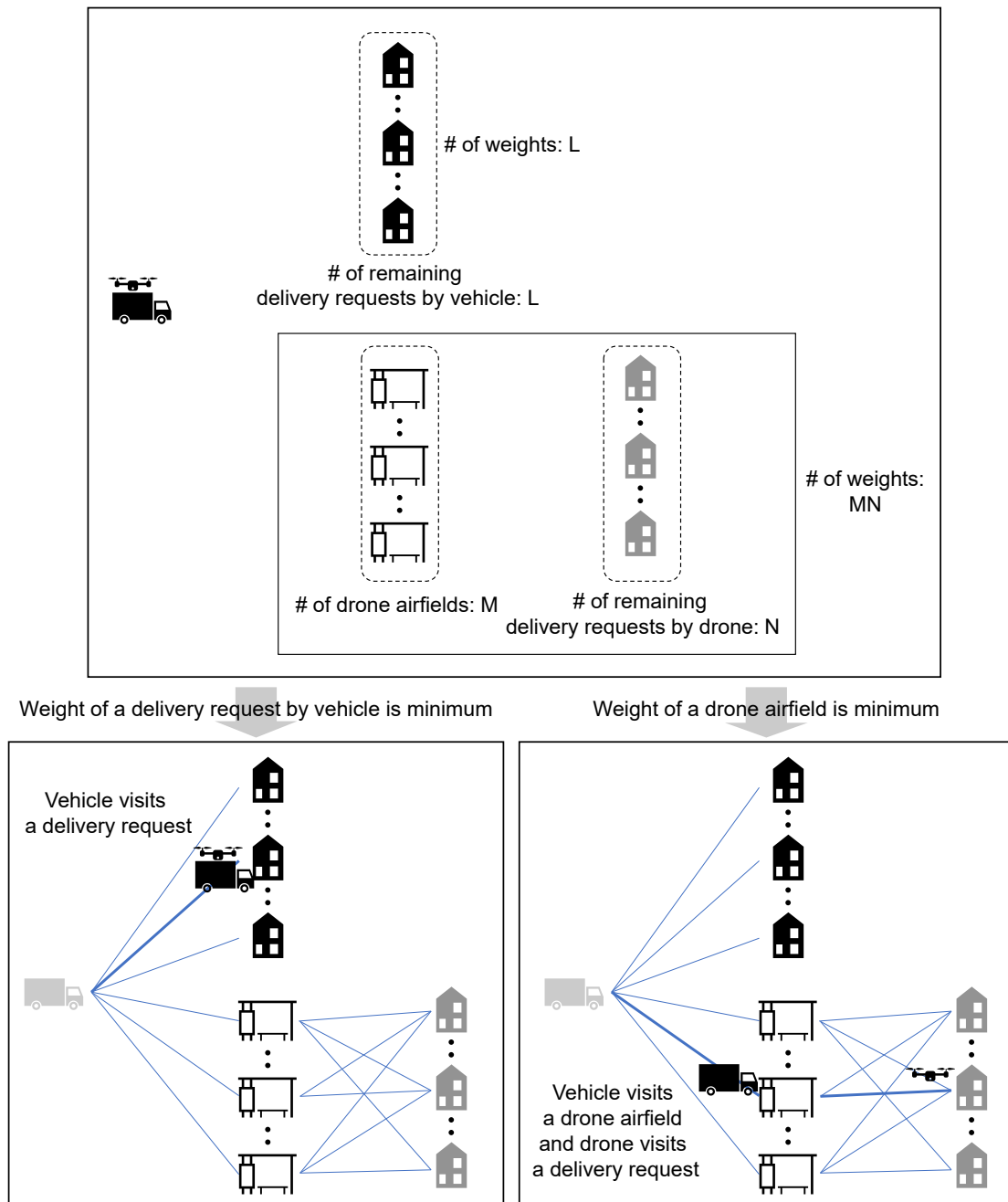


Figure 3-2 Approach to applying the nearest neighbor method
(Vehicle is carrying a drone.)

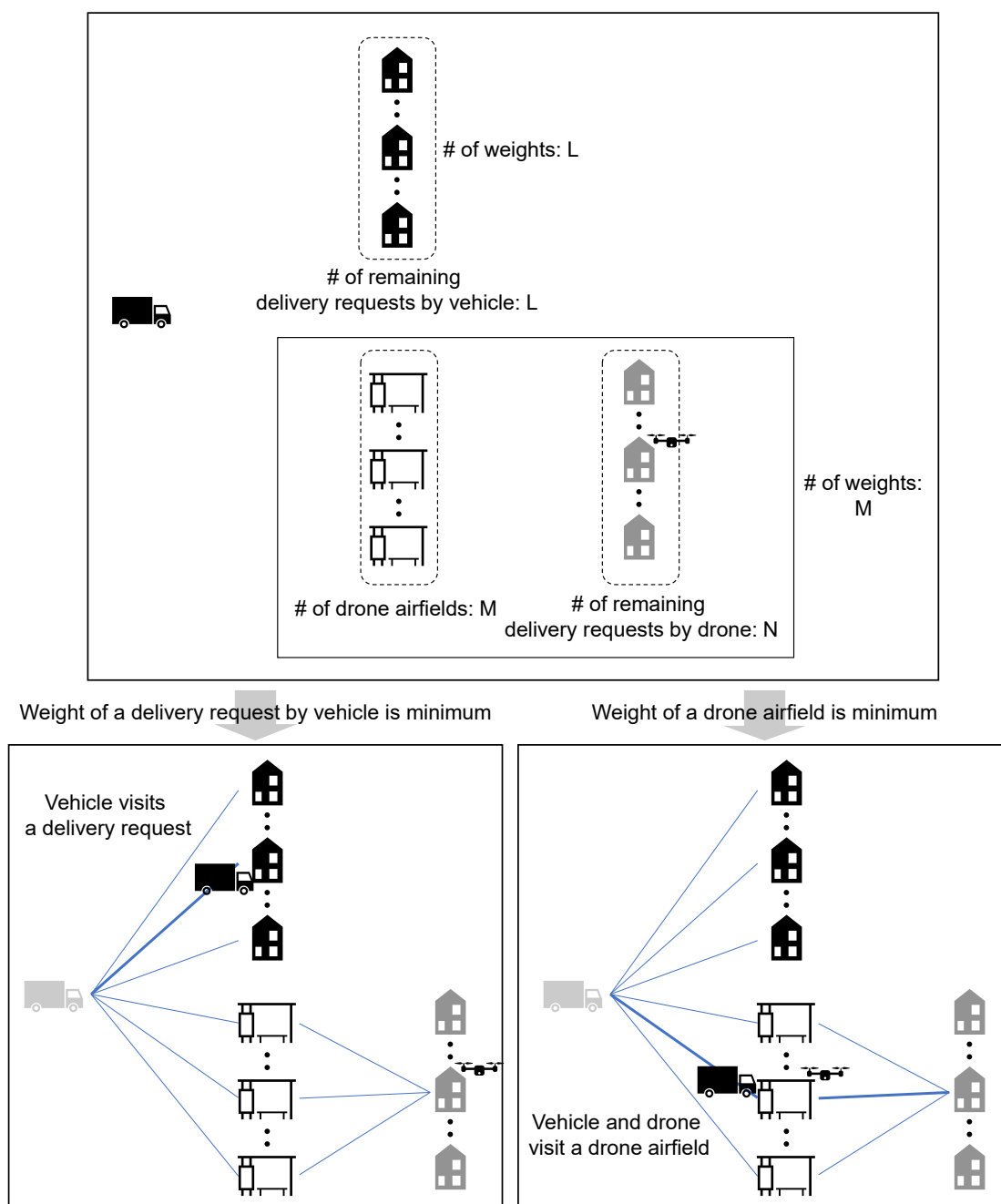


Figure 3-3 Approach to applying the nearest neighbor method
(Vehicle is not carrying a drone)

次に、車両がドローンを搭載していない際の考え方を Figure 3-3 を用いて説明する。未配送の車両による配送箇所の扱いは先程と同様である。ドローンの離着陸場については、ドローンの離着陸場の数である M 個の重みを計算する。そして、Figure 3-3 の右下にあるように、ドローンの離着陸場の重みが最小になる場合は、重みが最小とな

る離着陸場を車両が訪れるとともに、ドローンも同じ離着場を訪れ、ドローンが回収される。

次に重みの設定方法について説明する。

車両がドローンを載せている場合においては、第 1 項での車両が配送要求 i まで移動するのに要する時間である r_i の代わりに、ドローンが離着陸場を介して配送要求まで移動するのに要する時間を用いる方法が考えられる。

ただし、車両の拘束時間の観点からは、車両がドローンの離着陸場まで移動するのに要する時間のみを考えればよく、ドローンが配送要求まで移動するのに要する時間は考慮する必要はない。もし、ドローンが配送要求まで移動するのに要する時間を考慮して重みを設定すると、ドローンの離着陸場が訪問しやすい箇所にあるにも関わらず、訪問する優先度が低くなってしまう。このため、第 1 項での車両が配送要求まで移動するのに要する時間の代わりに、車両がドローンの離着陸場まで移動するのに要する時間を用いて重みを計算する。

また、ドローンの配送要求の配送指定時間帯を用いてドローンの離着陸場の重みを計算した場合、前述したように、1 つの離着陸場に対して、未配送のドローンの配送要求の数だけ重みが計算される。本方式では、重みの小ささが優先度の高さを示しているため、優先度が高くなる離着陸場を訪れることになるように、未配送のドローンの配送要求の数だけ計算される重みの内、最小のものを離着陸場の重みとする。

すなわち、 a_j を車両がドローンの離着陸場 j まで移動するのに要する時間、 b_k^d をドローンによる配送要求 k の配送指定時間帯の開始時刻、 e_k^d をドローンによる配送要求 k の配送指定時間帯の終了時刻とした場合に、以下で重みを求める。

$$weight_j = \min_k \{ \max(b_k^d - t, a_j) \cdot (e_k^d - t) \}$$

そして、ドローンの離着陸場毎に、重みが最小となる配送要求を覚えておき、ドローンを載せている車両の訪問箇所としてドローンの離着陸場が選択された場合は、車両が離着陸場に到着した後、ドローンが離着陸場から対応する配送要求を訪れる。

ただし、車両がドローンを回収したときのように、車両がドローンの離着陸場にいる際は、同じ離着陸場からドローンを離陸させるのが効率的であるため、これを実現するような重みとする。

具体的には、車両が存在するドローンの離着陸場の重みについてのみ、 ε を十分に小

さい正の数, $r_{j \rightarrow k}^d$ をドローンがドローンの離着陸場 j から配送要求 k まで移動するのに要する時間とした場合に, 以下で求める。

$$weight_j = \min_k \{ \varepsilon(b_k^d - t)(e_k^d - t)r_{j \rightarrow k}^d \}$$

上記により, 車両の配送要求や, 車両が存在しないドローンの離着陸場よりも小さい重みを設定する。そして, ドローンの配送要求の中で, 配送指定時間帯の開始時刻と現在時刻の差と, 終了時刻と現在時刻の差の積が小さい配送先を選択する。これにより, 開始時刻が迫っている配送先や, 終了時刻が迫っている配送先を優先的に配送させる。また, 配送指定時間帯の開始時刻と終了時刻が同一である複数の配送先については, ドローンの離着陸場から近い配送先を選択する。

車両がドローン을載せていない場合については, 車両によるドローンの回収は, ドローンによる配送要求の配送指定時間帯の開始時刻が迫る前に行っておいた方が効率的に配送できると想定される。このため, 第 1 項において, ドローンによる配送要求の配送指定時間帯の開始時刻は考慮せずに, 車両の拘束時間のみを考慮して重みを計算する。第 2 項での, 配送要求の配送指定時間帯の終了時刻については, 未配送のドローンの配送要求の数だけ候補があるが, この中で最小の値を使用する。

すなわち, l_j をドローンが離着陸場 j に到着可能な時刻とした場合に, 以下で重みを求める。

$$weight_j = \max(l_j - t, a_j) \cdot \min_k (e_k^d - t)$$

ドローンを載せていない車両の訪問箇所としてドローンの離着陸場が選択された場合は, ドローンもこの離着陸場に向かう。

これまで述べたような形で, 各段階において, 車両の配送要求箇所と, ドローンの離着陸場の重みを求め, 重みが最小となる場所を車両が次に訪問するという選択を繰り返して解を生成する。

これまで述べた各箇所の重みを Figure 3-4 に, 処理の流れを Figure 3-5 に示す。

なお, 配送時間帯が指定されていない配送要求については, 配送指定時間帯の開始時刻が 1 日の配送開始時刻, 配送指定時間帯の終了時刻が 1 日の配送終了時刻であるとする。

また, 元々の最近傍法では, 指定された配送時間帯に間に合わない場合は車両を追加するため, 重みの乗算の第 2 項である $(e_i - t)$ の値が負になることはない。しかし,

今回は車両とドローンの台数を固定しており， $(e_i - t)$ の値が負になることもあるため，この際は第 2 項の値を 1 として重みを求めている。

When the vehicle retrieves the drone



$$weight_j = \min_k \{ \varepsilon(b_k^d - t)(e_k^d - t)r_{j \rightarrow k}^d \}$$

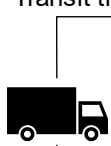
Other timing

Vehicle delivery request: i

Start time of time window: b_i^v

End time of time window: e_i^v

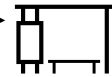
Transit time: r_i



$$weight_i = \max(b_i^v - t, r_i) \cdot (e_i^v - t)$$

Drone airfield: j

Transit time: a_j



With drone

$$weight_j = \min_k \{ \max(b_k^d - t, a_j) \cdot (e_k^d - t) \}$$

Without drone (Time when drone can arrive: l_j)

$$weight_j = \max(l_j - t, a_j) \cdot \min_k (e_k^d - t)$$

Drone delivery request: k

Start time of time window: b_k^d

End time of time window: e_k^d



Figure 3-4 Weights of vehicle delivery request and drone airfield

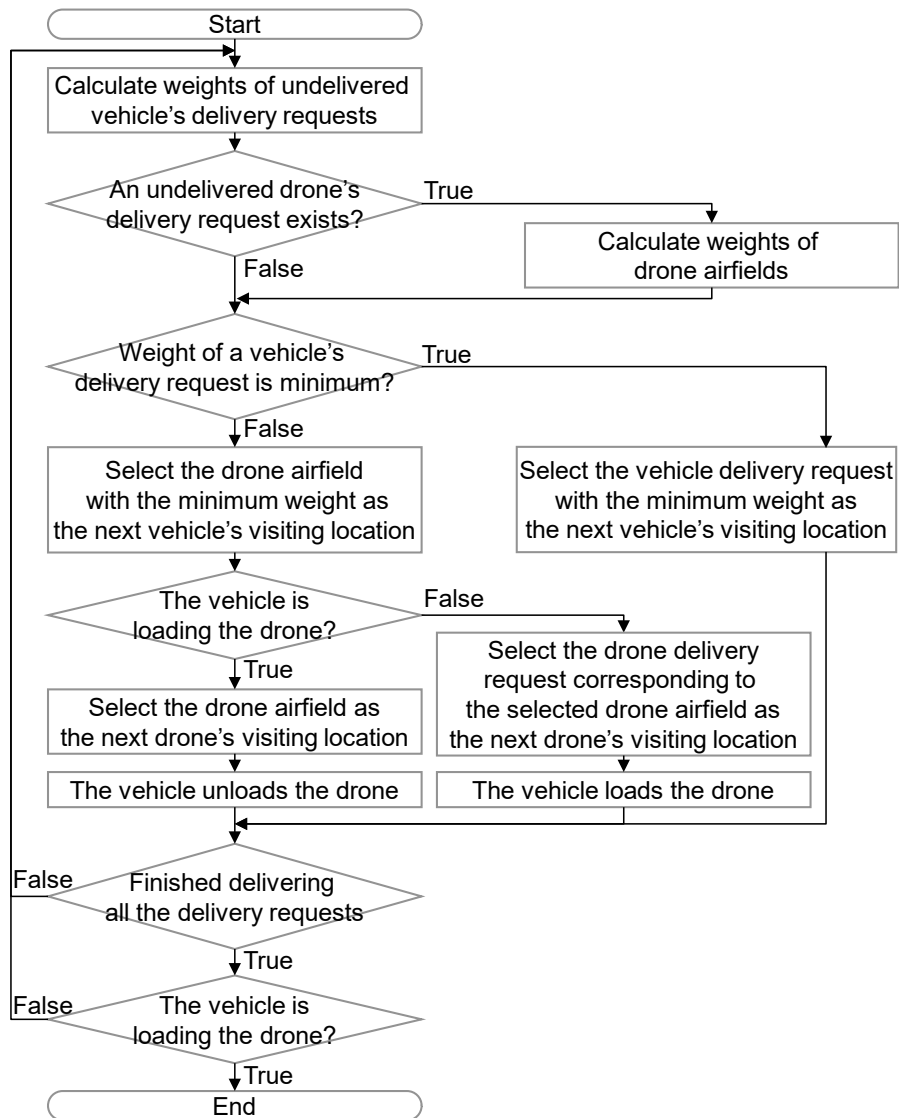


Figure 3-5 Process of initial solution generation

3.3.3 改良操作

改良操作については、時間制約付き配送計画問題についての研究で多く使用されている経路内操作[50][51]の内、経路内再配置と経路内交換を行う。

経路内再配置とはある地点の訪問順序を変更する操作である。提案手法においては、車両が担当する、時間帯指定の無い配送要求の訪問順序を変更する操作を行う。

経路内交換とは2つの地点の訪問順序を交換する操作である。提案手法においては、車両が担当する、時間帯指定の無い2つの配送要求の訪問順序を交換する操作を行う。

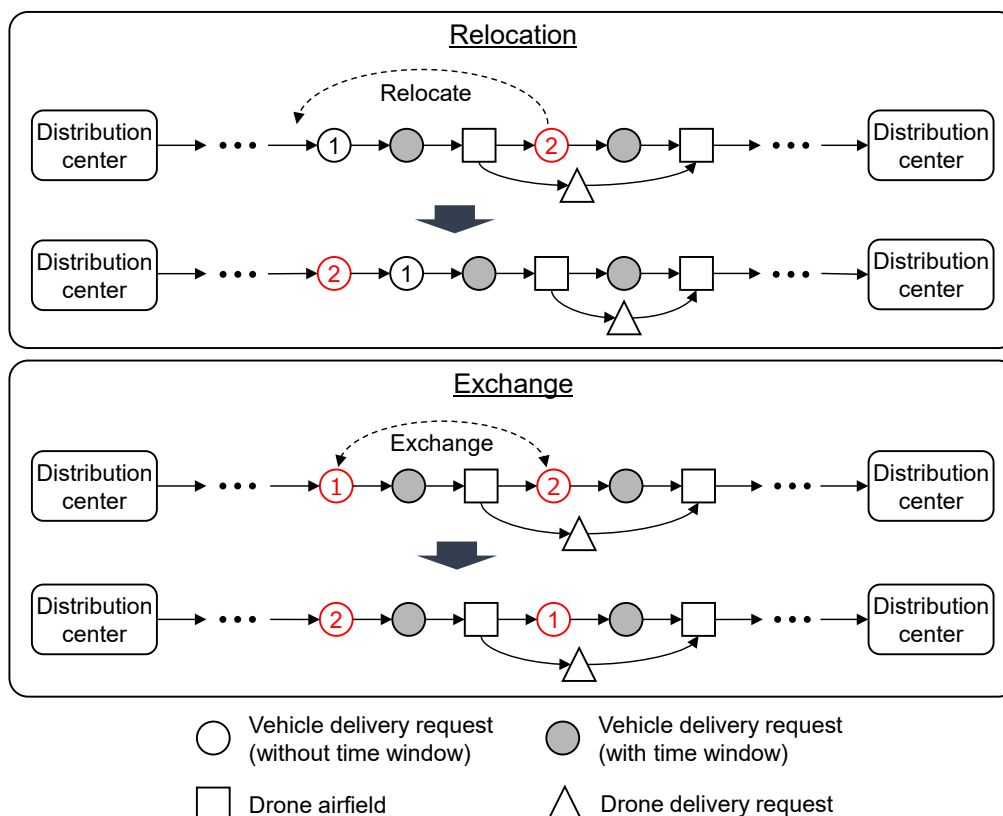


Figure 3-6 Relocation and exchange

上記した経路内再配置と経路内交換を Figure 3-6 に示す。

上記操作をこの順で行い、それぞれの操作内の各試行において、指定時間帯内に配送できる配送要求の個数が増えた場合、もしくは、指定時間帯内に配送できる配送要求の個数は変わらないが所要時間が短縮された場合に、配送計画の更新を行う。なお、配送要求には配送時間帯が指定されていないものがあるが、このような配送要求については、配送が1日の配送終了時刻を超えた場合に、時間帯内での配送ができなかったとする。

次に、車両が担当する、時間帯指定がある配送要求のうち、時間帯内での配送ができない配送要求についての改良操作を行う。この操作では、時間帯内での配送ができない配送要求のうち、配送時間が早いものから順に任意の位置に挿入し、以降の計画を初期解の生成時と同様の形で求める。そして、指定時間帯内に配送できる配送要求の個数が増えた場合、もしくは、指定時間帯内に配送できる配送要求の個数は変わらないが所要時間が短縮された場合に、配送計画の更新を行う。

この処理の様子を Figure 3-7 に示す。また、具体的な処理を以下に疑似コードで記

載する。ここでは、並べ替えを行う、時間帯内の配送ができない配送要求の数を REORDER_MAX としている。

```

1: vehicle_count = 0;
2: for 対象配送要求 in 時間帯内で配送ができない車両の配送要求:
3:     if vehicle_count == REORDER_MAX:
4:         break;
5:     for 挿入位置 in range(対象配送要求の配送順):
6:         対象配送要求を挿入位置に挿入;
7:         以降の計画を初期解の生成時と同様の方法で計算;
8:         if 指定時間帯内に配送できる配送要求の個数が増える or
            指定時間帯内に配送できる配送要求の個数は変わらないが
            所要時間が短縮される:
9:             計画を更新;
10:    vehicle_count += 1;

```

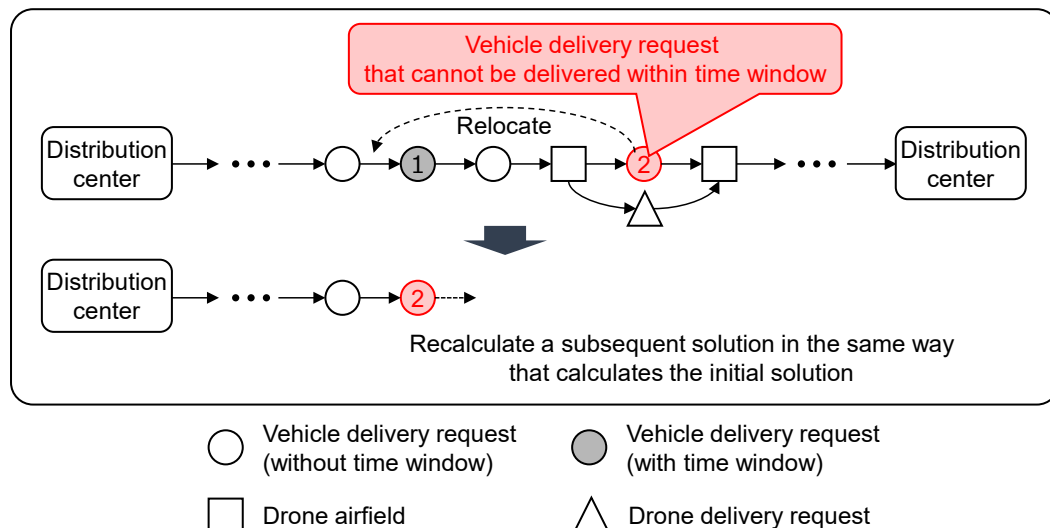


Figure 3-7 Refinement with regards to vehicle delivery requests that cannot be delivered within time window

3.4 シミュレーションによる評価

3.4.1 評価モデル

山間部を想定して評価モデルを設定する。道路形状、配送要求、地上設備、車両、ドローンに関するモデルをそれぞれ説明する。

(1) 道路形状

日本国内の実際の道路形状に基づいた道路モデルを使用する。エリアとしては、ドローンによる荷物配送の実証実験が行われたことがある山間部を選択した。道路形状は OpenStreetMap のデータを使用し、車道の情報を抽出する。エリアの広さは 15km 四方とする。そして、抽出した道路形状を 2.5.1 節と同じ方法で、50m メッシュの道路形状で近似する。

(2) 配送要求

3.2 節で述べた考え方に従い、設定した幹線道路を元に配送要求を配置する。具体的には、道路モデル上の 50m メッシュの頂点について、幹線道路からの最小距離に応じて重みを設定し、重みを考慮した形で頂点をランダムに選択する。そして、この選択された頂点を配送要求が存在する場所とする。なお、ここでの距離はユークリッド距離ではなく、道路上を移動する際の最短距離である。1 日の配送要求は 1km² 辺り 0.4 箇所とし、本章は 15km 四方のエリアを想定しているので 90 箇所となる。また、1 つの道路形状に対して、5 ケースの配送要求を想定する。

1 日の配送開始時刻と配送終了時刻はそれぞれ 9 時と 21 時とする。また、指定可能な配送時間帯は、9 時から 12 時、14 時から 16 時、16 時から 18 時、18 時から 20 時、19 時から 21 時の 5 つとする。30% の確率で配送時間帯を指定するとし、各配送時間帯を選択する確率は均等とする。すなわち、6% の確率で各配送時間帯を指定する。

車両で配送するエリアとドローンで配送するエリアを分割するために使用される、幹線道路からの距離の閾値は、0.5km、1.0km、1.5km、2.0km、2.5km の場合を想定する。なお、住居設定時と同様、ここでの距離はユークリッド距離ではなく、道路上を移動する際の最短距離とする。

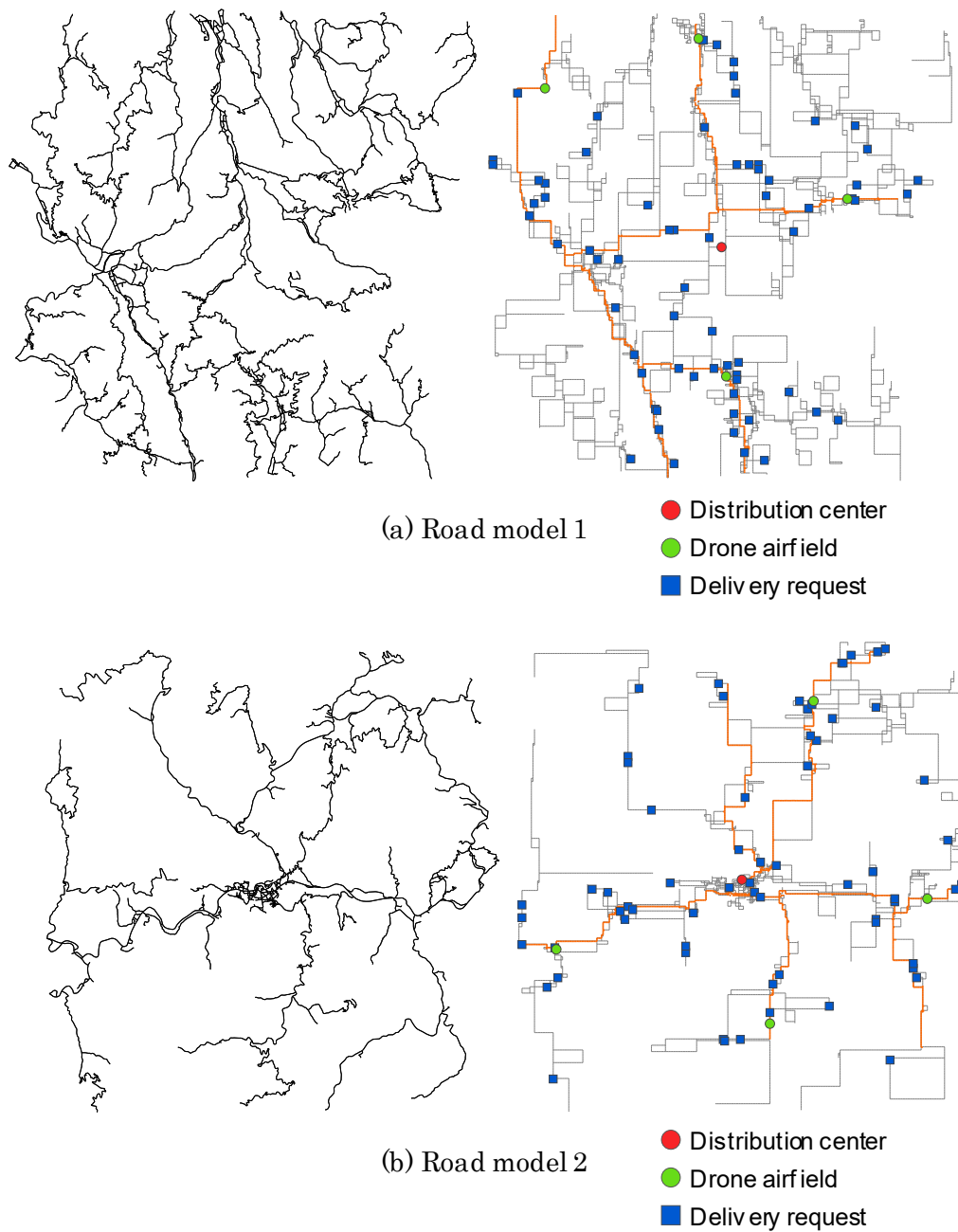


Figure 3-8 Road models

(3) 地上設備

配送センターは対象エリアの中央に設置する。車両とドローンの結節点となる地上設備であるドローンの離着陸場は幹線道路付近に設置する。離着陸場が 4 箇所の場合と 6 箇所の場合を想定する。

評価に使用した道路モデルと、元とした実際の道路形状を Figure 3-8 に示す。図の左が実際の道路形状、右が 50m メッシュ道路形状である。50m メッシュ道路形状で

太く描かれている道路は、設定した幹線道路である。配送要求は想定した 5 ケースのうちの 1 つの場合を示している。50m メッシュ道路形状での道路密度は、道路モデル 1 が 2201.1m/km²、道路モデル 2 が 1384.2m/km²となっている。

(4) 車両

車両の平均速度は 25km/h とし、配送先で要する時間は 3 分とする。配送センターを出発する時刻は 9 時とする。

(5) ドローン

ドローンの平均速度を 50km/h とし、配送先で要する時間は 3 分とする。また、離着陸場で荷物の搭載に要する時間は 2 分とする。配送センターを出発する時刻は車両と同様に 9 時とする。

3.4.2 結果

前記したモデルに関して、3.3 節で説明した提案方式についてシミュレーション評価を行った。なお、車両が担当する、時間帯指定がある配送要求のうち、時間帯内での配送ができない配送要求についての改良操作は、対応する配送要求の中から配送時刻が早い 10 個を対象に行った。

提案方式は 3.3 節で述べたように、車両のみでの配送方式を拡張したものであるが、従来研究には本研究と同じ問題設定のものが存在しなかったため、車両のみでの配送方式を別の形で拡張した方式との比較を行った。

具体的には、提案方式よりも車両による配送を優先させる方式（以下、比較方式 1）として、車両がドローンに乗せていない場合のドローンの離着陸場の重みを、車両がドローンに乗せている場合と同様の形で求める方式での評価を行った。

提案方式では、車両がドローンに乗せていない場合のドローンの離着陸場の重みは、ドローンによる配送要求の配送指定時間帯の開始時刻が迫る前に、車両によるドローンの回収を行うよう、以下のように、第 1 項において、ドローンによる配送要求の配送指定時間帯の開始時刻は考慮せずに、車両の拘束時間のみを考慮して重みを計算している。

$$weight_j = \max(l_j - t, a_j) \cdot \min_k(e_k^d - t)$$

一方，車両がドローンを載せている場合のドローンの離着陸場の重みは，第 1 項において，ドローンによる配送要求の配送指定時間帯の開始時刻を用いて重みを求めている。

$$weight_j = \min_k \{ \max(b_k^d - t, a_j) \cdot (e_k^d - t) \}$$

このため，車両がドローンを載せていない場合のドローンの離着陸場の重みを，車両がドローンを載せている場合と同様の形で求めた場合，提案方式と比較して，ドローンによる配送要求の配送指定時間帯が迫るまでは，車両による配送要求の訪問が優先される。

別の方式として，提案方式よりもドローンの回収を優先させる方式（以下，比較方式 2）での評価も行った。ここでは，車両がドローンを載せていない場合のドローンの離着陸場の重みの第 1 項を，車両やドローンの位置に関わらず小さい値に設定することで，車両の配送要求箇所よりもドローンの離着陸場への訪問を優先させる形で初期解を生成した。

また，最初の訪問先のみ，重みが 2 番目に小さい箇所を選択する方式（以下，比較方式 3）での評価も行った。

最後に，車両のみで配送する場合での評価も行った。車両は 1 台の場合と 2 台の場合を想定し，2 台の車両で配送する場合は，配送センターの南北で担当エリアを分割するケースと，配送センターの東西で担当エリアを分割するケースの 2 つを評価した。

結果を Figure 3-9, Figure 3-10 に示す。3.4.1 節で述べたように，1 つの道路形状に対して，5 ケースの配送要求を想定しており，各方式での所要時間の平均と標準偏差を Figure 3-9 に，指定時間帯内に配送できる荷物の個数の平均と標準偏差を Figure 3-10 に示している。凡例の「0.5km」などは，幹線道路からの距離によって車両で配送するエリアとドローンで配送するエリアを分割する際の閾値を示している。

車両 1 台で配送する場合の所要時間の平均は水平の黒の破線で示している。車両 2 台で，配送センターの南北で担当エリアを分割する場合の所要時間の平均は水平の青の破線で示している。この値は，車両 2 台のうち，所要時間が大きかった方の値の平均値を示している。

なお，車両 2 台で，配送センターの東西で担当エリアを分割するケースの所要時間

は、配送センターの南北で担当エリアを分割するケースの所要時間と平均値に差が無かったためグラフには示していない。具体的には、道路モデル 1 と道路モデル 2 における 2 標本 t 検定での両側 p 値はそれぞれ 0.41 と 0.65 であり、平均に差は見られなかった。

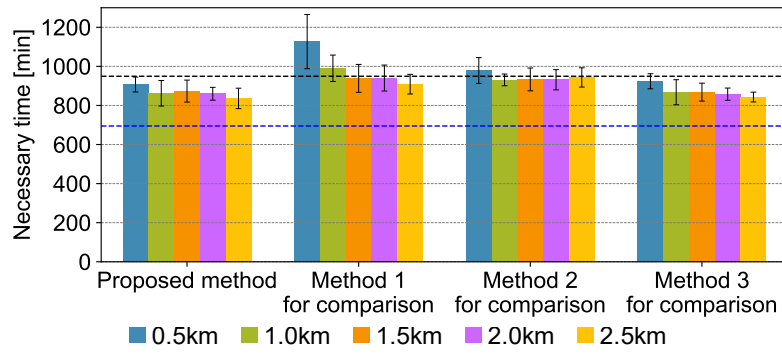
次に、所要時間と指定時間帯内に配送できる荷物の個数の関係を Figure 3-11, Figure 3-12, Figure 3-13, Figure 3-14 に示す。ここでは見やすさのために、提案方式、比較方式 1、比較方式 2 の結果を Figure 3-11, Figure 3-12 に、提案方式、比較方式 3 の結果を Figure 3-13, Figure 3-14 に分けて示している。グラフは横軸を所要時間、縦軸を指定時間帯内に配送できる荷物の個数としている。すなわち、グラフの左上が双方の指標ともよい解、右下が双方の指標とも悪い解となっている。

丸や四角などのプロットの形は、幹線道路からの距離によって車両で配送するエリアとドローンで配送するエリアを分割する際の閾値を示しており、同じ閾値での結果を線で結んでいる。なお、グラフが煩雑になるのを避けるため、閾値が 0.5km の際の結果は記載していない。また、プロットの色は使用した方式を示しており、同じ方式の結果を丸枠で囲んでいる。

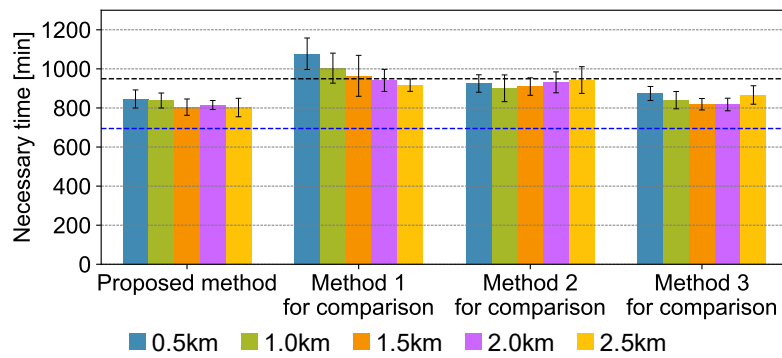
事業者は、このようなグラフから、方式ごとの 2 つの指標の関係を確認し、採用する方式を判断することを想定している。

また、提案方式と比較方式 1、比較方式 2 との所要時間の差を Figure 3-15 に示す。ここでは、横軸をドローンで配送する荷物の個数の平均としている。

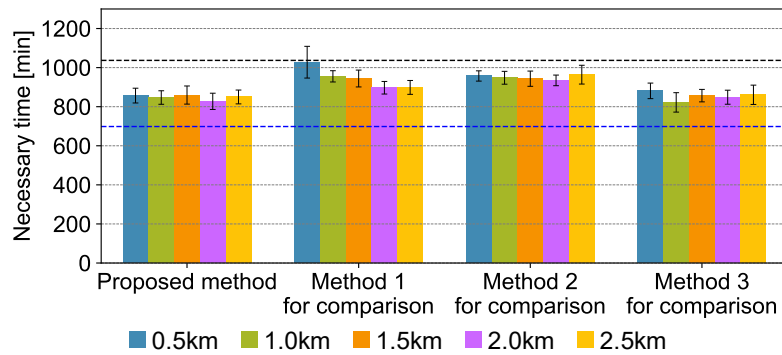
最後に、参考として、それぞれの場合における車両で配送する荷物の個数とドローンで配送する荷物の個数の平均と標準偏差を Figure 3-16 に示している。



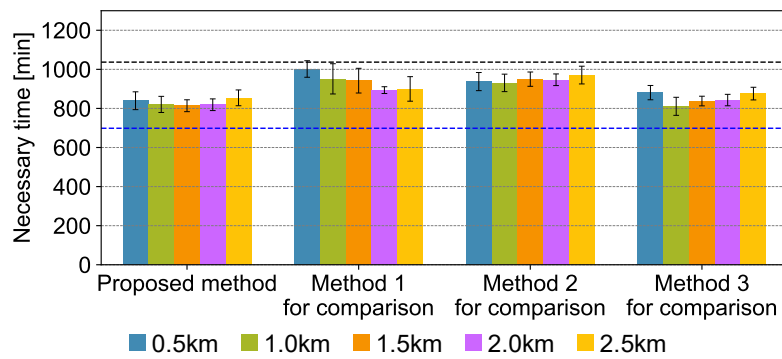
(a) Road model: 1, The number of airfields: 4



(b) Road model: 1, The number of airfields: 6

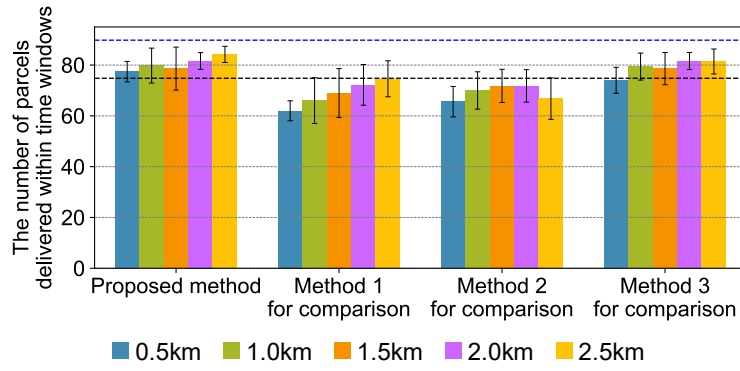


(c) Road model: 2, The number of airfields: 4

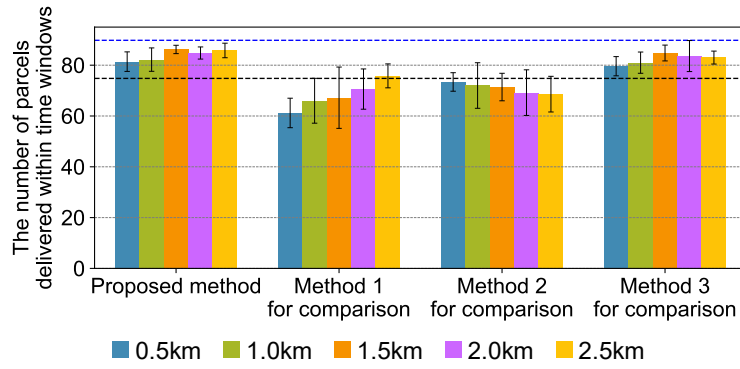


(d) Road model: 2, The number of airfields: 6

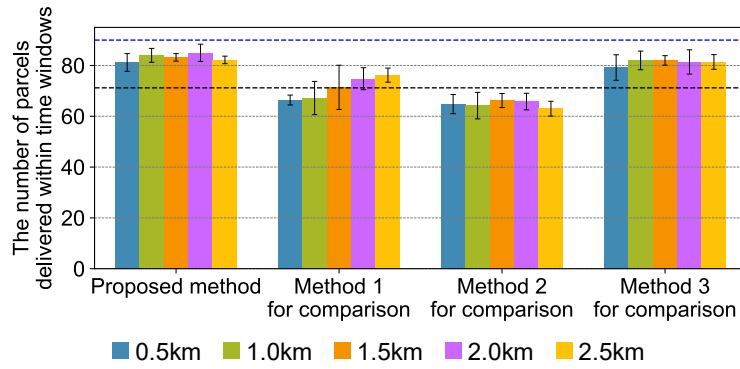
Figure 3-9 Necessary time



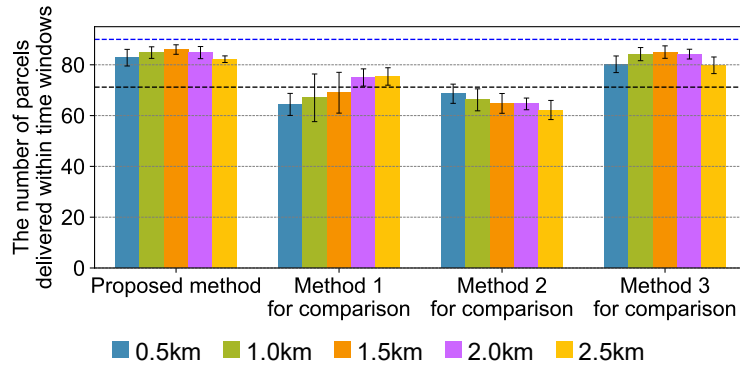
(a) Road model: 1, The number of airfields: 4



(b) Road model: 1, The number of airfields: 6

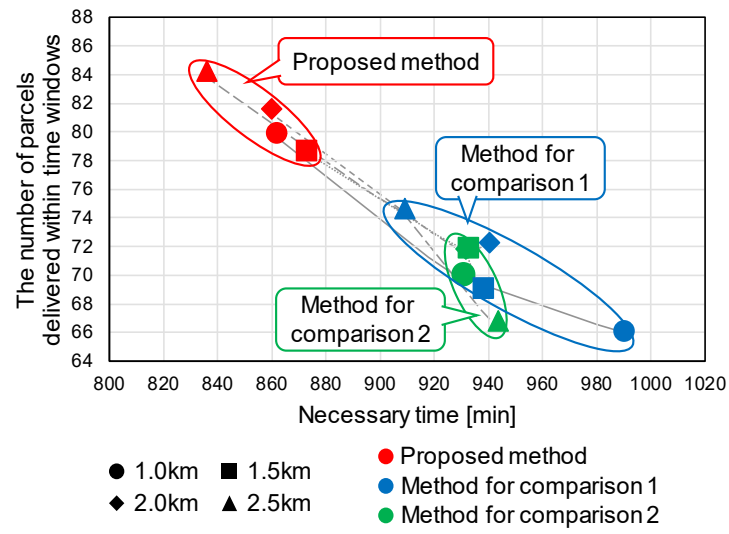


(c) Road model: 2, The number of airfields: 4

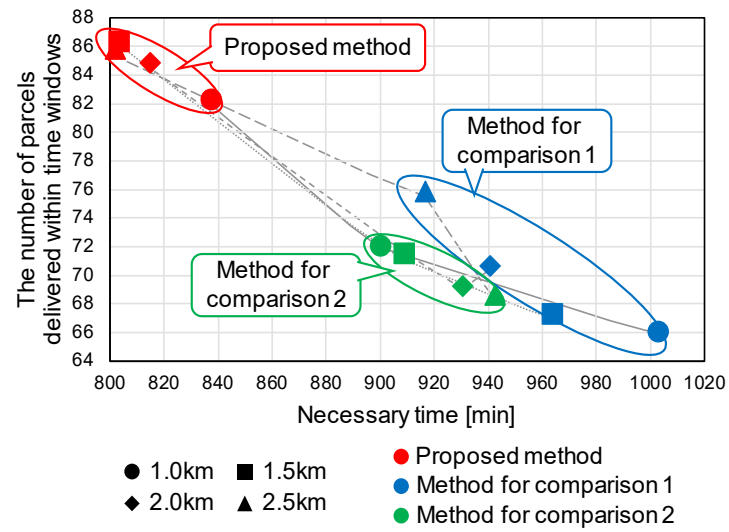


(d) Road model: 2, The number of airfields: 6

Figure 3-10 The number of parcels delivered within the delivery time windows

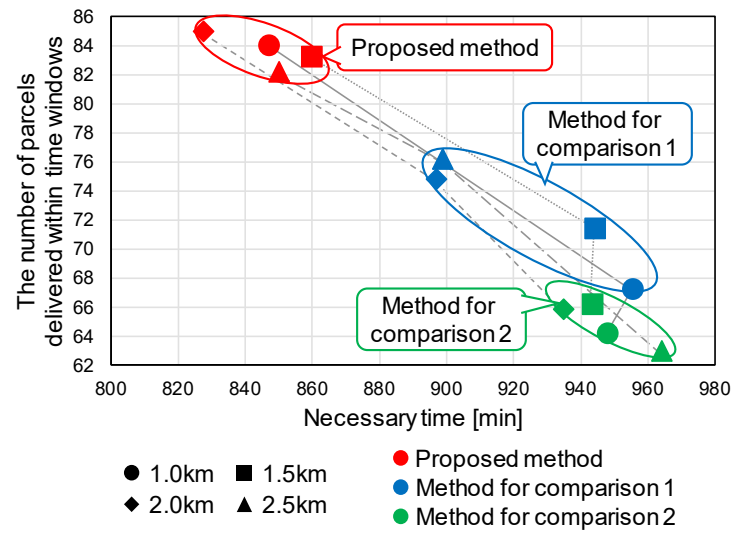


(a) Road model: 1, The number of airfields: 4

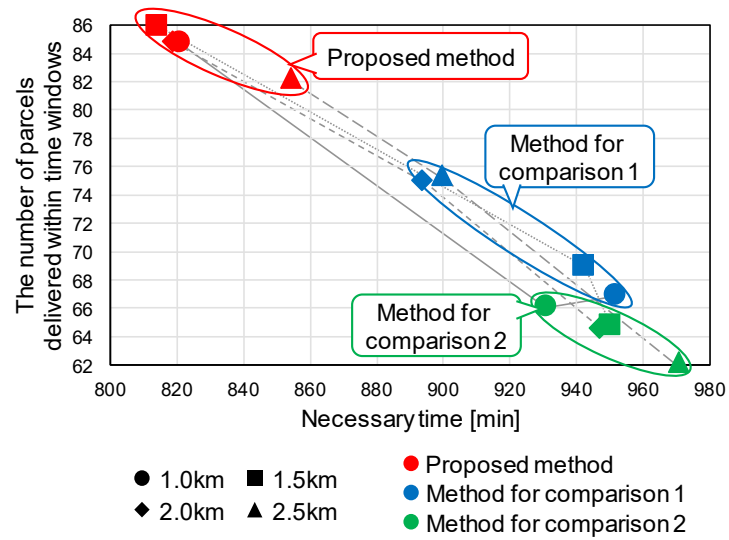


(b) Road model: 1, The number of airfields: 6

Figure 3-11 Relationship between necessary time and the number of parcels delivered within the delivery time windows (1)

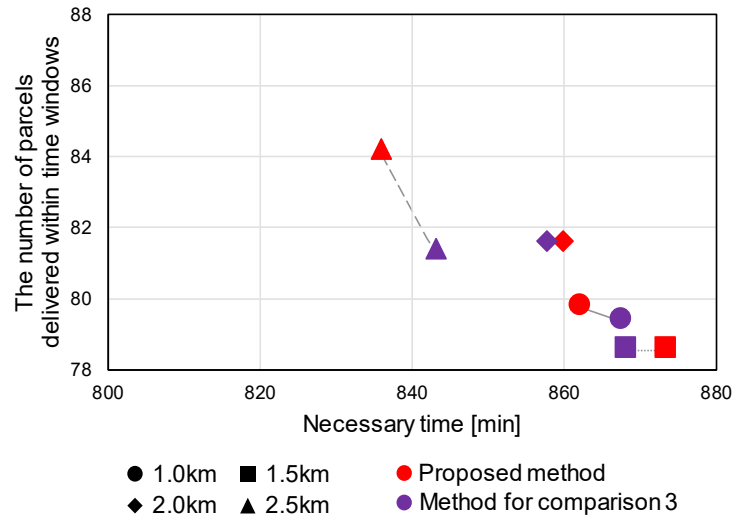


(a) Road model: 2, The number of airfields: 4

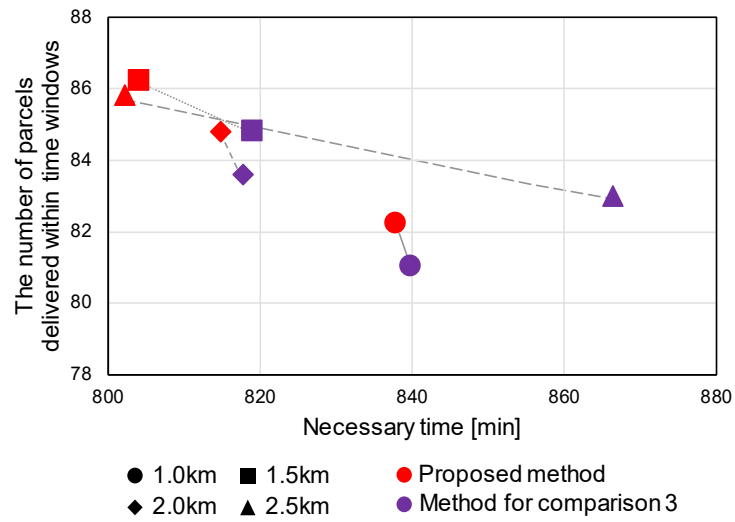


(b) Road model: 2, The number of airfields: 6

Figure 3-12 Relationship between necessary time and the number of parcels delivered within the delivery time windows (2)

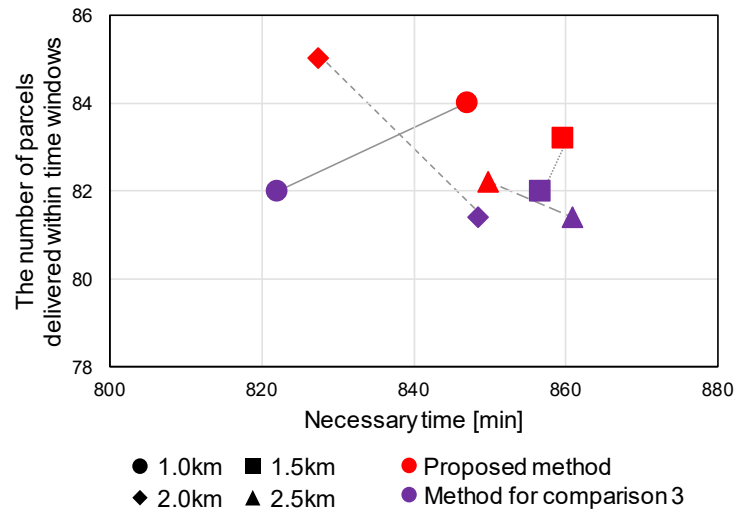


(a) Road model: 1, The number of airfields: 4

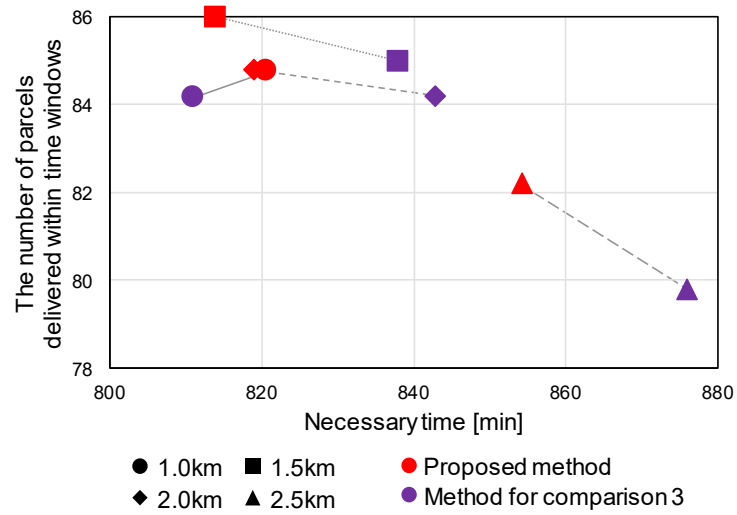


(b) Road model: 1, The number of airfields: 6

Figure 3-13 Relationship between necessary time and the number of parcels delivered within the delivery time windows (3)



(a) Road model: 2, The number of airfields: 4



(b) Road model: 2, The number of airfields: 6

Figure 3-14 Relationship between necessary time and the number of parcels delivered within the delivery time windows (4)

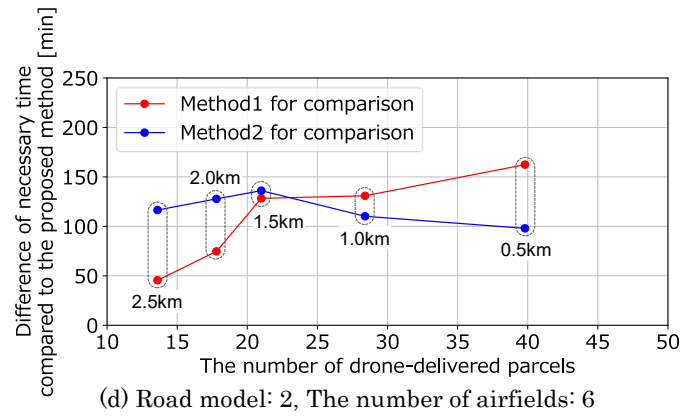
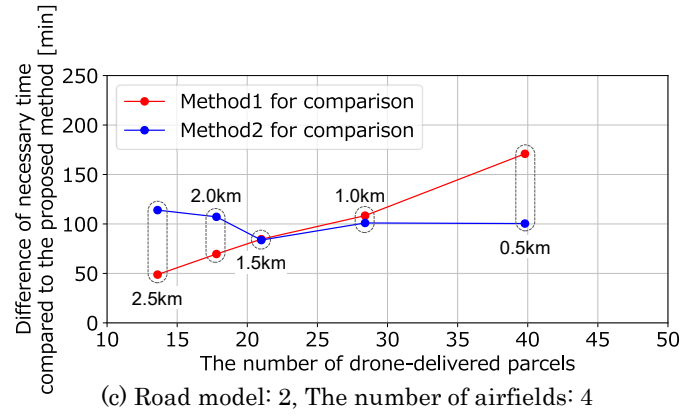
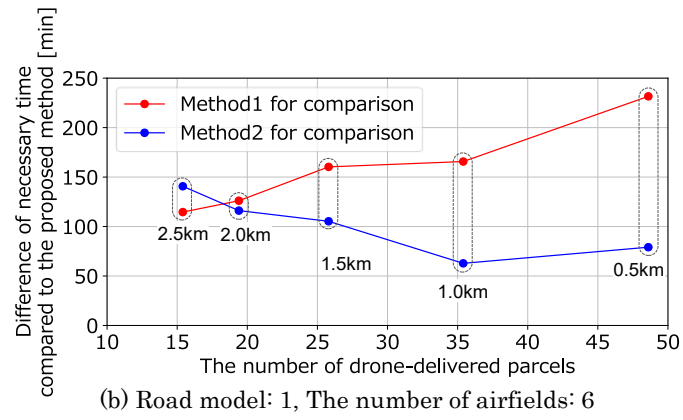
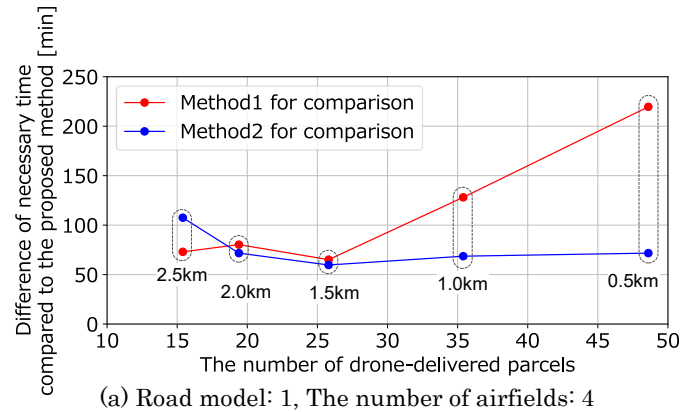


Figure 3-15 Difference of necessary time compared to the proposed method

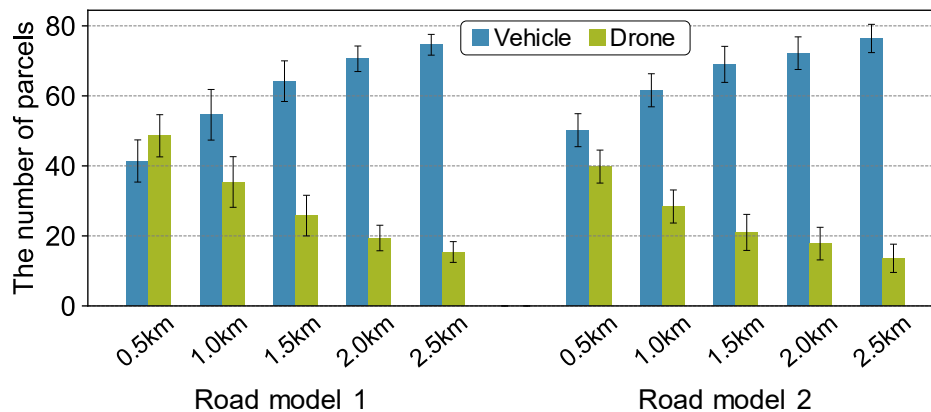


Figure 3-16 The number of parcels

3.4.3 評価

Figure 3-11, Figure 3-12 に見られるように、比較方式 1、比較方式 2 と比べた場合、提案方式はいずれの条件においても、指定時間帯内に配送できる荷物の個数が多くなっており、また、所要時間が短くなっている。具体的には、比較方式 1 と比べた場合、指定時間帯内に配送できる荷物の個数は平均 17.7%増加し、所要時間は平均 10.6%減少している。また、比較方式 2 と比べた場合、指定時間帯内に配送できる荷物の個数は平均 24.1%増加し、所要時間は平均 10.8%減少している。これは比較方式 1 においては、ドローン回収のために車両が離着陸場を訪れる優先度が低くなり過ぎてしまい、逆に、比較方式 2 においては、この優先度が高くなり過ぎてしまい、いずれの方式においても車両による配送とドローンによる配送がバランス良く行えないためであると考えられる。このことは、Figure 3-15 において、ドローンで配送する荷物が多い場合に比較方式 1 の結果が悪くなっており、車両で配送する荷物が多い場合に比較方式 2 の結果が悪くなっていることにも現れている。

Figure 3-13, Figure 3-14 に見られるように、比較方式 3 と比べた場合、提案方式の方が所要時間が増加する場合があるものの、指定時間帯内に配送できる荷物の個数は同等、もしくは、増加している。また、6 割以上の場合において、所要時間が減少している。このため、提案した重みは、効率的な経路を導くにおいて効果的であると考えられる。

3.4.4 計算量についての考察

提案方式では計算量の爆発を避けるために、ヒューリスティクスを用いて解を求めている。ここでは、提案方式の計算時間に関する考察を行う。

まず、提案方式における初期解の生成と改良操作について計算量の定式化を行う。定式化においては、車両で配送する荷物の個数を V 、ドローンで配送する荷物の個数を D 、ドローンの離着陸場の個数を A とする。

初期解の生成では、車両が配送要求箇所を訪れるか、ドローンの離着陸場を訪れるかを逐次的に決定する。ここで、車両が荷物を運び終えるまでに訪れる配送要求の個数は V である。一方、ドローンが 1 つの荷物を配送するために、車両はドローンの離陸時と着陸時の計 2 回離着陸場を訪れる必要がある。このため、全ての荷物を運び終えるまでにドローンの離着陸場を $2D$ 回訪れる必要がある。以上より、車両が訪れる箇所の個数は $V + 2D$ となる。

訪れる箇所を決定する際には、最も多い場合で、車両で配送する荷物の個数 V とドローンの離着陸場の個数 A の数だけ重みを計算する必要がある。また、ドローンの離着陸場の重みを求める際には、重みが最も小さくなるようなドローンの荷物の配送箇所を選ぶため、重みの計算量のオーダーは、 $O(V + AD)$ となる。以上より、初期解の生成における計算量のオーダーは、 $O((V + 2D)(V + AD))$ となる。

次に、改良操作の計算量の定式化を行う。まず、経路内再配置については、変更対象となる車両による荷物の配送箇所の個数は最大 V であり、これを車両が訪れる箇所のいずれかに挿入するので、計算量のオーダーは $O(V(V + 2D))$ となる。

経路内交換については、経路内再配置と同様に、変更対象となる車両による荷物の配送箇所の個数は最大 V であり、ここから交換する 2 つの箇所を選択するため、計算量のオーダーは $O(V(V - 1))$ となる。

最後に、時間帯指定がある配送要求のうち、時間帯内での配送ができない配送要求に関する改良操作について考える。変更対象となる車両による荷物の配送箇所の個数は最大 10 としており、これを車両が訪れる箇所のいずれかに挿入する。そして、試行毎に、初期解の生成時と同様の計算をするため、計算量のオーダーは $O((V + 2D)^2(V + AD))$ となる。

以上より、改良操作の最後の処理が計算量に対して支配的となっており、全体の計

算量のオーダーは $O((V + 2D)^2(V + AD))$ となる。ここで、 D は V にほぼ比例すると考えられるので、計算量のオーダーは $O(V^3)$ となる。

シミュレーションに用いた計算機の CPU は Intel Core i5 11400 2.60GHz であり、計算時間の平均は 16 秒であった。これは、配送中に、荷物の再配達や集荷要求が追加された際においても、再計算可能な計算時間に収まっている。なお、配送要求や集荷要求の箇所が増え、計算時間が大きくなる際は、改良操作の打ち切り処理を行うことで、計算時間の増大を抑えることが可能である。

最後に、3.4.1 節の評価モデルにおける配送要求は 90 箇所であったが、これに加えて、配送要求を 80 箇所、100 箇所、110 箇所にした際の計算時間を Table 3-1 に示す。合わせて、計算量のオーダーと実際の計算時間との比を記している。Table 3-1 に示すように、荷物の数が変化した際の、計算量のオーダーと実際の計算時間の比は、大きく変化していない。このため、本節で求めた計算量のオーダー計算式は、荷物の数による影響を正しく反映できていると考えられる。

Table 3-1 Comparison of computation time and order of the nearest neighbor search method

# of vehicle's parcels	80	90	100	110
Computation time [s]	9.7	16	20.4	23.7
Computational order	512000	729000	1000000	1331000
Ratio	1.9×10^{-5}	2.2×10^{-5}	2.0×10^{-5}	1.8×10^{-5}

3.5 結言

配送時間帯指定を考慮した、車両とドローンの連携による宅配荷物の配送方式を提案した。提案方式では、各段階における車両の配送箇所とドローンの離着陸場の重みを求め、逐次的に次の訪問箇所を決めることにより、短い計算時間で配送計画を立案している。提案方式をシミュレーションにより評価し、計算時間が、荷物の再配達や集荷要求が追加された際においても、再計算可能な範囲に収まっていることを確認するとともに、車両による配送を優先させる方式やドローンの回収を優先させる方式に比べて、所要時間が短縮され、指定時間帯に配送可能な荷物の個数が増加することを

確認した。

提案方式ではドライバーの休憩時間を考慮に入れていないが、実際には昼休みなどの休憩時間を確保する必要がある。今後はこのような実運用における制約を考慮した形での方式検討が課題である。

また、本章の前提では、幹線道路から距離が近いエリアが配送要求の密度が大きいエリアに対応するため、幹線道路からの距離によって車両で配送するエリアとドローンで配送するエリアを分割したが、一般にはこれが成り立たない場合も存在する。このため、住宅密度や配送要求の密度などから車両で配送するエリアとドローンで配送するエリアを分割する方式も、今後の検討課題となる。

第4章

車両とドローンの連携による宅配荷物の 配送計画立案の先読み探索方式

4.1 緒言

本章では、荷物配送の要求への効率的な対応に関して、配送前日の夜、もしくは、当日の朝に1日分の配送計画を作成することを前提に、近傍探索方式よりも最適解に近い計画を立案する方式を提案する。

近傍探索方式は、配送時間帯を考慮した重みを、配送箇所と、車両とドローンの結節点となる地上設備であるドローンの離着陸場毎に求め、これに基づき逐次的に次の訪問箇所を決定する。この方式により、配送途中での配送先の追加などに対応可能な程度の短い計算時間で実行可能解を求めることができる。しかし、最適解を求めることができる極めて小規模な問題でさえ、十分に効率的な解が求まらず、現実的な規模の問題の場合の解の最適性には相当改善の余地があると考えられる。1日分の基本的な配送計画は前日の夜に立案することが多いので、このような計画を作成する際には、計算時間が数時間程度に増加しても、より効率的な解を求めることが望まれる。

このため、本章では、配送箇所とドローンの離着陸場の重みに基づいて、次の訪問箇所の候補を絞った上で先読みをすることで、運用面で許容できる計算時間に収めながら、より最適に近い解を算出可能な宅配荷物の配送計画方式を提案する。

以下では、まず4.2節で近傍探索方式の問題点について説明する。続いて、4.3節で近傍探索方式を拡張したドローン併用先読み探索方式を説明する。4.4節でシミュレーション実験の結果を示し、考察を行う。最後に、4.5節で解の最適性、4.6節で計算量についての考察を行う。

4.2 近傍探索方式の問題点

第3章で提案した近傍探索方式は配送要求とドローンの離着陸場の重みに基づいて

逐次的に次の訪問箇所を求めるため、短い計算時間で解を求めることができ、配送途中での配送先の追加への対応などは容易である。一方、複数の配送箇所やドローンの離着陸場の位置関係などによって、効率的な解が求まらない場合が存在する。

効率的な解が求まらない事情を、Figure 4-1 を用いて詳しく説明する。Figure 4-1 において、 R_v は車両の配送箇所、 R_d はドローンの配送箇所、 A_1 、 A_2 はドローンの離着陸場を示しており、点線の矢印の下に記載している数字は車両が移動に要する時間を、実線の矢印の横に記載している数字はドローンが移動に要する時間を表している。 R_v 、 A_1 、 A_2 は同一道路上に並んでおり、 R_v 、 R_d の配送指定時間帯は 9 時から 12 時であるとする。また、現在時刻は 10 時であるとする。

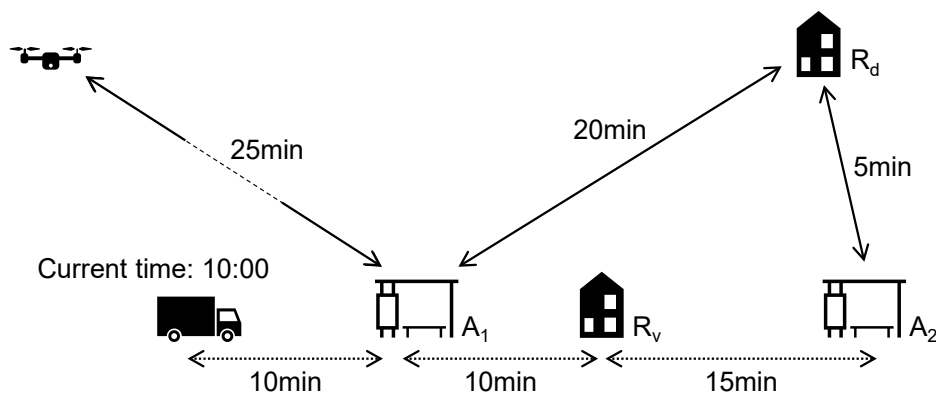


Figure 4-1 Example where the nearest neighbor search method does not provide the optimal solution

近傍探索方式では、 R_v の重みは $20 \cdot 120 = 2400$ 、 A_1 の重みは $25 \cdot 120 = 3000$ となるため、車両はまず R_v を訪れる。その後、 A_1 を訪れ、ドローンに新たな荷物を搭載し、 A_1 から R_d に向けてドローンを発進させる。配送を終えたドローンは、 A_2 で車両と落ち合う動きとなる。

説明の簡略化のために、車両とドローンの移動時間以外の時間を無視すると、車両は 10 時 20 分に R_v の荷物を配送し、10 時 30 分に A_1 でドローンに新たな荷物を搭載し、10 時 55 分に A_2 でドローンと落ち合う。

しかし、車両がまず A_1 でドローンに新たな荷物を搭載し、その後、 R_v の荷物を配送する場合、車両は 10 時 25 分に A_1 でドローンに新たな荷物を搭載し、10 時 35 分に R_v の荷物を配送し、10 時 50 分に A_2 でドローンと落ち合うことになる。つまり、近傍探索方式で得られる解よりも効率の良い解が存在する。

このように、近傍探索方式は、短い計算時間で解を求めることができるものの、効率的な解が求まらない場合が存在する。このため、1 日分の配送計画を作成する際には、前日の夜や当日の朝に実行可能な計算時間に収めながら、より最適に近い解を算出することが課題となる。

4.3 ドローン併用先読み探索方式

4.3.1 アプローチ

近傍探索方式では、配送指定時間帯が同じ時間帯の荷物が存在する場合においては、次の行動が早く取れる場所を優先して訪れる。例えば、Figure 4-1 の例では、車両が A_1 を訪れると、ドローンが到着する 10 時 25 分まで待つ必要があるが、 R_v を訪れた場合は、10 時 20 分から次の行動を開始できるため、車両は R_v を訪れる。

しかし、Figure 4-1 の例では、一度 A_1 でドローンの到着を待ち、車両とドローンがともに A_2 に向かいながら R_v と R_d の荷物を配送する方が効率的な動作になる。

ここで Figure 4-2 の例を考える。Figure 4-2 は、Figure 4-1 と同様に、近傍探索方式での R_v の重みは $20 \cdot 120 = 2400$ 、 A_1 の重みは $25 \cdot 120 = 3000$ であるため、車両はまず 10 時 20 分に R_v を訪れる。その後、10 時 30 分に A_1 を訪れ、ドローンに新たな荷物を搭載する。ドローンは A_1 から R_d に向かい、10 時 55 分に車両と A_2 で落ち合う動きとなる。

一方、一度 A_1 でドローンの到着を待ち、車両とドローンがそれぞれ R_v と R_d の荷物を配送した後に、 A_2 に向かう場合は、車両は 10 時 25 分に A_1 でドローンに新たな荷物を搭載し、10 時 35 分に R_v の荷物を配送し、11 時 10 分に A_2 でドローンと落ち合う。また、最後に A_1 でドローンと落ち合う場合は、11 時 5 分に落ち合う形となる。

このように、Figure 4-2 の例では、車両は、重みが小さい R_v を最初に訪れる方が効率的に荷物を配送することができる。

以上のように、Figure 4-1 での車両による配送要求の重みと Figure 4-2 での車両による配送要求の重み、また、Figure 4-1 でのドローン離着陸場の重みと Figure 4-2 でのドローン離着陸場の重みは同一であるが、重みが同一の場合でも、状況によって、重みが最小となる箇所を訪れる方が効率的になる場合と、重みが 2 番目の箇所を訪れる方が効率的になる場合が存在する。

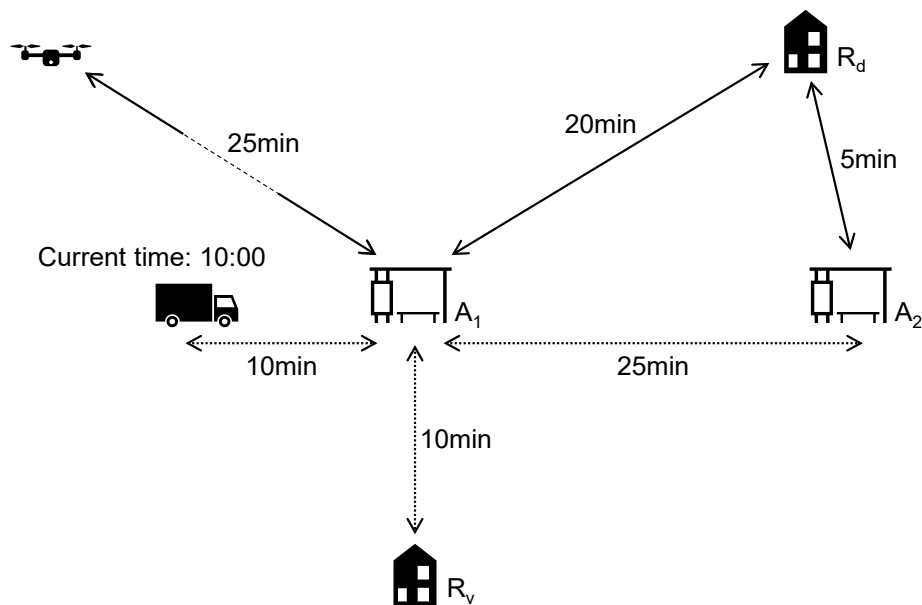


Figure 4-2 Example where the nearest neighbor search method provides the optimal solution

このため、重みの順位が大きく変わらない複数の訪問先の候補についてのみ、その後の動作を試行した上で、最終的に効率的な解が得られる訪問先を選択することにより、計算量を抑えながら、最適に近い解を得ることができると考えられる。

具体的には、近傍探索方式で用いた配送箇所の重みに基づいて、次の訪問箇所の候補を絞った上で複数の経路を先読みし、この中で最も効率的な配送経路に繋がる箇所を次の訪問先として決定する。そして、この動作を繰り返すことにより、配送経路を決定する。

4.3.2 提案アルゴリズム

Figure 4-3 を用いて方式を説明する。ここでは、初期位置である配送センター (s1) に車両とドローンがいることを想定している。また、先読みの幅を N 、深さを 3 としている。

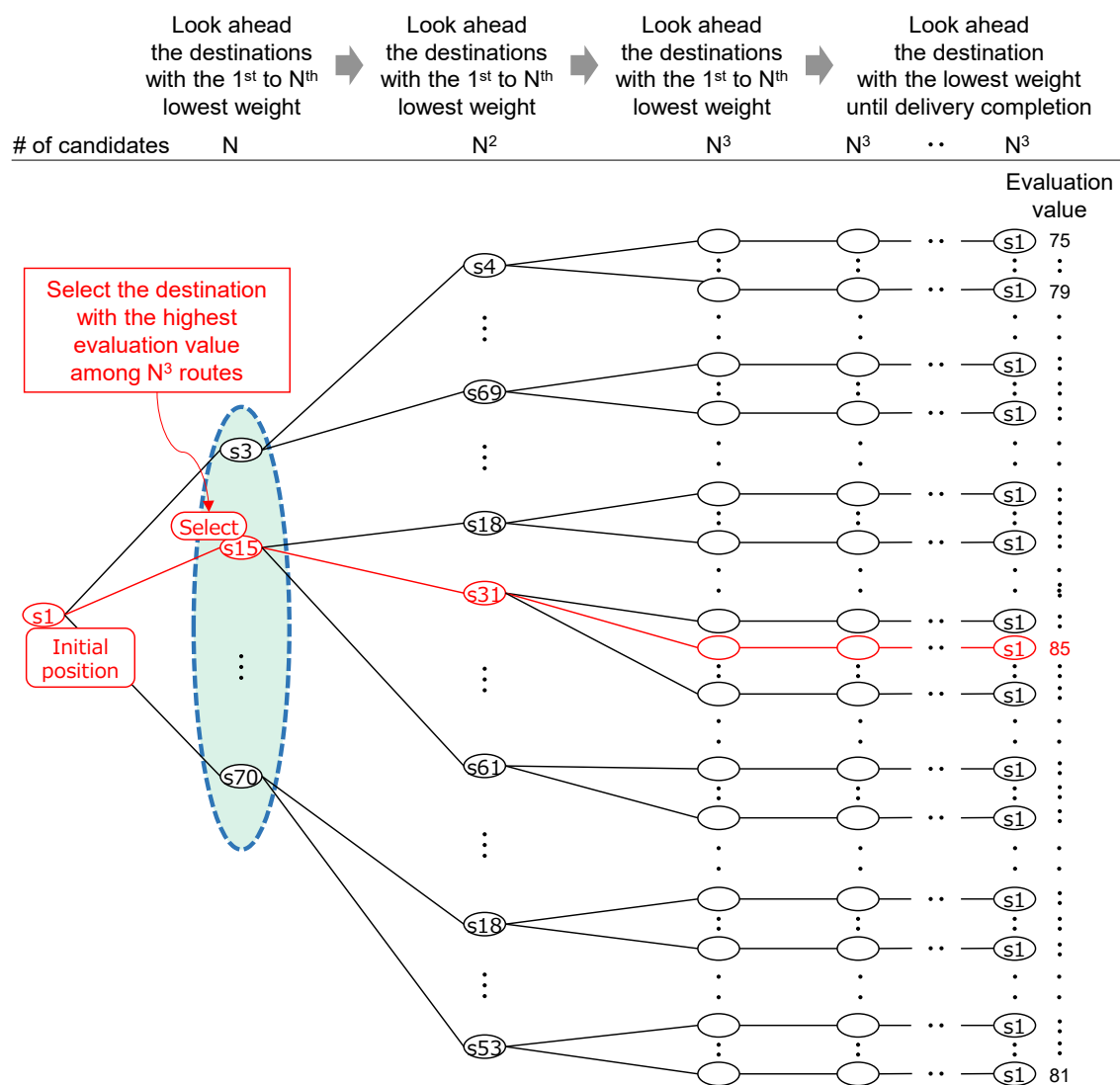


Figure 4-3 Look-ahead search method

まず、次の移動先の候補の重みを全て求め、重みが小さい N 個の移動先候補を選択する。ここでは、移動先候補として、 s_3 , s_{15} , s_{70} を含む N 個が選択されている。

次に、選択された移動先の候補毎に、次の移動先候補の重みを全て求め、重みが小さい N 個の移動先候補を選択する。例えば、 s_{15} の次の移動先候補として、 s_{18} , s_{31} , s_{61} を含む N 個が選択されている。これにより、 N^2 個の経路候補が選ばれる。同様の処理を再度行い、最終的に N^3 個の経路候補が選ばれる。

得られた N^3 個の経路候補毎に、重みが最小となる箇所を次の移動先として選択する。この処理を、全ての荷物を配送し、配送センターに戻るまで続ける。そして、得られた N^3 個の経路候補毎に評価値を求め、評価値が最大となる経路に繋がる箇所を次の移動先として決定する。

ここで、評価値としては、配送指定時間帯内に配送可能な荷物の個数を使用する。なお、配送時間帯が指定されていない配送要求については、1 日の配送終了時刻までに配送できる場合に、配送指定時間帯内に配送できたとする。また、評価値が等しい経路が存在する場合は、配送に要する時間が短い経路を選択する。ここでは、最大の評価値は 85 であり、この経路に繋がる s15 を s1 からの次の移動先として決定する。

このように、初期位置である配送センターから、次の移動先を逐次決定することにより、配送経路を決定する。

4.4.3 節ならびに 4.6 節で後述するように、先読みの深さと幅は、解の最適性と計算時間に大きな影響を与える。4.4.3 節で示すように、先読みの幅を 5、深さを 3 まで増やすことにより、解が大きく改善することが見込まれるため、まずは、幅を 5、深さを 3 に設定する。そして、いくつかの配送パターンにおいて、先読みの幅を段階的に増加させる。これを解の改善が見られなくなるまで行うことにより、先読みの幅を決定する。

なお、途中で計算時間が大きくなり過ぎる際には、先読みの途中段階で一旦候補を絞ることにより、計算量の増加を抑える。

例えば、幅が 20、深さが 3 の場合に、2 段階まで先読みした際に得られる 400 個の経路候補の評価値を一旦求め、評価値が大きい 50 個の経路候補を抽出し、ここからさらに 1 段階先読みを行う。そして、得られた 1000 個の経路候補毎に評価値を求め、評価値が最大となる経路に繋がる箇所を次の移動先として決定する。

処理の疑似コードを以下に記す。なお、LOOKAHEAD_DEPTH は先読みの深さ、LOOKAHEAD_WIDTH は先読みの幅、MAX_WIDTH は計算量を抑えるために候補を絞る際の数を示している。

Figure 4-3 を例に、疑似コードの動作を説明する。初期状態では配送経路は[s1]であり、3 行目の配送経路候補リストは[[s1]]となる。同様に 6 行目のループ用の配送経路候補リストは[[s1]]となる。

```

1: 配送経路 = [初期位置];

2: while (荷物):
3:     配送経路候補リスト = [配送経路];

4:     深さ = 0;
5:     while 深さ <= LOOKAHEAD_DEPTH:
6:         配送経路候補リストをループ用の配送経路候補リストにコピー;
7:         配送経路候補リスト = [];
8:         for 配送経路候補 in ループ用の配送経路候補リスト:
9:             地点・重みリスト = [];
10:            訪問地点候補リスト =
                配送経路候補に含まれない車両の配送要求 + ドローン離着陸場;
11:            for 訪問地点候補 in 訪問地点候補リスト:
12:                地点・重みリストに、訪問地点候補とその重みを追加;

13:            地点・重みリストを重みの昇順でソート;
14:            地点・重みリストの LOOKAHEAD_WIDTH 番目までの地点を、
                配送経路候補の末尾に加えたものを、配送経路候補リストに追加;

15:            深さ++;

        # 計算時間を短縮させる必要がある場合
16:        if len(配送経路候補リスト) > MAX_WIDTH:
17:            評価値リスト = [];
18:            for 配送経路候補 in 配送経路候補リスト:
19:                近傍探索方式で全ての荷物を配送するまでの経路を求める;
20:                経路の評価値を評価値リストに追加する;
21:            評価値が MAX_WIDTH 番目までの配送経路候補のみを
                配送経路候補リストに残す;

```

```

22:   次の訪問地点 = Null;
23:   最大の評価値 = 0;
24:   for 配送経路候補 in 配送経路候補リスト:
25:       近傍探索方式で全ての荷物を配送するまでの経路を求める;
26:       if 評価値が最大の評価値より大きい:
27:           最大の評価値を更新;
28:           次の訪問地点を更新;

29:   配送経路に次の訪問地点を追加;

30: return 配送経路;

```

8 行目のループ処理において、LOOKAHEAD_WIDTH 個だけ訪問地点候補が選ばれ、配送経路候補リストは、[[s1, s3], [s1, s15], ..., [s1, s70]]となる。

5 行目のループ処理により、再び 8 行目のループ処理を行う。これにより、配送経路候補リストの要素毎に LOOKAHEAD_WIDTH 個だけ訪問地点候補が選ばれ、配送経路候補リストは、[[s1, s3, s4], ..., [s1, s3, s69], ..., [s1, s15, s18], [s1, s15, s31], ..., [s1, s15, s61], ..., [s1, s70, s18], ..., [s1, s70, s53]]となる。このように、5 行目のループ処理により、LOOKAHEAD_DEPTH の深さだけ、複数パターンの配送経路の先読みを行う。

なお、MAX_WIDTH が設定されている場合は、16 行目から 21 行目の処理によって、5 行目のループ処理の都度、配送経路候補の数を MAX_WIDTH 個に絞る。

最後に 22 行目から 29 行目の処理によって、評価値が最大となる経路に繋がる s15 を s1 の次の移動先として決定する。

上記の処理を、2 行目のループ処理により、全ての荷物を運び終えるまで行う。

これまで述べた方式で初期解を求めた後、近傍探索方式と同様の改良操作を行う。

4.4 シミュレーションによる評価

4.4.1 評価モデル

評価モデルは基本的には、3.4.1 節と同じものを用いる。ただし、第 3 章での結果から、車両で配送するエリアとドローンで配送するエリアを分割するために使用する、幹線道路からの距離の閾値を 0.5km にした際は、ドローンで配送する荷物が多くなり過ぎ、効率的な配送ができないことが分かるため、この閾値は 1.0km, 1.5km, 2.0km, 2.5km の場合を想定した。

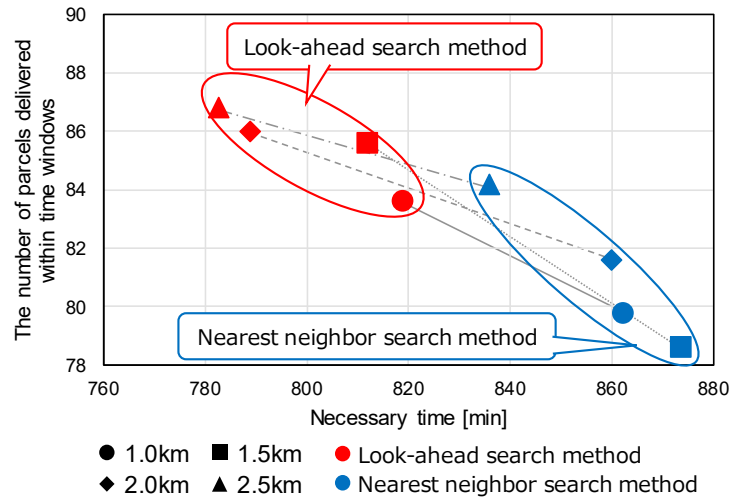
4.4.2 近傍探索方式との比較

前記したモデルに関して、先読み探索方式と近傍探索方式についてシミュレーション評価を行った。

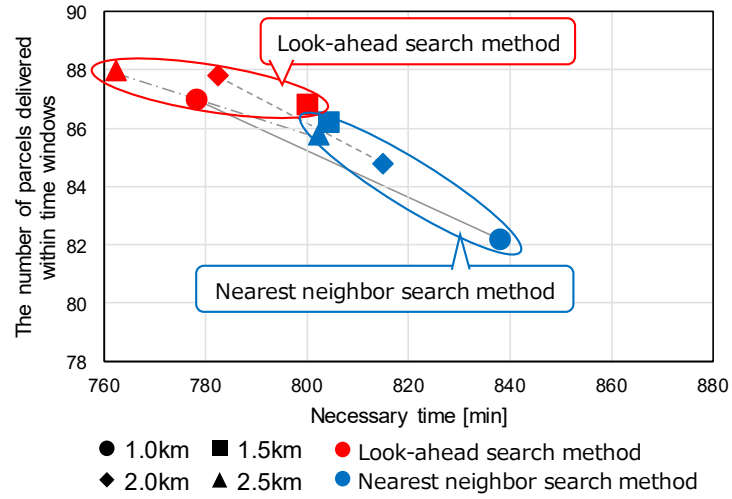
先読み探索方式のパラメータについては、4.4.3 節で示すように、幅が 20、深さが 3 の付近で解の改善効果が頭打ちになるため、それぞれ 20, 3 とした。

各方式における所要時間と指定時間帯内に配送できる荷物の個数を Figure 4-4, Figure 4-5 に示す。横軸を所要時間、縦軸を指定時間帯内に配送できる荷物の個数としている。すなわち、グラフの左上が双方の指標ともよい解、右下が双方の指標とも悪い解となっている。

丸や四角などのプロットの形は、幹線道路からの距離によって車両で配送するエリアとドローンで配送するエリアを分割する際の閾値を示しており、同じ閾値での結果を線で結んでいる。また、プロットの色は使用した方式を示しており、同じ方式の結果を丸枠で囲んでいる。

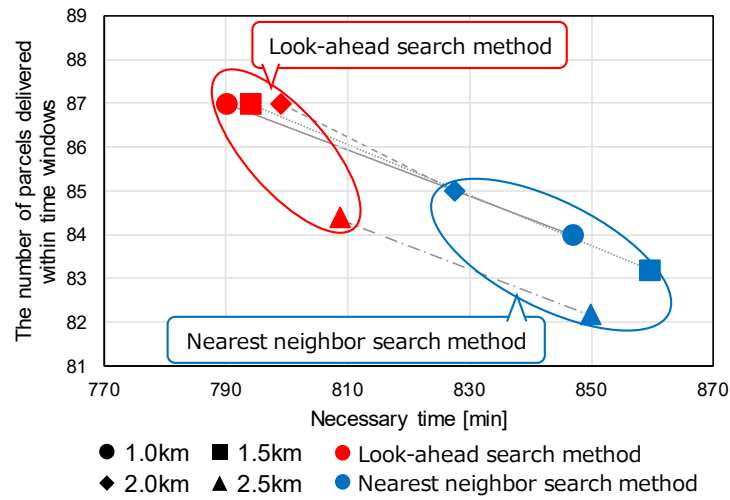


(a) Road model: 1, The number of airfields: 4

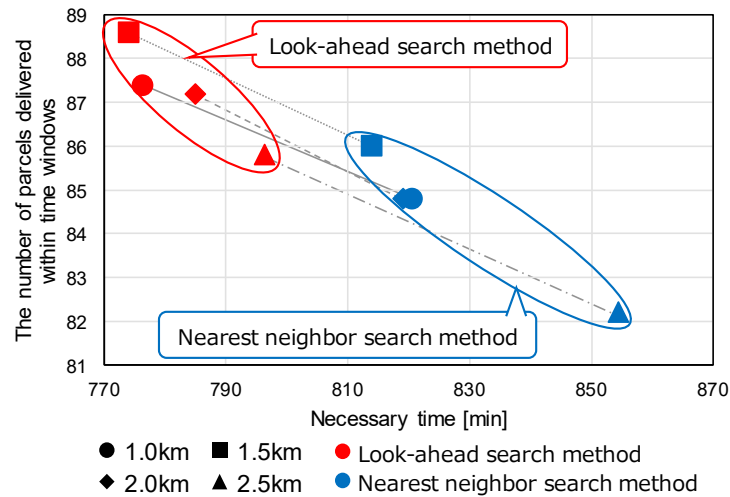


(b) Road model: 1, The number of airfields: 6

Figure 4-4 Necessary time and the number of parcels delivered within the delivery time windows (1)



(c) Road model: 2, The number of airfields: 4



(d) Road model: 2, The number of airfields: 6

Figure 4-5 Necessary time and the number of parcels delivered within the delivery time windows (2)

先読み探索方式はいずれの場合においても、近傍探索方式より、指定時間帯内の配送個数が増えており、かつ、所要時間が短くなっている。具体的には、指定時間帯内の配送個数は平均 3.8%増加、また、所要時間は平均 5.5%減少している。

道路モデル毎に比較すると、道路モデル 1 では、指定時間帯内の配送個数は平均 4.3%増加、所要時間は平均 5.5%減少でき、道路モデル 2 では、それぞれ平均 3.3%増加、平均 5.5%減少しており、道路モデルによる効果の差は見られない。

また、いずれの手法においても、道路モデル 1 では、車両で配送するエリアとドローンで配送するエリアを分割する際の閾値が 1.0km の場合の結果が悪く、道路モデル

2 では、この閾値が 2.5km の場合の結果が悪い。なお、この閾値が小さいと、ドローンで配送する荷物が多くなり、閾値が大きいと車両で配送する荷物が多くなる。すなわち、道路モデル 1 では、ドローンで配送する荷物が多い場合の結果が悪く、道路モデル 2 では、車両で配送する荷物が多い場合の結果が悪い。

これは、道路モデル 1 は道路密度が大きく、車両による配送が効率的になり、このため、ドローンで配送する荷物が増えすぎると、結果が悪くなりやすくなるためであると考えられる。また逆に、道路密度が小さい道路モデル 2 では、ドローンによる配送が効率的になり、車両で配送する荷物が増えすぎると、結果が悪くなりやすくなるためであると考えられる。

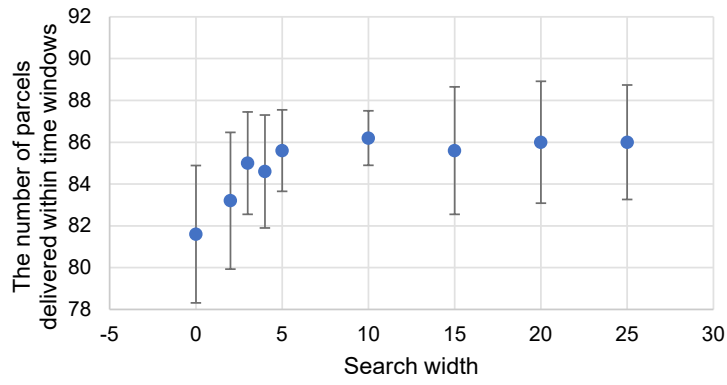
シミュレーションに用いた計算機の CPU は Intel Core i5 11400 2.60GHz であり、計算時間の平均は、先読み探索方式が 2 時間 36 分 16 秒、近傍探索方式が 16 秒であった。先読み探索方式は計算時間が大幅に大きくなっており、配送途中での配送先の追加などの、当日の計画変更は運用上困難であるが、配送前日の夜、もしくは、当日の朝には実行可能な計算時間に収まっている。

4.4.3 先読みパラメータによる比較

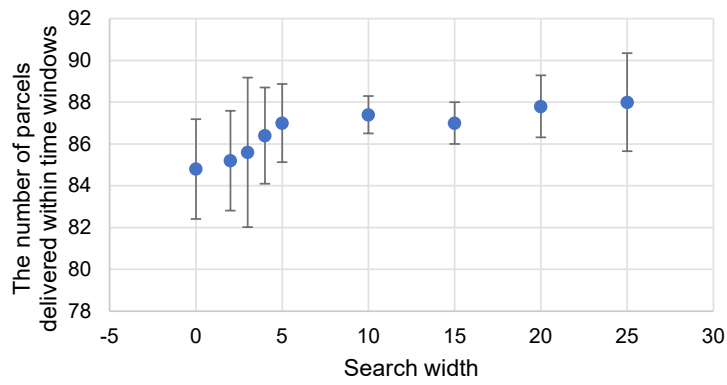
次に、先読みにおける幅と深さを変えた場合の評価を行った。ここでは、車両で配送するエリアとドローンで配送するエリアを分割する際の閾値は 2.0km とし、4.4.1 節で述べたように 1 つの道路形状に対して、5 ケースの配送要求を想定した。

Figure 4-6 は、先読みにおける深さを 3 に固定した際に、幅を 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25 と変化させた場合の、指定時間帯内に配送できる荷物の個数の平均と標準偏差を示している。比較における便宜上、近傍探索方式の解を、幅が 0 の際の解として示している。

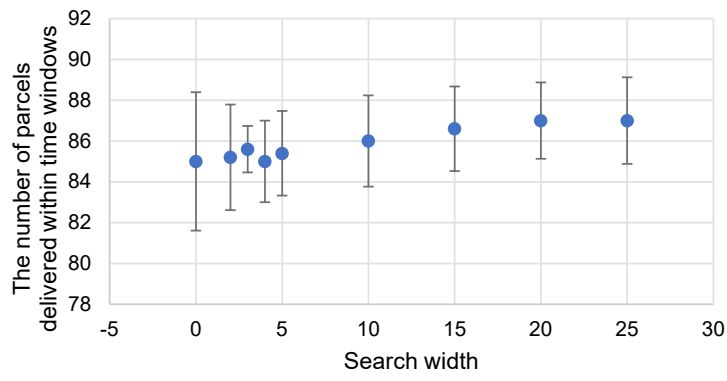
Figure 4-7 は、先読みにおける幅を 20 に固定した際に、深さを 1 から 4 まで変化させた場合の、指定時間帯内に配送できる荷物の個数の平均と標準偏差を示している。Figure 4-6 と同様、比較における便宜上、近傍探索方式の解を、深さが 0 の際の解として示している。なお、計算時間の都合で、深さが 4 の場合は、4.3.2 節で示した方法で、3 段階まで先読みした際に、経路候補を 400 個に絞り、ここからさらに 1 段階先読みする形で解を求めている。



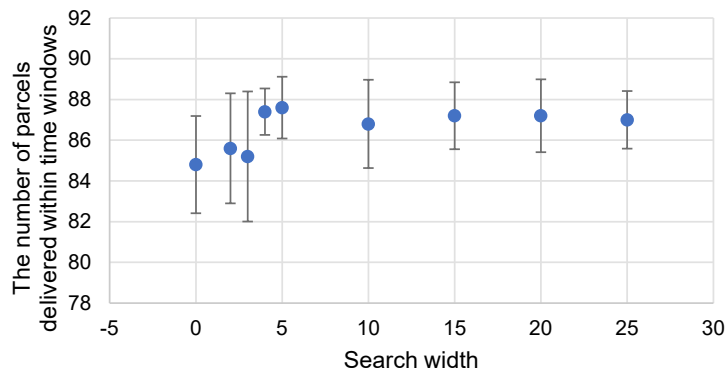
(a) Road model: 1, The number of airfields: 4



(b) Road model: 1, The number of airfields: 6

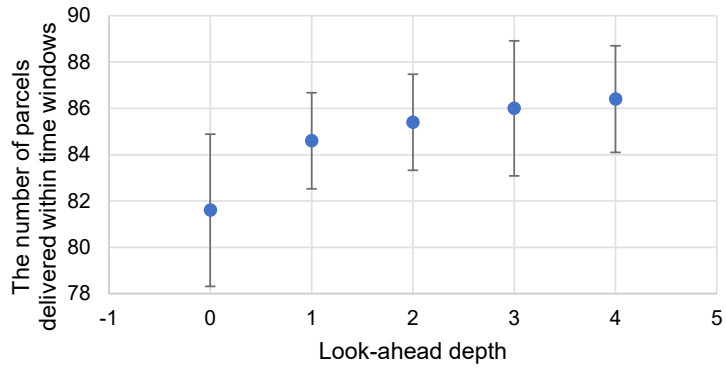


(c) Road model: 2, The number of airfields: 4

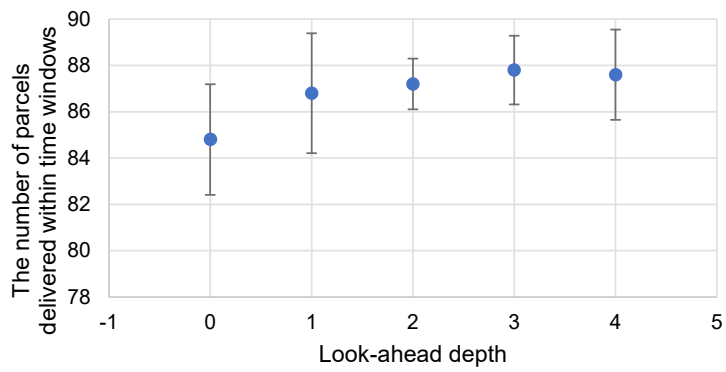


(d) Road model: 2, The number of airfields: 6

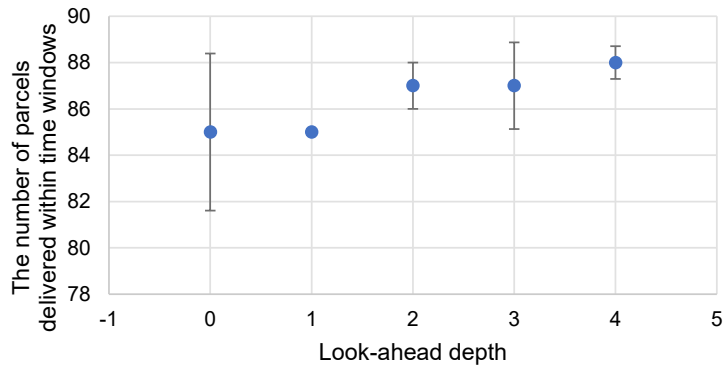
Figure 4-6 Comparison of solutions for each search width



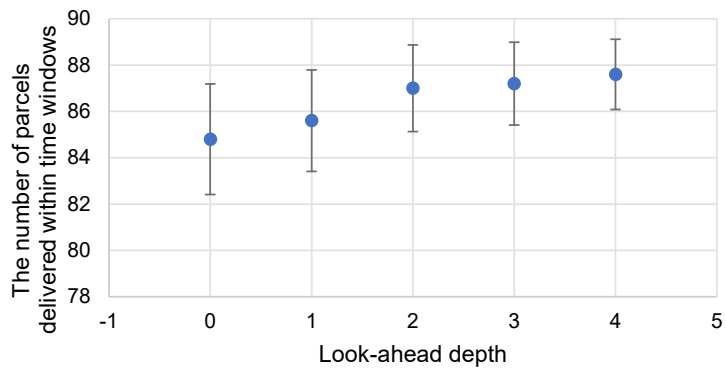
(a) Road model: 1, The number of airfields: 4



(b) Road model: 1, The number of airfields: 6



(c) Road model: 2, The number of airfields: 4



(d) Road model: 2, The number of airfields: 6

Figure 4-7 Comparison of solutions for each lookahead depth

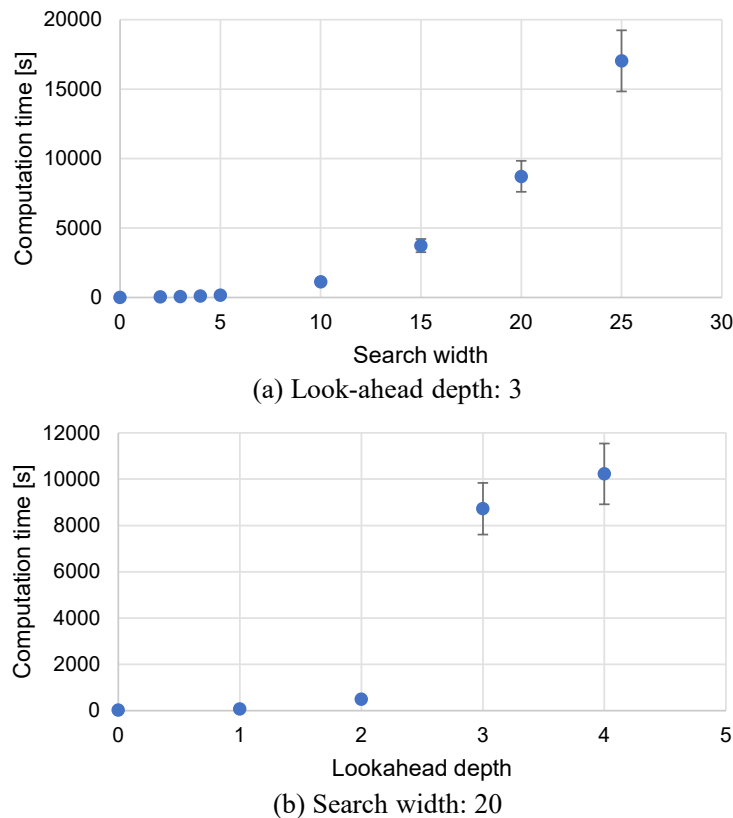


Figure 4-8 Computation time of look-ahead search method

Figure 4-8 は、先読みにおける深さを 3 に固定して、幅を変化させた場合と、幅を 20 に固定して、深さを変化させた場合の、計算時間の平均と標準偏差を示している。

先読みの幅が 2 から 5 の範囲では、幅を大きくすることにより、多くの場合で解が改善されている。一方、幅を 5 よりも大きくした場合は、半数以上の場合で解が改善されているが、改善された場合においても、改善量は小さくなっており、幅が 20 の辺りで改善は頭打ちになっている。

先読みする深さを変化させた場合は、深さが 1 から 3 の範囲では、深さを大きくすることにより、解が改善されているが、深さを 3 から 4 にした際は、解が改善されない場合もある。

ここで、先読みの幅や深さを大きくした場合に、解が改善されない状況について説明する。

まず、Figure 4-9 を用いて、先読みの幅を大きくした場合について説明する。Figure 4-9 (a)は経路と評価値の対応を示している。1st min, 2nd min, 3rd min と書いた地点はそれぞれ、重みが最小の地点、重みが 2 番目に小さい地点、重みが 3 番目に小さい

地点を示している。ここでは、81 が最大の評価値である。

Figure 4-9 (b)は、幅を 2、深さを 1 にして先読みを行った場合を示している。この場合、s1 の次の目的地を決める際には、重みが最小の地点である s12 と、重みが 2 番目に小さい地点である s25 を先読みする。その後は、重みが最小の地点を辿ることによって、2 つの経路を生成する。それぞれの経路の評価値は 79 と 78 であるので、この中で重みが最大である経路に繋がる s12 を、s1 の次の目的地として選択する。この場合、最大の評価値となる経路を選択する可能性が残る。

Figure 4-9 (c)は、幅を 3、深さを 1 にして先読みを行った場合を示している。この場合、s1 の次の目的地を決める際には、重みが最小の地点である s12 と、重みが 2 番目に小さい地点である s25 と、重みが 3 番目に小さい地点である s37 を先読みする。その後は、Figure 4-9 (b)の場合と同様に、重みが最小の地点を辿ることによって、3 つの経路を生成する。それぞれの経路の評価値は 79 と 78 と 80 であるので、この中で重みが最大である経路に繋がる s37 を、s1 の次の目的地として選択する。この場合、最大の評価値となる経路を選択する可能性が消える。

このように、幅を大きくした場合に、解が改善されない可能性が存在する。

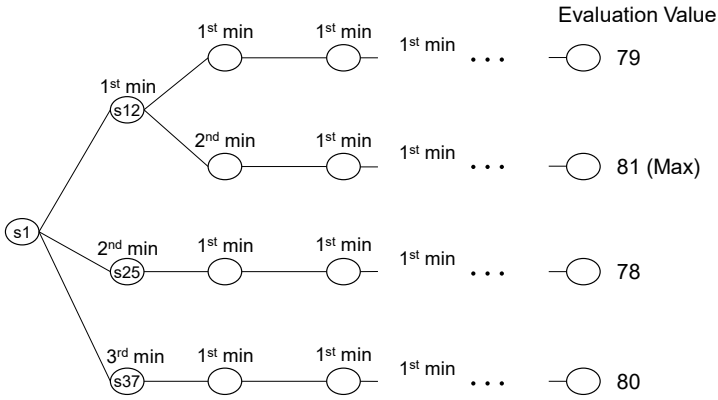
同様に、Figure 4-10 を用いて、先読みの深さを大きくした場合について説明する。Figure 4-10 (a)は Figure 4-9 (a)と同様に経路と評価値の対応を示している。

Figure 4-10 (b)は、幅を 2、深さを 1 にして先読みを行った場合を示している。この場合、s1 の次の目的地を決める際には、重みが最小の地点である s10 と、重みが 2 番目に小さい地点である s22 を先読みする。その後は、重みが最小の地点を辿ることによって、2 つの経路を生成する。それぞれの経路の評価値は 79 と 78 であるので、この中で重みが最大である経路に繋がる s10 を、s1 の次の目的地として選択する。この場合、最大の評価値となる経路を選択する可能性が残る。

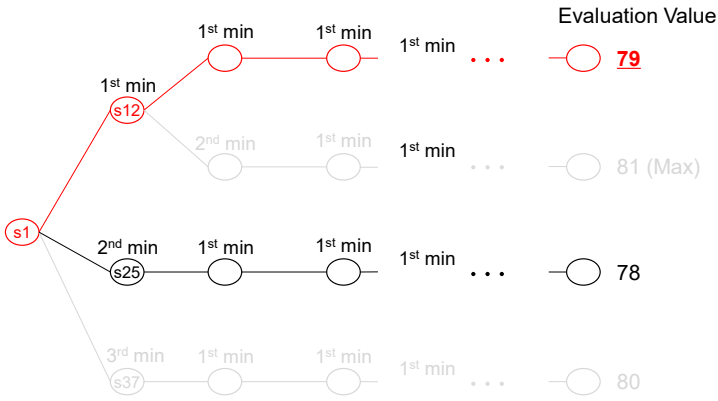
Figure 4-10 (c)は、幅を 2、深さを 2 にして先読みを行った場合を示している。この場合、s1 の次の目的地を決める際には、重みが最小の地点である s10 と、重みが 2 番目に小さい地点である s22 を先読みする。そして、s10 から、重みが最小の地点である s5 と、重みが 2 番目に小さい地点である s51 を先読みする。また、s22 から、重みが最小の地点である s11 と、重みが 2 番目に小さい地点である s47 を先読みする。その後は、重みが最小の地点を辿ることによって、4 つの経路を生成する。それぞれの経路の評価値は 79, 79, 78, 80 であるので、この中で重みが最大である経路に繋が

る s22 を, s1 の次の目的地として選択する。この場合, 最大の評価値となる経路を選択する可能性が消える。

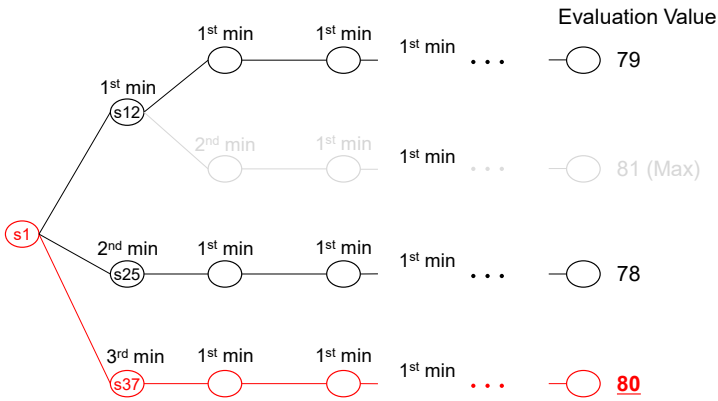
このように, 深さを大きくした場合に, 解が改善されない可能性が存在する。



(a) Evaluation Value

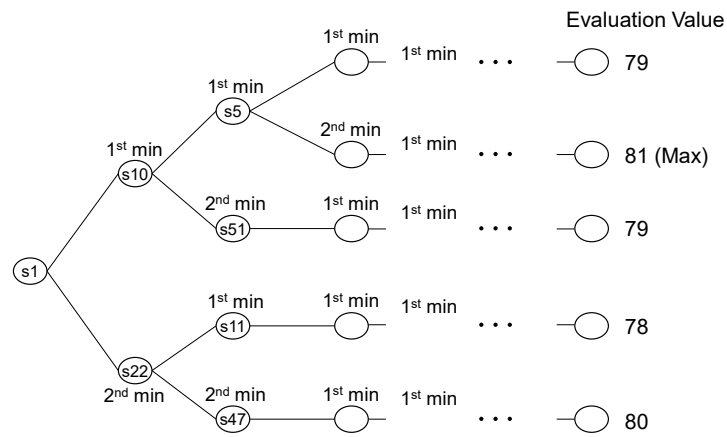


(b) Width: 2, Depth: 1

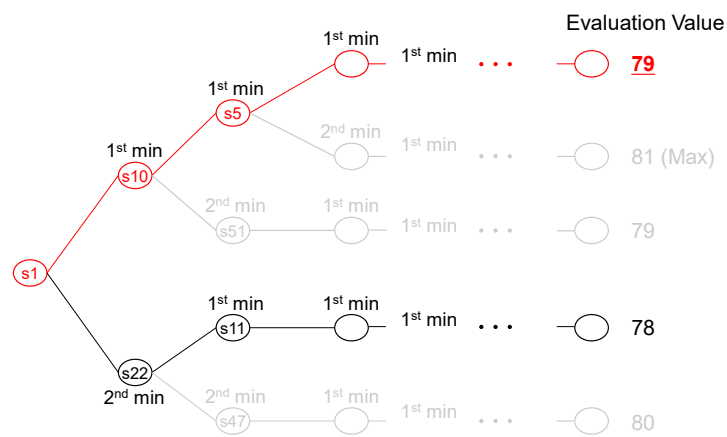


(c) Width: 3, Depth: 1

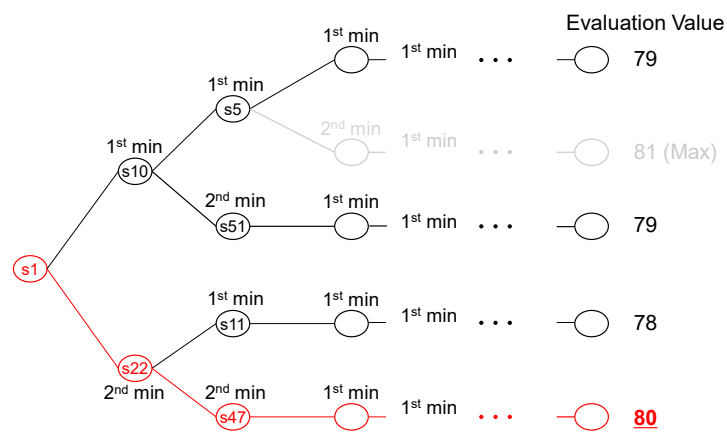
Figure 4-9 Difference in next destination when width is increased



(a) Evaluation Value



(b) Width: 2, Depth: 1



(c) Width: 2, Depth: 2

Figure 4-10 Difference in next destination when depth is increased

4.5 小規模問題での最適性の考察

最適解とは、指定時間帯内に配送できる荷物の個数が最大となる解であり、指定時間帯内に配送できる荷物の個数が最大となる解が複数ある場合は、この中で所要時間が最小となる解である。

最適解は総当たりで求めているが、計算時間の都合で、4.4.1 節で述べたものよりも小さい問題を扱っている。具体的には、車両で配送する荷物を 10 個、ドローンで配送する荷物を 3 個、ドローンの離着陸場を 2 箇所としている。

また、指定可能な配送時間帯を 4.4.1 節と同様にすると、荷物の数が少ないために、解に差が出なくなることが考えられるため、指定可能な配送時間帯は、9 時から 10 時、10 時から 11 時の 2 つとし、配送時間帯が指定されていない配送要求については、11 時までに配送できる場合に、配送指定時間帯内に配送できたとしている。

最適解、近傍探索方式、先読み探索方式のそれぞれにおける、指定時間帯内に配送できる荷物の個数と所要時間、また、算出に要した時間を Table 4-1, Table 4-2 に記す。シミュレーションに用いた計算機の CPU は、4.4.2 節と同様に Intel Core i5 11400 2.60GHz である。

近傍探索方式は、道路モデル 2 の場合に、指定時間帯内に配送できる荷物の個数が最適解よりも 1 つだけ少なくなっている。先読み探索方式は、いずれの場合においても、最適解と同じ個数になっている。所要時間については、近傍探索方式は平均 2.95%、先読み探索方式は平均 0.19%、最適解よりも大きくなっている。

道路モデル 1 については、先読み探索方式での解は最適解と同じになる一方、近傍探索方式でも、指定時間帯内に配送できる荷物の個数は最適解と等しく、所要時間も最適解と比べて 0.76% の増加に留まっている。このように、4.4.2 節の場合よりも、近傍探索方式と先読み探索方式による解の違いが見られない。これは、問題の小ささのために先読みの効果が現れづらいケースが存在するからであると考えられる。

なお、本節では計算時間の制約上、小規模な問題においてのみ、最適解と提案手法の解を比較しているが、より大規模な問題においては、最適解との差が大きくなる可能性があることに留意する必要がある。

Table 4-1 Comparison with optimal solution (Road model 1)

Solution	Optimal solution	Nearest neighbor search method	Look-ahead search method
# of parcels delivered within time windows	10	10	10
Necessary time [min]	220.08	221.76	220.08
Computation time [s]	389422.7	0.2	3.5

Table 4-2 Comparison with optimal solution (Road model 2)

	Optimal solution	Nearest neighbor search method	Look-ahead search method
# of parcels delivered within time windows	11	10	11
Necessary time [min]	194.40	204.40	195.12
Computation time [s]	383113.6	0.1	3.0

4.6 計算量についての考察

ここでは、先読み探索方式が、総当たりで解を求める場合よりも、大幅に計算時間を抑えることができることを示すために、計算量による考察を行う。車両で配送する荷物の個数を V 、ドローンで配送する荷物の個数を D 、ドローンの離着陸場の個数を A とする。なお、近傍探索方式の計算量の定式化は 3.4.4 節に記載のものを用いる。

4.6.1 総当たりで最適解を求める場合の計算量の定式化

車両が荷物を運び終えるまでに訪れる配送要求の個数は V である。一方、ドローンが 1 つの荷物を配送するために、車両はドローンの離陸時と着陸時の計 2 回離着陸場を訪れる必要がある。すなわち、車両が訪れる箇所の個数は $V + 2D$ である。ただし、効率的な配送を行うためには、ドローンは着陸した場所からそのまま離陸した方がよい。

また、本章の問題設定では、ドローンは、最初の荷物を搭載した状態で単独で配送

センターを出発してもよく、また、最後の荷物を配送した後に単独で配送センターに戻ってもよいとしており、効率的に配送するには、このような動作を行う方がよい。

このため、車両は、 V 個の配送要求を訪れ、また、ドローンを着陸させて離陸させるために、ドローンの離着陸場を $D - 1$ 回訪れる必要がある。以上より、車両が訪れる箇所の個数は $V + D - 1$ となる。この中で、どのタイミングで車両の配送要求を訪れるかの場合の数は、 ${}_{V+D-1}C_V$ となる。

車両の配送要求をどの順序で訪れるかの場合の数は $V!$ 、ドローンの配送要求をどの順序で訪れるかの場合の数は $D!$ 、 $D - 1$ 回訪れる必要があるドローンの離着陸場の訪問パターンの場合の数は A^{D-1} となる。

以上より、総当たりで試行する必要があるパターンの場合の数は、 ${}_{V+D-1}C_V \cdot V! \cdot D! \cdot A^{D-1}$ となり、計算量のオーダーは、 $O({}_{V+D-1}C_V \cdot V! \cdot D! \cdot A^{D-1})$ となる。

4.6.2 先読み探索方式の計算量の定式化

先読みにおける幅と深さをそれぞれ W と L とする。まず、近傍探索方式の初期解の生成における計算量のオーダーは、 $O((V + 2D)(V + AD))$ である。先読み探索方式では次の移動先を決定するために、 W^L 個の経路候補を求める必要があり、1つの経路候補を求める処理は近傍探索方式の初期解の生成方法と同等なので、次の移動先を決定するための計算量のオーダーは、 $O((V + 2D)(V + AD)W^L)$ となる。上述したように、車両が訪れる箇所の個数は $V + 2D$ であるため、先読み探索方式で初期解の生成に必要な計算量のオーダーは、 $O((V + 2D)^2(V + AD)W^L)$ となる。

なお、改良処理の計算量のオーダーは、 $O((V + 2D)^2(V + AD))$ である。

以上より、初期解の生成が計算量に対して支配的となっており、全体の計算量のオーダーは、 $O((V + 2D)^2(V + AD)W^L)$ となる。ここで、 D は V にほぼ比例すると考えられるので、計算量のオーダーは $O(V^3W^L)$ となる。

4.6.3 考察

先読み探索方式は、総当たりと比較して、荷物の数が増えた際の、計算量のオーダーの増加量が大幅に小さくなっている。

まず小規模な問題で確認する。道路モデル 2 において、ドローンで配送する荷物を

3 個, ドローンの離着陸場を 2 箇所固定し, 車両で配送する荷物を 6 個から 10 個まで変化させた際の, 総当たり, 近傍探索方式, 先読み探索方式の計算時間を Table 4-3, Table 4-4, Table 4-5 に示す。合わせて, 計算量のオーダーと計算時間との比を記している。ここでの比は, 計算時間を計算量のオーダーで除算した値を示している。

なお, 近傍探索方式の計算量のオーダーは, 3.4.4 節では改良操作の最後の処理が, 計算量に対して支配的であるとしている。しかし, 荷物の数が少ない際には, 初期解の生成や, 改良操作の他の処理の計算量が, 無視できる程には小さくないことから, これらを含めたオーダーを示している。

Table 4-3 Comparison of computation time and order of each method
(Brute-force search)

# of vehicle's parcels	6	7	8	9	10
Computation time [s]	42.7	324	2900.2	31277.2	389422.7
Computational order	483840	43545600	4354560	479001600	5748019200
Ratio	8.8×10^{-5}	7.4×10^{-5}	6.7×10^{-5}	6.5×10^{-5}	6.8×10^{-5}

Table 4-4 Comparison of computation time and order of each method
(Nearest neighbor search)

# of vehicle's parcels	6	7	8	9	10
Computation time [s]	0.062	0.069	0.08	0.11	0.14
Computational order	1974	2499	3108	3807	4602
Ratio	3.1×10^{-5}	2.8×10^{-5}	2.6×10^{-5}	2.9×10^{-5}	3.0×10^{-5}

Table 4-5 Comparison of computation time and order of each method
(Look-ahead search)

# of vehicle's parcels	6	7	8	9	10
Computation time [s]	0.66	1.05	1.48	2.09	3.05
Computational order	1728000	2744000	4096000	5832000	8000000
Ratio	3.8×10^{-7}	3.8×10^{-7}	3.6×10^{-7}	3.6×10^{-7}	3.8×10^{-7}

Table 4-3, Table 4-4, Table 4-5 に示すように、荷物の数が変化した場合、計算量のオーダーと計算時間の比は、各方式において大きく変化していない。このため、4.6.1 節、4.6.2 節で求めた計算量のオーダー計算式は、荷物の数による影響を正しく反映できていると考えられる。

一方、方式毎に比較すると、計算量のオーダーと計算時間の比が大きく異なっている。原因としては以下が考えられる。

まず、総当たりで試行する必要があるパターンの場合の数は、全てのパターンを数え上げている。一方、近傍探索方式と先読み探索方式については、配送順序により、各地点の重みを計算する回数や改良処理の試行回数が変わるが、計算量のオーダーの計算の便宜上、最も計算回数が増えるときを基準に求めている。このため、近傍探索方式と先読み探索方式については、総当たりのものと比べて、計算時間と比較した場合の計算量のオーダーが大きくなっており、その結果、計算量のオーダーと計算時間の比が小さくなっている。

また、先読み探索方式の計算量のオーダー計算式の中には、 W^L が存在しており、今回、 W は 20、 L は 3 である。しかし、荷物の数が少ないと、実際に先読みできる幅が 20 よりも小さくなる。また、経路が決まるに従い、先読みできる幅は減っていくが、計算量のオーダーの計算においては、この効果を見逃している。このため、荷物の数が少ない場合に、先読み探索方式については、計算時間と比較した場合の計算量のオーダーが大きくなっており、その結果、計算量のオーダーと計算時間の比が、他の方式のものに比べて小さくなっていると考えられる。

次に、先読み探索方式の計算量のオーダーである $O(V^3W^L)$ について、Figure 4-8 に示した計算時間を基に考察する。オーダー表記に含まれる、車両が配送する荷物の個数 V は Figure 4-8 の場合で一定であるので、ここでは、先読みパラメータ毎の W^L と、実際の計算時間の比を Table 4-6, Table 4-7 に示す。ここでの比は、計算時間を先読みパラメータ毎の W^L で除算した値を示している。

Table 4-6 では、計算時間が小さい場合に、 W^L と比べて計算時間が大きくなっている。これは、計算時間が小さい場合には、ファイルの読み込みや書き込みなどの、計算の前処理、後処理にあたる部分の処理時間が占める割合が大きくなるためであると考えられる。一方、幅が 10 以上の範囲では、 W^L の値にほぼ比例する形で計算時間が増加している。

Table 4-6 Comparison of computation time and order
(Look-ahead search, Look-ahead depth: 3)

Search width	2	3	4	5	10	15	20	25
Computation time [s]	51.8	69.8	109.8	175.1	1128.2	3735.3	8722.2	17033.5
W^L	8	27	64	125	1000	3375	8000	15625
Ratio	6.5	2.6	1.7	1.4	1.1	1.1	1.1	1.1

Table 4-7 Comparison of computation time and order
(Look-ahead search, Search width: 20)

Look-ahead depth	1	2	3	4
Computation time [s]	66.9	491.5	8722.2	10226.8
W^L	20	400	8000	160000
Ratio	3.3	1.2	1.1	0.1

Table 4-7 でも、Table 4-6 と同様に、計算時間が小さい場合に、 W^L と比べて計算時間が大きくなっているが、理由は Table 4-6 の際に述べたものと同じであると考えられる。また、深さが 4 の際に、 W^L と比べて計算時間が大幅に小さくなっているが、これは、4.4.3 節で述べたように、深さが 4 の場合は、計算時間の都合で、3 段階まで先読みした際に、一度経路候補を絞っているからである。これ以外の、深さが 2 と 3 の範囲では、 W^L の値にほぼ比例する形で計算時間が増加している。

以上より、ここで求めた先読み探索方式の計算量のオーダー計算式は、先読みの深さと幅による影響を正しく反映できていると考えられる。

ここで、4.4.3 節で述べたように、先読みの幅 W が 2 から 5 の範囲では、幅を大きくすることにより、多くの場合で解が改善される一方、幅 W を 5 よりも大きくした場合は、半数以上の場合で解が改善されるが、改善された場合においても、改善量は小さくなっており、幅が 20 の辺りで改善は頭打ちになる。また、深さ L が 1 から 3 の範囲では、深さを大きくすることにより、解が改善されるが、深さを 3 から 4 にした際は、解が改善されない場合もある。

このため、良い解を得るためには、幅 W を 20、深さ L を 3 にすればよいが、幅 W を 5 程度まで小さくすることにより、解を大きく悪化させることなく、計算時間を大幅に短縮できることが、4.4.3 節の結果と、得られた計算量のオーダー計算式から分かる。

最後に、4.4.1 節の問題設定における、総当たりでの計算時間を見積もる。4.5 節の問題設定の場合、 $v_{+D-1}C_V \cdot V! \cdot D! \cdot A^{D-1}$ の値は、 1.3×10^{10} となる。一方、4.4.1 節の問題設定の 1 つのケースでは、車両で配送する荷物が 71 個、ドローンで配送する荷物が 19 個、ドローンの離着陸場が 4 箇所であり、この際の、 $v_{+D-1}C_V \cdot V! \cdot D! \cdot A^{D-1}$ の値は、 1.2×10^{150} となる。4.5 節の問題設定での計算時間は、およそ 3.8×10^5 秒であるため、4.4.1 節の問題設定での計算時間は、およそ 3.5×10^{145} 秒 (4.0×10^{140} 日) となることが想定される。このため、実運用において、総当たりで最適解を求めるのは、計算時間の面で困難であることが分かる。

4.7 結言

配送時間帯指定を考慮した、車両とドローンの連携による宅配荷物の配送方式を提案した。提案方式では、配送箇所の重みに基づいて、次の訪問箇所の候補を絞った上で先読みをすることで、配送を行う前日夜や当日朝に実行可能な計算時間で効率的な配送計画を立案している。提案方式をシミュレーションにより評価し、近傍探索方式に比べて計算時間が大きくなるものの、指定時間帯内での配送個数は平均 3.8%増加し、所要時間は平均 5.5%減少することを確認した。また、小規模な問題において最適解と比べた場合、指定時間帯内での配送個数は変わらず、所要時間の増加が平均 0.19%に留まることを確認した。

第 3 章と同様に、提案方式では考慮されていない実運用における制約が存在する。今後はこれらを考慮した形での方式検討が課題である。また、小規模な問題において最適解との比較を行ったが、より大規模な問題における解の最適性については、今後検討する必要がある。

第5章

結論

5.1 本研究のまとめ

本論文では、地域内貨客輸送の効率的運用について検討し、需要予測情報による駐車場運用を含む乗合タクシー配車方式、車両とドローンの連携による宅配荷物の配送計画立案の近傍探索方式、車両とドローンの連携による宅配荷物の配送計画立案の先読み探索方式を提案した。本論文では、これらの研究成果を以下の4章に分けて述べた。

第1章では、国内の特に地方部において、人の移動手段の確保と物流機能の確保が大きな問題となっていることを説明し、貨客輸送の効率的な運用の必要性を示した。そして、効率的な運用を行うためには、輸送を担う移動体が、どのような順序で出発地点や目的地点を訪れるかを考えるだけでなく、移動体の待機場所や他の移動体との結節点となる地上設備を、どのように選択し、どのタイミングで訪れるかも考慮する必要があることを述べた。

次に、移動体の待機場所の選択方式が重要になるケースとしては、住民のリアルタイムな移動需要への対応が、また、他の移動体との結節点の選択方式が重要となるケースとしては、車両とドローンを連携させた宅配荷物の配送が、それぞれ存在することを述べた。

そして、住民のリアルタイムな移動要求への対応については、乗客の待ち時間短縮を目的とした、移動体の待機場所である駐車場運用を含む乗合タクシーの配車計画の立案を、荷物の配送要求への対応については、宅配効率化を目的とした、車両とドローンの結節点であるドローンの離着陸場への訪問を含む配送計画の立案を、それぞれ課題として整理した。

最後に、1つ目の課題に対しては、需要予測情報による駐車場運用を含む乗合タクシー配車方式の研究、2つ目の課題に対しては、第1に車両とドローンの連携による宅配荷物の配送計画立案のための近傍探索方式の研究、第2に車両とドローンの連携による宅配荷物の配送計画立案のための先読み探索方式の研究を、研究方針として示

した。

第 2 章では、乗客の待ち時間短縮を目的とした、駐車場運用を含む乗合タクシーの配車計画の立案という課題に対して、需要予測情報に基づいて駐車場の重みを求め、重みに比例する形で、乗客が割り当たっていない車両を駐車場に待機させることにより、将来、需要が発生した際に、素早く乗客を迎えに行くことを可能とする方式を提案した。提案方式を、ランダムな道路モデルと実際の道路形状に基づいた道路モデルの双方においてシミュレーションにより評価し、乗客が割り当たっていない車両を、最も近い駐車場に待機させる方式と比較して、乗客の待ち時間が 25.4%から 46.4%短縮できることを確認した。

第 3 章では、宅配効率化を目的とした、車両とドローンを連携させた配送計画の立案という課題に対して、各段階における車両の配送箇所とドローンの離着陸場の重みを求め、逐次的に次の訪問箇所を決めることにより、短い計算時間で配送計画を立案する近傍探索方式を提案した。提案方式をシミュレーションにより評価し、計算時間が、荷物の再配達や集荷要求が追加された際においても、再計算可能な範囲に収まっていることを確認するとともに、車両による配送を優先させる方式やドローンの回収を優先させる方式に比べて、所要時間が短縮され、指定時間帯に配送可能な荷物の個数が増加することを確認した。また、最初の訪問先のみ、重みが 2 番目に小さい箇所を選択する方式と比較した場合、指定時間帯内に配送できる荷物の個数は同等、もしくは、増加し、6 割以上の場合において、所要時間が減少することを確認した。

第 4 章では、宅配効率化を目的とした、車両とドローンを連携させた配送計画の立案という課題に対して、近傍探索方式を拡張した、先読み探索方式を提案した。先読み探索方式では、配送を行う前日夜や当日朝に実行可能な計算時間で、より効率的な配送計画を立案することを狙いに、近傍探索方式で用いた重みに基づいて、次の訪問箇所の候補を絞った上で複数の経路を先読みし、この中で最も効率的な配送経路に繋がる箇所を次の訪問先とすることにより、配送経路を決定した。提案方式をシミュレーションにより評価し、近傍探索方式に比べて計算時間が大きくなるものの、指定時間帯内での配送個数は平均 3.8%増加、また、所要時間は平均 5.5%減少することを確認した。そして、小規模な問題において、最適解と比べた場合の指定時間帯内での配送個数は変わらず、所要時間の増加が平均 0.19%に留まることを確認した。

5.2 今後の課題

最後に、本研究における今後の課題について述べる。

(1) 運用時の制約の考慮

本論文で検討した「需要予測情報による駐車場運用を含む乗合タクシー配車方式」では、最大遅延可能時間は一律としていたが、実際には状況によって許容される遅延時間は異なることが考えられる。「車両とドローンの連携による宅配荷物の配送計画立案の近傍探索方式」と「車両とドローンの連携による宅配荷物の配送計画立案の先読み探索方式」では、ドローンはエリア内のどこでも飛行可能としていたが、飛行可能エリアが制限されている場合もある。また、いずれの方式においてもドライバーの休憩時間を考慮に入っていないが、実際には昼休みなどの休憩時間を確保する必要がある。このような運用時の制約を考慮した形での方式の検討が残された課題である。

(2) 使用する地上設備の位置の決定方法の検討

本論文で検討した「需要予測情報による駐車場運用を含む乗合タクシー配車方式」では、駅やショッピングモールなどの施設の近くの駐車場と、これらの中間程度にある駐車場を使用可能としているが、それ以外の場所に使用可能な駐車場が存在する場合もある。その際に、効率的な運用をするためには、いずれの駐車場を車両の待機場所として使用可能とすればよいかを特定することも重要である。

また、「車両とドローンの連携による宅配荷物の配送計画立案の近傍探索方式」と「車両とドローンの連携による宅配荷物の配送計画立案の先読み探索方式」では、ドローンの離着陸場の位置は前提として与えているが、離着陸場の位置が配送効率に影響することが考えられる。このため、道路形状や家の位置、ドローン飛行可能領域などから、効果的なドローンの離着陸場の位置を特定することも求められる。

例えば、ドローンの離着陸場の位置の決定方法としては、家の位置に対して K-means 法を用いることが考えられるが、K-means 法で得られた重心に最も近い道路上の位置を離着陸場にした場合と、重心に近いいくつかの道路上の位置の中から、クラスタに属する家への移動時間の総和が最小となる地点を離着陸場にした場合を比べた場合、後者の方が、指定時間帯内に配送可能な荷物の個数は 0.6%増加、配送に要する時間は 1.1%減少する[59]。

このように、使用する地上設備の位置の決定方法の検討が残された課題である。

参考文献

- [1] 国土交通省, “国土交通白書”, 2021.
- [2] 松原仁, 田柳恵美子, “公共交通の課題解決と今後の展開”, サービスロジー, Vol.2, No.1, pp.16–19, 2015.
- [3] 国土交通省, “公共交通政策の現状と課題”, 2018.
- [4] 国土交通省, “地域を支える持続可能な物流ネットワークの構築に関するモデル事業報告書”, 2016.
- [5] 国土交通省, “物流を取り巻く動向と物流施策の現状について”, 2020.
- [6] 国土交通省, “地域交通をめぐる現状と課題”, 2019.
- [7] E. Frachtenberg, “Practical Drone Delivery”, Computer, Vol.52, No.12, pp.53–57, 2019.
- [8] D. Schneider, “The Delivery Drones Are Coming”, IEEE Spectrum, Vol.57, No.1, pp.28–29, 2020.
- [9] 国土交通省, “物流の現状とドローン物流の主な取組”, 2019.
- [10] 吉藤智一, “ドローン物流の最新事例と社会実装の展望”, 計画行政, Vol.43, No.2, pp.15–20, 2020.
- [11] 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.
- [12] C. C. Murray and R. Raj, “The multiple flying sidekicks traveling salesman problem: Parcel delivery with multiple drones”, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol.110, pp.368–398, 2020.
- [13] L. D. P. Pugliese, F. Guerriero, and G. Macrina, “Using drones for parcels delivery process”, Procedia Manufacturing, Vol.42, pp.488–497, 2020.
- [14] J.-F. Cordeau and G. Laporte, “The dial-a-ride problem: Models and algorithms”, Annals of Operations Research, Vol.153, No.1, pp.29–46, 2007.
- [15] 上杉健太郎, 渡邊豊英, 向直人, “K-means 法を用いた寄り道型デマンドバスの並列運行手法”, 電子情報通信学会 第 19 回 データ工学ワークショップ 第 6 回日本デー

データベース学会年次大会, 2008.

- [16] 坂井佑理, 瀧瀬和樹, 浅野泰仁, 吉川正俊, “寄り道型デマンドバス路線のルート設計に関する手法の検討”, 第 10 回 データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム 論文集, 2018.
- [17] 野田五十樹, 篠田孝祐, 太田正幸, 中島秀之, “シミュレーションによるデマンドバス利便性の評価”, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.1, pp.242–252, 2008.
- [18] S. Lakshmi and S. Nithin, “A Smart Transportation System Facilitating On-Demand Bus and Route Allocation”, Proceedings of 2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics, pp.1000–1003, 2017.
- [19] R. Masson, F. Lehuédé, and O. Péton, “The Dial-A-Ride Problem with Transfers”, Computers & Operations Research, Vol.41, No.1, pp.12–23, 2014.
- [20] A. Ham, “Dial-a-Ride Problem with Meeting Point Feature Known-as Express-Pool”, IEEE Access, Vol.9, pp.86404–86411, 2021.
- [21] O. Tellez, S. Vercraene, F. Lehuédé, and O. Péton, “The time-consistent dial-a-ride problem”, Network, Vol.79, No.4, pp.452–478, 2022.
- [22] 坪内孝太, 大和裕幸, 稗方和夫, “オンデマンドバスのためのリアルタイムスケジューリングアルゴリズムとシミュレーションによるその評価”, 運輸政策研究, Vol.10, No.4, pp.2–10, 2008.
- [23] P. M. d'Orey, R. Fernandes, and M. Ferreira, “Empirical evaluation of a dynamic and distributed taxi-sharing system”, Proceedings of 2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, pp.140–146, 2012.
- [24] S. Ma, Y. Zheng, and O. Wolfson, “T-share: A largescale dynamic taxi ridesharing service”, Proceedings of 2013 IEEE 29th International Conference on Data Engineering (ICDE), pp.410–421, 2013.
- [25] D. O. Santos and E. C. Xavier, “Dynamic Taxi and Ridesharing: A Framework and Heuristics for the Optimization Problem”, Proceedings of the Twenty-Third international joint conference on Artificial Intelligence, pp.2885–2891, 2013.
- [26] Y. Tong, J. She, B. Ding, L. Chen, T. Wo, and K. Xu, K, “Online minimum matching in real-time spatial data: Experiments and analysis”, Proceedings of VLDB Endowment, Vol.9, No.12, pp.1053–1064, 2016.
- [27] P. Santi, G. Resta, M. Szell, S. Sobolevsky, S. H. Strogatz, and C. Ratti,

- “Quantifying the benefits of vehicle pooling with shareability networks”, *PNAS*, Vol.111, No.37, pp.13290–13294, 2014.
- [28] J. Alonso-Mora, S. Samaranayake, A. Wallar, E. Frazzoli, and D. Rus, “On-demand high-capacity ride-sharing via dynamic trip-vehicle assignment”, *PNAS*, Vol.114, No.3, pp.462–467, 2017.
- [29] M. M. Vazifteh, P. Santi, G. Resta, S. H. Strogatz, and C. Ratti, “Addressing the minimum fleet problem in on-demand urban mobility”, *Nature*, Vol.557, pp.534–538, 2018.
- [30] Q. Lin, L. Dengy, J. Sun, and M. Chen, “Optimal Demand-Aware Ride-Sharing Routing”, *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications* 2018, pp. 2699–2707, 2018.
- [31] J. Alonso-Mora, A. Wallar, and D. Rus, “Predictive routing for autonomous mobility-on-demand systems with ride-sharing”, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.3583–3590, 2017.
- [32] 大社綾乃, 大滝啓介, 小出智士, 西智樹, “相乗りのための将来需要を考慮した経路最適化”, *情報処理学会論文誌*, Vol.60, No.10, pp.1653–1661, 2019.
- [33] I. Khoufi, A. Laouiti, and C. Adjih, “A Survey of Recent Extended Variants of the Traveling Salesman and Vehicle Routing Problems for Unmanned Aerial Vehicles”, *MDPI drones*, Vol.3, No.3, 2019. available from
[〈https://doi.org/10.3390/drones3030066〉](https://doi.org/10.3390/drones3030066) (accessed 2022-05-03).
- [34] S. H. Chung, B. Sah, and J. Lee, “Optimization for drone and drone-truck combined operations: A review of the state of the art and future directions”, *Computers and Operations Research*, Vol.123, 2020. available from
[〈https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105004〉](https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105004) (accessed 2022-05-03).
- [35] G. Macrina, L. D. P. Pugliese, F. Guerriero, and G. Laporte, “Drone-aided routing: A literature review”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.120, 2020. available from
[〈https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102762〉](https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102762) (accessed 2022-05-03).
- [36] D. R. Vitoriaa, E. L. Solano-Charris, A. Muñoz-Villamizar, and J. R. Montoya-Torres, “Unmanned aerial vehicles/drones in vehicle routing problems: a literature review”, *International Transactions in Operational Research*, Vol.28, Issue 4, pp.1626–1657, 2021.

- [37] M. W. Ulmer and B. W. Thomas, “Same-Day Delivery with a Heterogeneous Fleet of Drones and Vehicles”, *Networks*, pp.475–505, 2018. available from <https://doi.org/10.1002/net.21855> (accessed 2022-05-03).
- [38] X. Chen, M. W. Ulmer, and B. W. Thomas, “Deep Q-Learning for Same-Day Delivery with a Heterogeneous Fleet of Vehicles and Drones”, *arXiv preprint arXiv:1910.11901*, 2019.
- [39] S. Choudhury, K. Solovey, M. J. Kochenderfer, and M. Pavone, “Efficient Large-Scale Multi-Drone Delivery Using Transit Networks”, *arXiv*, 2020.
- [40] A. M. Ham, “Integrated scheduling of m-truck, m-drone, and m-depot constrained by time-window, drop-pickup, and m-visit using constraint programming”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.91, pp.1–14, 2018.
- [41] 田柳恵美子, 中島秀之, “スマートモビリティ社会実装の課題と条件 — AI オンデマンド交通による地域公共交通の再生を目指して—”, *人工知能学会誌*, No.37, No.2, pp.172–178, 2022.
- [42] 中島秀之, 平田圭二, 田柳恵美子, 鈴木恵二, 金森亮, 野田五十樹, 岩村龍一, 松舘渉, “乗合と相乗りはどう違うか モビリティシェアリング方式の整理と将来展開”, *第34回人工知能学会全国大会論文集*, 2020.
- [43] 落合純一, 金森亮, 平田圭二, 野田五十樹, “名古屋市のタクシー配車データを用いた Smart Access Vehicle Service の効率性評価”, *第32回人工知能学会全国大会論文集*, 2018.
- [44] D. Schneider, “Air traffic control for delivery drones”, *IEEE Spectrum*, Vol. 54, Issue.1, pp.32–33, 2017.
- [45] E. Ackerman and E. Strickland, “Medical delivery drones take flight in east africa”, *IEEE Spectrum*, Vol.55, Issue.1, pp.34–35, 2018.
- [46] P. E. Ross, “Iceland's consumers try drone delivery: The startup Aha takes on Amazon with basic drones bearing burgers”, *IEEE Spectrum*, Vol.55, Issue.10, pp.12–13, 2018.
- [47] 国土交通省, “宅配の再配達の発生による社会的損失の試算について”, 2015.
- [48] 国土交通省, “アンケート回答の結果について (宅配便の再配達に関するアンケート調査)”, 2015.
- [49] L. M. Gambardella, E. Taillard, and G. Agazzi, “MACS-VRPTW: A Multiple Ant

Colony System for Vehicle Routing Problems with Time Windows”, New Ideas in Optimization, McGraw-Hill, London, pp.63–76, 1999.

- [50] 有熊翼, 松富達夫, 木村有寿, “ファジィ性を考慮した時間枠付き多目的配送計画問題の解法”, 日本知能情報ファジィ学会 ファジィシステムシンポジウム 講演論文集, pp.514–517, 2011.
- [51] O. Bräysy and M. Gendreau, “Vehicle Routing Problem with Time Windows, Part I: Route Construction and Local Search Algorithms”, Transportation Science, Vol.39, No.1, pp.104–118, 2005.
- [52] 堀悟, 薦田憲久, “需要予測情報による駐車場情報を含む乗合タクシー配車方式”, 電気学会 第 80 回情報システム研究会, IS-19-073, pp.65–70, 2019.
- [53] 堀悟, 薦田憲久, “需要予測情報を用いた乗合タクシー配車方式の評価”, 令和 2 年電気学会全国大会講演論文集, S10-6, p.S10(9), 2020.
- [54] 堀悟, 薦田憲久, “需要予測情報による駐車場運用を含む乗合タクシー配車方式”, 電気学会論文誌 C, Vol.140, No.10, pp.1110–1118, 2020.
- [55] 堀悟, 薦田憲久, 大川剛直, “車両とドローンの連携による宅配荷物の配送方式”, 電気学会 第 84 回情報システム研究会, IS-21-010, pp.49–54, 2021.
- [56] 堀悟, 薦田憲久, 大川剛直, “車両とドローンの連携による宅配荷物の配送方式”, 電気学会論文誌 C, Vol.141, No.11, pp.1175–1184, 2021.
- [57] 堀悟, 薦田憲久, 大川剛直, “車両とドローンの連携による宅配荷物の配送計画立案のための先読み探索方式”, 電気学会 第 87 回情報システム研究会, IS-22-010, pp.49–54, 2022.
- [58] 堀悟, 薦田憲久, 大川剛直, “車両とドローンの連携による宅配荷物の配送計画立案のための先読み探索方式”, 電気学会論文誌 C, Vol.143, No.3, 2023 (採録決定) .
- [59] S. Hori, N. Komoda, and T. Ohkawa, “Drone airfield location determination method for parcel delivery by vehicle and drone”, Proceedings of IEEE/SICE International Symposium on System Integrations, 2023 (to appear).

研究業績

本研究に関する発表論文

A. 学術論文誌論文

1. 堀悟, 薦田憲久, “需要予測情報による駐車場運用を含む乗合タクシー配車方式”, 電気学会論文誌 C, Vol.140, No.10, pp.1110–1118, 2020.
2. 堀悟, 薦田憲久, 大川剛直, “車両とドローンの連携による宅配荷物の配送方式”, 電気学会論文誌 C, Vol.141, No.11, pp.1175–1184, 2021.
3. 堀悟, 薦田憲久, 大川剛直, “車両とドローンの連携による宅配荷物の配送計画立案のための先読み探索方式”, 電気学会論文誌 C, Vol.143, No.3, 2023 (採録決定) .

B. 国際会議

1. S. Hori, N. Komoda, and T. Ohkawa, “Drone airfield location determination method for parcel delivery by vehicle and drone”, Proceedings of IEEE/SICE International Symposium on System Integrations, 2023 (to appear).

C. 学会講演

1. 堀悟, 薦田憲久, “需要予測情報による駐車場情報を含む乗合タクシー配車方式”, 電気学会 第 80 回情報システム研究会, IS-19-073, pp.65–70, 2019.
2. 堀悟, 薦田憲久, “需要予測情報を用いた乗合タクシー配車方式の評価”, 令和 2 年電気学会全国大会講演論文集, S10-6, p.S10(9), 2020.
3. 堀悟, 薦田憲久, 大川剛直, “車両とドローンの連携による宅配荷物の配送方式”, 電気学会 第 84 回情報システム研究会, IS-21-010, pp.49–54, 2021.

4. 堀悟, 薦田憲久, 大川剛直, “車両とドローンの連携による宅配荷物の配送計画立案のための先読み探索方式”, 電気学会 第87回情報システム研究会, IS-22-010, pp.49–54, 2022.

その他の発表論文

A. 学術論文誌論文

1. 手島久典, 堀悟, 崎川修一郎, 佐藤昇, “鉄道線路幾何形状のモデリングと列車進路制御への適用”, 電気学会論文誌 C, Vol.137, No.3, pp.474–481, 2017.

B. 国際会議

1. S. Hori, H. Kato, H. Fujii, and S. Shin, “Collecting Plant Floor Data using Agent Embedded in Controller”, Proceedings of ICROS-SICE International Joint Conference, pp.1889–1894, 2009.
2. H. Teshima, S. Hori, A. Shimura, and N. Sato, “Railway Track Layout Modelling and its Application to an Automatic Route Setting System”, Proceedings of 14th International Conference on Railway Engineering Design and Optimization (COMPRAIL 2014), Vol.135, pp.75–86, 2014.
3. T. Ebata, S. Hori, K. Suzuki, and K. Yano, “Proposal of Supply and Demand Mediation type Transportation Service based on Dissatisfaction”, Proceedings of 9th International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI), pp.633–638, 2020.

C. 学会講演

1. 堀悟, 藤岡孝芳, 鮫嶋茂稔, “無線ネットワークを使用した設備の監視制御システムにおける端末管理方式の開発”, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2007)シンポジウム, pp.1223–1226, 2007.
2. 堀悟, 高橋由泰, 中川香織, 三部良太, “異業種連携によるバリューチェーン創生に向けた事業価値評価方式の提案”, 電子情報通信学会 ソフトウェアインタプライズモデ

リング研究会, pp.29–33, 2017.

D. その他

1. 日立東大ラボ, “Society 5.0 人間中心の超スマート社会”, 日本経済新聞出版, 2018.
(4章2節「都市システムの共生：共生自律分散システム」担当, pp.130–134)
2. K. Mori and T. Kunifuji, “Autonomous Decentralized Systems and their Applications in Transport and Infrastructure”, The Institution of Engineering and Technology, 2019. (Part 2 - ADS applications in intelligent infrastructure, 4 ATOS (autonomous decentralized transport operation control system) 担当, pp.85–116)

本論文の構成

本論文の第 2 章は，以下の論文からなる。

- 堀悟，薦田憲久，“需要予測情報による駐車場情報を含む乗合タクシー配車方式”，電気学会 第 80 回情報システム研究会, IS-19-073, pp.65–70, 2019.
- 堀悟，薦田憲久，“需要予測情報を用いた乗合タクシー配車方式の評価”，令和 2 年電気学会全国大会講演論文集, S10-6, p.S10(9), 2020.
- 堀悟，薦田憲久，“需要予測情報による駐車場運用を含む乗合タクシー配車方式”，電気学会論文誌 C, Vol.140, No.10, pp.1110–1118, 2020.

本論文の第 3 章は，以下の論文からなる。

- 堀悟，薦田憲久，大川剛直，“車両とドローンの連携による宅配荷物の配送方式”，電気学会 第 84 回情報システム研究会, IS-21-010, pp.49–54, 2021.
- 堀悟，薦田憲久，大川剛直，“車両とドローンの連携による宅配荷物の配送方式”，電気学会論文誌 C, Vol.141, No.11, pp.1175–1184, 2021.

本論文の第 4 章は，以下の論文からなる。

- 堀悟，薦田憲久，大川剛直，“車両とドローンの連携による宅配荷物の配送計画立案のための先読み探索方式”，電気学会 第 87 回情報システム研究会, IS-22-010, pp.49–54, 2022.
- 堀悟，薦田憲久，大川剛直，“車両とドローンの連携による宅配荷物の配送計画立案のための先読み探索方式”，電気学会論文誌 C, Vol.143, No.3, 2023 (採録決定) .

謝 辞

本研究の全過程を通じて、終始懇切丁寧なるご指導とご鞭撻、格別のご配慮を賜りました神戸大学大学院システム情報学研究科情報科学専攻 大川剛直 教授，ならびに，大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 薦田憲久 招へい教授（大阪大学名誉教授）に深く感謝申し上げます。

本研究をまとめるにあたり、貴重なお時間を割いて頂き、丁寧なるご教示を賜りました神戸大学大学院システム情報学研究科情報科学専攻 玉置久 教授，システム科学専攻 貝原俊也 教授に深く感謝申し上げます。

本研究の機会と大学院博士課程後期課程に進学する機会を与えて頂くとともに、研究を進めるにあたりご配慮を賜りました（株）日立製作所 研究開発グループ デジタルサービス研究統括本部 統括本部長 西澤格 博士，社会システムイノベーションセンタ センタ長 加藤博光 博士，デジタルエコノミー研究部 部長 長野裕史 氏に心より御礼申し上げます。

本研究の機会を与えて頂き、研究への多数のご助言を賜りました（株）日立製作所 イノベーション成長戦略本部 デジタルサービスイノベーション事業戦略室部長 谷繁幸 博士，研究開発グループ デジタルサービス研究統括本部 社会システムイノベーションセンタ 山田仁志夫 氏（Hitachi America, Ltd. 出向中）に感謝いたします。ならびに格別なるご指導とご配慮を賜りました（株）日立製作所 研究開発グループ デジタルサービス研究統括本部 社会システムイノベーションセンタの各位に心から御礼申し上げます。

最後に、学位取得に向け応援してくれた家族に感謝致します。

神戸大学博士論文

「地上設備を考慮した地域内輸送の効率的運用に関する研究」 全 105 頁

提 出 日 2023 年 1 月 9 日

本博士論文が神戸大学機関リポジトリ Kernel にて掲載される場合、
掲載登録日（公開日）はリポジトリの該当ページ上に掲載されます。

© 堀 悟

本論文の内容の一部あるいは全部を無断で複製・転載・翻訳することを禁じます。