

市街地配送における中継可能な協調型輸送モデルの有用性の検証

藤井 貴彬[†] 浅野 泰仁^{††} 吉川 正俊^{††}

[†] 京都大学情報学研究科 〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町 36-1

^{††} 東洋大学情報連携学部 〒113-0053 東京都北区赤羽台 1-7-11

E-mail: [†]lab5fujii@gmail.com, ^{††}yasuhito.asano@iniad.org, ^{†††}yoshikawa@i.kyoto-u.ac.jp

あらまし 近年、宅配サービスにおける荷物は急速に増加しているが、輸送者の数は十分ではなく、その負担の増加が社会的問題となっている。この問題を解決する方法として、宅配業者以外の人も参加できる協調型輸送が期待されている。しかし、一つの荷物を一人の輸送者が輸送する現状の仕組みでは、輸送者を長時間拘束することになるため、一般の人が容易に参加できるものではない。そこで我々は、一般の人が日々の移動のかたわら等で気軽に参加できるように、複数の輸送者が一つの荷物を中継して輸送することを可能とした“中継可能な協調型輸送モデル”を考案した。我々の先行研究では、この輸送モデルであっても輸送計画が適切でないと荷物を運ぶ距離が伸びてしまい無駄な労力や費用が発生する可能性があると考え、輸送モデルの定式化を行い、輸送者が担当する荷物の割当てや輸送者の配送経路である輸送計画を適切に立てる手法を提案した。我々はこの輸送モデルが効果的に適用される問題設定として、移動のかたわら等で容易に参加できるように、コンビニエンスストアや各家庭と配送センター等の集積所との間のような市街地の規模で荷物を運ぶ“市街地配送”であると考えた。しかし、問題設定によっては、この輸送モデル上で最も適切な計画でもさほど有効ではない可能性がある。そのため、本研究ではこの輸送モデルがどのような問題設定であれば有効に機能するかについて検証及び実験を行なった。

キーワード グラフ, 配送, 協調型輸送, 最適化, 最適経路, シェアリングエコノミー

1 はじめに

スマートフォンやパソコンの普及により、インターネットがより身近なものとなり、それに伴い Amazon. com¹などのオンラインショッピングの需要も増加している。結果として、オンラインショッピングで注文された商品を配送するために輸送形態も変化した。Jiang ら [2] や Mallapragada ら [3], Xu ら [4] もオンラインショッピングが我々の生活に影響を与え、利便性や値段を変化させていると述べている。しかし、サービスなどが充実すればするほど配送する荷物も増加し、運送業者の負担も増加している。実際に日本の運送業者であるヤマト運送は輸送サービスの負担が大きすぎると発表している²。

運送業者の負担の増加は解決すべき問題としてすでに認識されており、負担を軽減しようと様々な試みが行われている。その一つの例として、協調型輸送がある。これは運送業者のみが輸送を行うのではなく、様々な人が参加する輸送を行うものである。その例として、Amazon は既存の配達業者ではなく一般の人が荷物を配送する新しいオンデマンドのサービス、Amazon Flex³を開始した。また、様々な配送・輸送サービスを提供している Uber が Uber Freight⁴や Uber Eats⁵という協調型輸送

サービスを開始した。Uber Freight は有資格の運送業者や個人トラック運転手が輸送する貨物を手軽に探して受注できるようにしたオンデマンドのサービスであり、Uber Eats は

このような協調型輸送サービスは一人の人が一つの荷物をサービスセンターやショップから目的地まで運ぶものである。その結果、比較的長い時間と長距離の配送に従事できる人しかこの輸送に参加できない。そこで我々は複数の輸送者が一つの荷物を配送するサービスについて考えた。例えば、ある人が学校へ通学するとき、荷物を自分の家に近い施設 A(例えばコンビニエンスストア) から学校に近い施設 B に少し迂回して持っていく。そして、施設 B 近くに住んでいるもう一人がそこから荷物を引き継いで、通勤するついでに仕事場近くの施設 C へ運ぶ。結果的に、施設 A から施設 C まで運んだ二人は日頃の通学や通勤から少し多く移動するだけ済むはずであるため、それほど負担はないはずである。この中継可能な協調型輸送によって、荷物を最終目的地まで輸送者の個々の負担をかけることなく運ぶことが可能になる。

図 1 は中継可能な協調型輸送が有用である具体的なグラフの例である。(a) のようなグラフについて考え、各円はグラフの節点を表している。節点にある記号は、二人の輸送者 x と y と一つの荷物 n の出発地点を表す x_s, y_s, n_s と目的地点を表す x_d, y_d, n_d である。また各辺の値は節点間の距離を示している。このグラフにおいて、輸送者 x と y は両者共にただ目的地点に到達するだけならば距離 4 だけで移動できる。次に (b) のように輸送者 x が一人で荷物を輸送するならば合計距離が 16 となり、12 増加することとなる。一方 (c) のように輸送者 y が一

1 : <https://www.amazon.co.jp>

2 : <https://mainichi.jp/articles/20170407/k00/00e/020/198000c>

3 : <https://flex.amazon.com>

4 : <https://freight.uber.com>

5 : <https://www.uber.com/jp/ja/drive/delivery/>

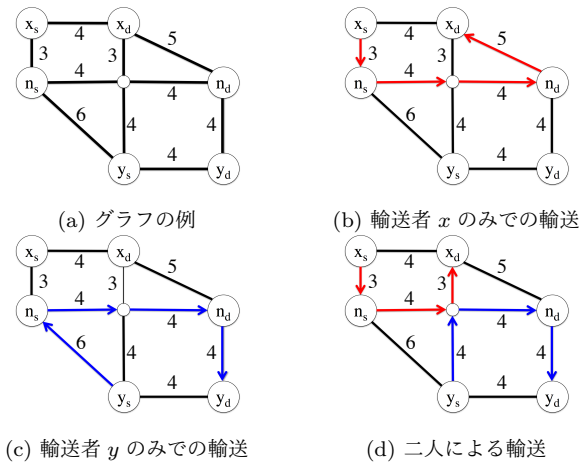


図 1 協調型輸送が有用である例

人で荷物を輸送するならば合計距離が 18 となり、14 増加することとなる。しかし、(d) のように二人で輸送した場合ならば、輸送者 x の合計距離は 10、輸送者 y の合計距離は 12 となり、それぞれの増加した距離は 6 と 8 になる。このように、中継可能な協調型輸送により二人で輸送すれば、一人一人の迂回する負担は一人で輸送するより小さくすることができる。

しかし、この中継可能な協調型輸送モデルであっても無計画・未秩序に荷物が配送されたならば、却って輸送者の移動距離が伸び負担が増加する可能性がある。そこで我々は先行研究 [1] としてこの輸送モデルの定式化を行い、輸送者がどの荷物を担当しどのような輸送経路で運ぶかの輸送計画の厳密解法を考案し求めた。

本研究では、中継可能な協調型輸送モデルが有効に作用するのはどのような輸送形態であるかについて考え、それは人々が移動のかたわら等で容易に参加しやすい状況であると判断した。この状況に沿った問題設定は先に例としてあげた Uber Eats と同程度の規模の荷物の輸送である、コンビニエンスストアや各家庭と配送センター等の集積所との間を輸送する市街地輸送であると考えた。また、荷物の依頼や輸送者の参加をいつでも可能にするオンデマンド方式にすることによりさらに多くの荷物や輸送者がこの輸送システムを利用できると考えられる。しかし、オンデマンド方式では先行研究で提案した厳密解法はバッチ処理を前提としたものであるためその手法は適したものではなく、まだ時間計算量も大きすぎるため現実的ではない。そこで、この市街地配送における輸送問題を部分問題に分割し先行研究で提案した厳密解法を利用する近似解法の考案をした。ただし、この手法には問題があり、問題設定によっては中継を利用しない輸送モデルよりも輸送できる荷物が数が減少し、また輸送距離が増加するためシステム側や輸送者に却って不利益や負担を与える可能性がある。そこで、本研究の貢献点として、この輸送モデルがどのような問題設定であれば有効にするかについて検証及び実験を行った。

2 関連研究

複数人が合流するときにそれぞれ最短距離の合計が最小とな

る地点を求める研究に、Yan らの研究 [5] がある。更にこの研究を発展させたものとして、複数人が好きな経路を持ち、それぞれの経路からの迂回した最短距離の合計が最小となる地点を求める研究に、Ahmadi と Nascimento の研究 [6] がある。

本研究でも、一つの荷物を複数の輸送者によって輸送される場合には荷物を引き継ぐ中継地点が存在するため、輸送者と輸送者がどこで合流するべきかを決定しなければならない。しかし、[5] [6] の研究と異なり、合流地点と輸送者の位置だけではなく荷物の出発地点及び目的地も考慮しなければならない。また、本研究では輸送者及び荷物に出発時刻と到着時刻が存在する。そのため、輸送者の移動距離の合計を最小にするだけでは出発時刻及び到着時刻を満たさない場合が存在する。よって、それら時間制約も考慮して移動距離の合計を最小にする必要がある。

次に Dantzig と Ramserfor により提唱された配送問題がある [7]。この問題は特定の施設にある輸送車が顧客の荷物を輸送・回収する問題である。配送計画問題には条件設定によって様々な問題に分類される。Nagy と Salhi の研究 [8]、Ho らの研究 [9]、Yu らの研究 [10] では特定の施設が一つではなく複数の場合に拡張した配送問題を扱っている。また、Salhi らの研究 [11] と Lahyani らの研究 [12] では輸送車が 1 種類ではなく、異なる積載量の輸送車で配送する場合の配送問題を扱っている。さらに、Garcia-Najera と Bullinaria の研究 [13] や Vidal らの研究 [14] では顧客の荷物の回収に時間制約を与えた配送問題を扱っている。特に、[14] では複数の施設かつ荷物の回収に時間制約を与えた場合でも対応できることが言及されている。

本研究は配送計画問題を大幅に拡張したものと考えられる。配送計画問題では特定の施設に全ての荷物を回収する問題であるため輸送車と荷物の目的地は特定の施設に絞られる。しかし、本研究では輸送者と荷物の目的地が全ての地点でも可能であるという点で異なっている。また、時間制約については荷物だけではなく輸送する側にも存在している点でも異なっている。

また、合流を考慮した経路最適化問題の研究に Zhang らの研究 [15] や Takise らの研究 [16] がある。合流を考慮した経路最適化問題とは、複数のユーザが各々の出発地点から目的地へ向かうとき経路の途中で合流して移動することに利益があると考え、その合流の利益も考慮した最短経路を決定する問題である。さらに、合流を考慮した問題を派生させたライドシェアリングの研究として Cao らの研究 [17] や Drews らの研究 [18] がある。合流を考慮した問題と異なる点は、合流を考慮した問題はどちらも移動可能であることに對し、ライドシェアリングでは輸送を行う一方のみが移動可能であるという点である。

本研究も合流を考慮した経路最適化問題やライドシェアリングの問題の一種と捉えることができる。例えば、本研究における荷物を客、輸送者をタクシーに変換すればライドシェアリングのように扱うことができる。しかし、一般的なライドシェアリングでは一台のタクシーが客を目的地まで運びきることに對し、本研究では複数の輸送者が中継して輸送することも可能としている点で異なっており、[15] [16] [17] [18] よりも計算量が

大きくなると予想される。

3 中継可能な協調型輸送モデル

本章では先行研究で提案した中継可能な協調型輸送モデルをどのように市街地配送に適応すべきか議論するために、このモデルの定式化及び最適化問題について説明している。3.1 節では、中継可能な協調型輸送モデルにおける問題の入力となる道路情報・荷物・輸送者と、問題の出力となる輸送計画の定義を行い、最適な輸送計画を明確化するために、システム側（配送サービス会社など）の利益の定義をしている。3.2 節では、以上に基く問題の定式化のまとめを行っている。

3.1 問題の定式化のための定義及び制約

まず、問題の入力となる道路情報、荷物とその時刻制約、輸送者とその時刻制約の定義を与える。ただし、これらの情報を全てあらかじめ用意されているバッチ処理を前提した定義である。

定義 1. [道路情報 (グラフ)] 道路情報は有向グラフ $G(V, E)$ と表す。各辺 $e \in E$ の始点を $v_s(e) \in V$ と表し、終点を $v_d(e) \in V$ と表す。各辺 e の距離を $w(e) > 0$ と表す。節点 v から v' にその節点間の最短経路で移動するために要する距離を $W(v, v') > 0$ と表す。

定義 2. [荷物と時刻制約] 荷物の集合を B と表す。荷物 $b_i \in B$ の出発地点を $s(b_i) \in V$ 、目的地点を $d(b_i) \in V$ 、荷物が輸送可能となる時刻を $t_s(b_i)$ 、目的地点に到着しなければならない上限時刻を $t_d(b_i)$ とする。

定義 3. [輸送者と時刻制約] 輸送者の集合を U とする。各輸送者 $u_j \in U$ の 出発地点を $d(u_j) \in V$ 、目的地点を $d(u_j) \in V$ 、輸送者が移動可能となる時刻を $t_s(u_j)$ 、目的地点に到着しなければならない上限時刻を $t_d(u_j)$ 、同時に輸送可能な荷物の数を $m(u_j) \geq 1$ とする。ただし、全ての輸送者は同じ速度 v_U で移動し、その速度を維持し続けるとする。

次に、問題の出力は、以下で定義される、荷物を運ぶことのできる輸送計画となる。

定義 4. [輸送計画] 各荷物 $b \in B$ の輸送計画とは、 $s(b)$ から $t(b)$ までの輸送経路 p_b と、各辺の移動時刻および担当輸送者の情報からなる。この計画の経路長を $len(p_b)$ で表す。各輸送者 $u \in U$ の輸送計画とは、 $s(u)$ から $t(u)$ までの輸送経路 p_u と、各辺の移動時刻、および各辺で運ぶ荷物の情報からなる。この計画の経路長を $len(p_u)$ で表す。荷物の輸送経路の集合を $P_B = \{p_b \mid b \in B\}$ 、輸送者の輸送経路の集合を $P_U = \{p_u \mid u \in U\}$ と表す。

この輸送計画が時刻制約を満たすならば、それはこの問題の解となる。この解が最適であるかどうかを議論するには、この輸送計画に対してシステムが得られる利益を定める必要がある。

本研究では一つの荷物を複数人で運ぶ中継を可能とした輸送モデルを考えている。そのため、ある荷物の輸送計画の担当輸

送者が二人以上になっても良い。(中継を許さない輸送モデルであるならば、ある荷物の輸送計画の担当輸送者は一人に限られる。)

システム側の利益を決定する利益関数を定義するために、まず収入関数と支出関数を定義する。収入関数 Rwd_{in} は各荷物の大きさと最短経路における輸送距離に応じた金額に設定される。つまり収入関数は、荷物の大きさを x 、定数を α とすると収入関数は $Rwd_{in}(b, p_b) = \alpha \cdot x \cdot len(p_b)$ ($b \in B$) となる。

一方、支出関数 Rwd_{out} は2種類の方法が考えられる。一つ目の方法は、輸送者が荷物を輸送するために要した移動距離のみに応じて金額を設定する方法で、各輸送者は輸送計画で移動する距離に比例したものが報酬となる。このときの支出関数は、定数を β とすると支出関数は $Rwd_{out}(u, p_u) = \beta \cdot len(p_u)$ ($u \in U$) となる。もう一つの方法は、輸送者が荷物を輸送するため要した移動距離だけでなく輸送者の元々の移動距離も考慮して金額を設定する方法で、各輸送者の報酬は輸送計画で移動した距離から出発地点から目的地点までの移動距離を引いた距離に比例するものになる。つまり、このときの支出関数は、定数を β' とすると支出関数は $Rwd'_{out}(u, p_u) = \beta' (len(p_u) - w(s(u), d(u)))$ ($u \in U$) となる。

この二つの関数にはどちらにもメリット・デメリットが存在する。前者は元々の移動距離が長い輸送者が報酬を得やすくなっており、後者は元々の移動距離が短い輸送者が報酬を得やすくなっている。本研究では前者を支出関数として利益関数を定義する。

以上より、システム側にとっての利益関数 Rwd は次のように定義される。

定義 5. [利益関数]

$$Rwd(P_B, P_U) = \sum_{b \in B} Rwd_{in}(b, p_b) - \sum_{u \in U} Rwd_{out}(u, p_u)$$

$$\text{where } P_B = \{p_b \mid b \in B\}, P_U = \{p_u \mid u \in U\} \quad (1)$$

3.2 最適化問題

前節より、この研究で考えた問題は次のように定式化される。入力 道路情報 $G(V, E)$ 、荷物集合 B と各荷物 $b_i \in B$ の 出発・目的地点 $s(b_i)$ 、 $d(b_i)$ およびそれらにおける時刻制約 $t_s(b_i)$ 、 $t_d(b_i)$ 、輸送者集合 U と各輸送者 $u_j \in U$ の 出発・目的地点 $s(u_j)$ 、 $d(u_j)$ およびそれらにおける時刻制約 $t_s(u_j)$ 、 $t_d(u_j)$ 。

出力 各荷物及び各輸送者の輸送計画

目的関数 最大化 $Rwd(P_B, P_U)$

問題を簡単にするため、本論文では次の三つを条件設定として加えた。

I 荷物の輸送経路は出発地点と目的地点を結ぶ最短経路(複数ある場合は予め定めた最短経路)に限定する

II 中継が出来る場所を限定し、各荷物の輸送経路を等分割した節点のみにする。

III 各輸送者 u が一度に輸送できる積載荷物数 $m(u)$ は $m(u) = 1$ に限定する

我々は条件設定Ⅰは合理的だと考えている．条件設定Ⅱについても，どこでも荷物が中継できるよりいくつか限定された場所（例えばコンビニエンスストアなど）で中継する方が自然であり合理的だと考えている．また，条件設定Ⅲがない問題にアルゴリズムが拡張できるとも考えている．

4 市街地配送における中継可能な協調型輸送モデル

本章では市街地配送においてどのように中継可能な協調型輸送モデルを利用するかについての議論を行なっている．

4.1 節では，先行研究で提案した厳密解法が市街地配送においては適用することが困難であることを説明しており，3.2 節では，市街地配送に適用できる近似解法の提案を行なっている．

4.1 厳密解法の限界

まず，本研究で述べている市街地配送とは，荷物を輸送を依頼する依頼人は配送したい荷物があれば好きな時に依頼をシステム側へ送り，荷物を配送する輸送者は時間が空いているならば好きなときに配送に参加することのできるオンデマンドによる処理を想定している．そのため，荷物と輸送者の情報をあらかじめ用意することが困難である．ゆえに，我々は先行研究 [1] で提案している中継可能な協調型輸送モデルの厳密解法はあらかじめそれらの情報が用意されているバッチ処理を前提とした手法であるため，市街地配送にそのまま適用することが不可能である．また，この厳密解法は非常に時間計算量が掛かる手法であり，たとえ規模が小さい問題であった場合によっては数時間の計算を要する場合があった．したがって，オンデマンドによる配送システムを想定したならば，現実的な時間で得られる輸送モデルの規模は非常に小さく，市街地規模の輸送モデルを全て計算することは現実的ではない．

以上のことから，市街地配送に中継可能な協調型輸送モデルを適応させた場合に厳密解法による最適化は困難である．したがって，本研究ではこの問題を近似解法による最適化を行うことを提案する．次節よりその近似解法について説明する．

4.2 近似解法

本研究の問題を解くにあたり，前節で厳密解法を用いることはバッチ処理から変更された点とこの問題規模に対する時間計算量の膨大さの点の 2 点から困難であると説明した．そこで，この問題を厳密解法で現実的な時間で解くことのできる規模に分割して部分問題を作成し，逐次的にこの部分問題を解けば近似解法として問題全体を解く手法を提案する．全体の方針は，荷物の部分集合 \hat{B} と輸送者の部分集合 \hat{U} を作成し，3.2 節で定式化された問題として厳密解法を解き，輸送計画を求める．そして，全ての荷物が荷物の部分集合に分割され全ての荷物および輸送者の輸送計画が求まるまで繰り返す方法である．手順は荷物を部分集合に分割し，その後輸送者を荷物の部分集合に応じて分割する．荷物の部分集合を分割する方法は，依頼により追加される荷物がある一定数溜まるまで待ち，一定数貯まれば，その荷物集合を分割した荷物の部分集合とする．輸送者の部分集合を分割する方法は，荷物の部分集合が決定した時点で

荷物の割当てが可能である輸送者全員を輸送者の部分集合とする．このように分割することにより，全ての荷物と輸送者の輸送計画を決定する．ここで，次の条件設定を追加する．

Ⅳ 一度荷物を割当てられた輸送者はその割当てを取り消されることはないとする．

条件設定Ⅳは，既に割当てられた取消して別の荷物の割当てを行うと，取消された荷物の割当てを新たに考える必要が生まれ，このことが連鎖的に発生し永久に割当てが決まり切らない場合が考えられるために追加している．また，条件設定Ⅳは輸送者に与えた指示を変えないということを意味しており，こちらの方が自然であり合理的だと考えている．

以上の説明した近似解法により市街地配送は中継可能な協調型輸送モデルにより効率的な輸送が期待できる．しかし，この手法には問題点がある．それはどのような問題設定であればこの輸送モデルが市街地配送において有効に機能するか不鮮明な点であり，問題設定によっては中継を利用しない方が有効である可能性がある．中継を利用した輸送モデルでは一つの荷物を複数人で輸送する場合が発生する．条件設定Ⅳより一度割当てられた輸送者はその割当てを取り消されないため，荷物の割当てが可能である輸送者として部分問題の輸送者の部分集合に再度含まれることはなくなる．ゆえに，分割した部分問題のうち時刻が遅い部分問題の中には，中継を利用しない輸送モデルに比べ，中継を利用した輸送モデルの方が荷物の割当てが可能である輸送者が少ない可能性がある．このことにより，中継を利用した輸送モデルの方が効率が悪い輸送や輸送不可能となる荷物が生まれうる．したがって，中継可能な協調型輸送モデルはどのような問題設定であれば有効に機能するか明確にする必要があると考え，次章ではその検証及び実験を行なった．

5 検証及び実験

5.1 検証内容

前章で述べたように，市街地配送に提案手法を適用させても上手く機能するとは限らない．そこで，どのような問題設定であれば効率的に働くかを次の三つに注目して検証を行った．

- 荷物の数に対する輸送者の人数．
- 輸送者の迂回可能な平均時間．
- 荷物の平均距離に対する輸送者の平均距離．

二つ目の輸送者の迂回可能な平均時間とは，輸送者が時刻制約を満たす範囲内で荷物の輸送のために利用できる平均時間のことである．また，三つ目の荷物の平均距離と輸送者の平均距離とは，荷物・輸送者それぞれの出発地点から目的地点までの距離の平均のことである．これら 3 点は問題設定として定める都市によって大きく変化すると考えられる．例えばその都市が地方都市なのか，また首都などの主要都市によっても大きく変化する．さらにその都市での主に利用する交通手段や，公共交通機関であれば行き来する頻度によっても変化すると考えられる．これらの要素は中継を利用した効率度に大きく影響すると考えられるため，次節より実験を行った．実験で使った道路ネッ

トワークは OpenStreetMap より取得した⁶京都市の道路ネットワークを使用し,それはおよそ北大路通り・川端通り・丸太町通り・白川通りの四つの通りに囲まれた範囲のものである. これらの実験には OS が Mac OS Mojave,CPU が 2.3GHz Intel Core i5, メモリが 16GB である MacBook Pro を使用し,C++ (g++ 4.2.1) を用いて行なった.

5.2 荷物の数に対する輸送者の人数

検証方法は輸送者の人数のみを変えた各 10 個のサンプルを作成し,サンプルごとに中継を利用しない輸送モデルに比べどの程度輸送者の迂回距離が減少したのか,各荷物の輸送経路の決定にどの程度の実行時間がかかるかを比較・計測した. サンプルは次のデータセットより作成した. ただし,荷物の出発地点・目的地のいずれかが 5ヶ所に限定されているのは,集積所から各家庭へまたはその逆での輸送を想定しているためである.

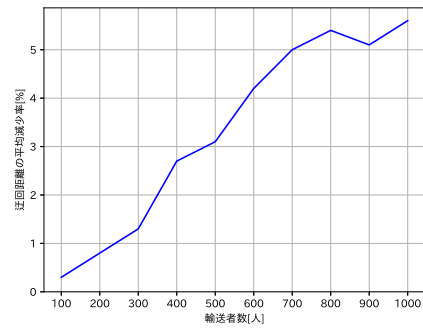
- $V = 8556, E = 10168$ の道路情報グラフ.
- 輸送者の出発地点 $s(u)$ と目的地 $d(u)$ は全節点からランダムに指定. ただし, 平均距離は 0.8km とする.
- 輸送者の時刻制約は 9:00 23:00 の範囲内でランダムにし, 輸送者の迂回可能な平均時間は 2 時間に指定.
- 全輸送者は時速 5.0km で移動.
- 荷物の数は 20 個.
- 荷物の出発地点 $s(b)$ と目的地 $d(b)$ のいずれかは指定した地点 5ヶ所からランダムに指定し, 一方は全節点からランダムに指定. ただし, 平均距離を 2.0km とする.
- 荷物の時刻制約は 9:00 21:00 の範囲内でランダムに指定.
- 荷物の中継点は 3 つに限定 (条件設定 II)

その実験結果を表 2 に示す. 結果を見ると, 輸送者の人数が増えるほど迂回距離の減少率は下がっている. しかし, 700 人以降を見るとそこまで迂回距離の減少率や中継輸送した荷物の数も良くなっておらず, 実行時間の増加が大きくなっている. したがって, 輸送者の人数については増加するほど中継を利用した輸送は効果的に働くが, 荷物の数に対しある一定数以上の人数は計算コストに見合わないものになることがわかる.

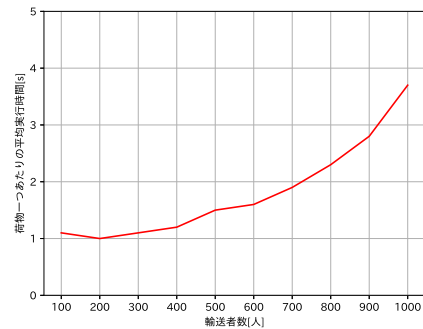
5.3 輸送者の迂回可能な平均時間

検証方法は前節の方法と同様であり, 輸送者の迂回可能な平均時間だけを変化させた各 10 個のサンプルごとに計測行い検証をした. サンプルは次のデータセットより作成した.

- $V = 8556, E = 10168$ の道路情報グラフ.
- 輸送者の出発地点 $s(u)$ と目的地 $d(u)$ は全節点からランダムに指定. ただし, 平均距離は 0.8km とする.
- 輸送者の時刻制約は 9:00 23:00 の範囲内でランダムに指定.
- 全輸送者は時速 5.0km で移動.
- 輸送者の人数は 500 人, 荷物の数は 20 個.
- 荷物の出発地点 $s(b)$ と目的地 $d(b)$ のいずれかは指定した地点 5ヶ所からランダムに指定し, 一方は全節点からランダムに指定. ただし, 平均距離を 2.0km とする.



(a) 輸送距離の平均減少率



(b) 荷物一つあたりの平均実行時間

図 2 荷物の数に対する輸送者の数の実験

- 荷物の時刻制約は 9:00 21:00 の範囲内でランダムに指定.
- 荷物の中継点は 3 つに限定 (条件設定 II)

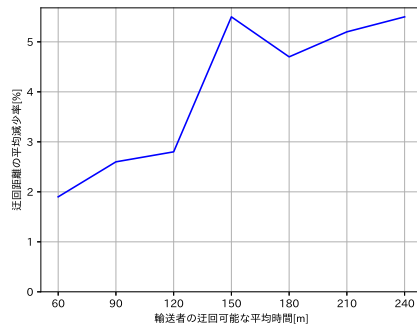
その実験結果を表 3 に示す. 結果を見ると, 輸送者の迂回可能な平均時間が増えるほど迂回距離の減少率は下がっている. しかし, 前節の輸送者の人数における検証と同様に, 180 分以上は実行時間の増加に対し中継を利用した輸送の効率度はそれほど良くはなっていない. したがって, 輸送者の迂回可能な平均時間についても増加するほど中継を利用した輸送は効果的に働くが, 荷物の数に対しある一定数以上の人数は計算コストに見合わないものになることがわかる.

5.4 荷物の平均距離に対する輸送者の平均距離

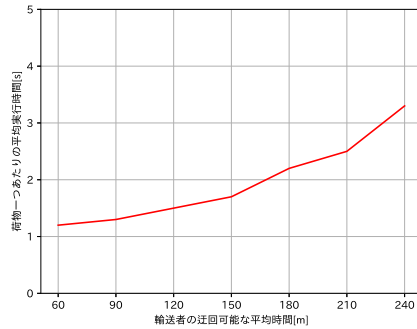
検証方法は荷物の平均距離は 2.0km と 1.0km の二つに固定させ, 輸送者の平均距離のみを変化させた各 10 個のサンプルごとに計測行い検証をした. サンプルは次のデータセットより作成した.

- $V = 8556, E = 10168$ の道路情報グラフ.
- 輸送者の出発地点 $s(u)$ と目的地 $d(u)$ は全節点からランダムに指定.
- 輸送者の時刻制約は 9:00 23:00 の範囲内でランダムにし, 輸送者の迂回可能な平均時間は 2 時間に指定.
- 全輸送者は時速 5.0km で移動.
- 輸送者の人数は 500 人, 荷物の数は 20 個.
- 荷物の出発地点 $s(b)$ と目的地 $d(b)$ のいずれかは指定した地点 5ヶ所からランダムに指定し, 一方は全節点からランダムに指定. ただし, 平均距離を 2.0km とする.
- 荷物の時刻制約は 9:00 21:00 の範囲内でランダムに指定.

6 : <https://www.openstreetmap.org>

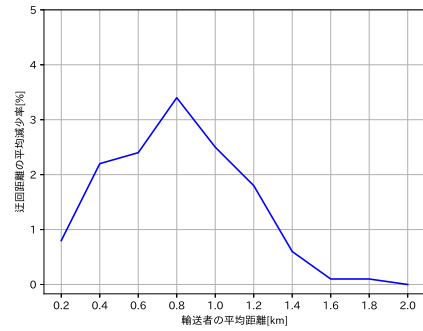


(a) 輸送距離の平均減少率

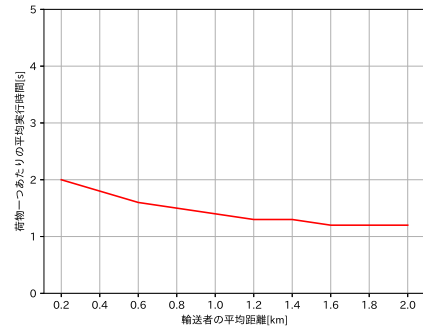


(b) 荷物一つあたりの平均実行時間

図 3 輸送者の迂回可能な平均時間の実験



(a) 輸送距離の平均減少率



(b) 荷物一つあたりの平均実行時間

図 4 荷物の平均距離=2.0km での実験

- 荷物の中継点は 3 つに限定 (条件設定 II)

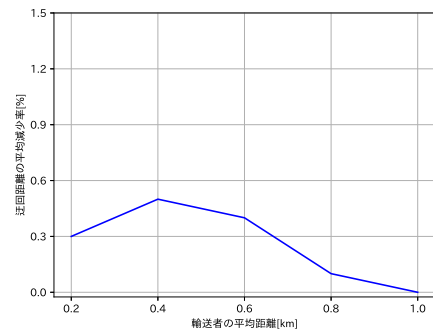
その実験結果を表 4 と表 4 に示す. 表 4 を見ると, 輸送者の平均距離が 0.8km の場合が最も迂回距離の平均減少率が高くなり, それよりも輸送者の迂回距離が小さい場合は効率も悪くなり, さらに実行時間も長くなっている. 一方, 輸送者の迂回距離が大きくなり荷物の平均距離に近づくほど中継を利用した輸送そのものが行われなくなっている. これは, 中継を利用しなくとも荷物の出発地点および目的地に近い人を一人だけで輸送させる方が迂回距離が短くなり, むしろ複数人の輸送者を担当させる方が迂回距離が長くなりやすいためだと考えられる. 表 5 を見ると, 表 4 と同様に荷物の平均距離の半分程度である 0.4km が最も効率的に中継を利用した輸送が行われている. しかし, 表 4 と比べると全体として効率は悪くなっている. これは荷物の平均距離が短くなっているため中継を利用しないで一人で運びやすいため, そもそも中継輸送が起こり難いことが原因だと考えられる. したがって, 輸送者の平均距離は荷物の平均距離の半分程度であると効果的に中継を利用した輸送が行われると考えられる.

6 おわりに

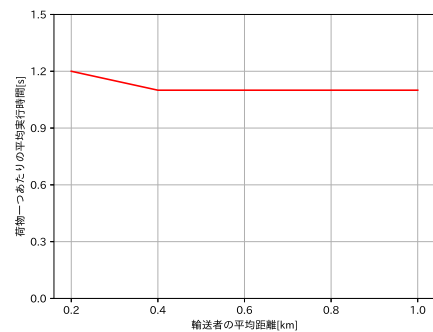
本研究では中継可能な協調型輸送モデルが市街地配送では有用に適応できると考え, 先行研究のバッチ処理である厳密解法を利用し適応可能となるオンデマンド処理である近似解法について提案し, さらにその手法がどのような問題設定であれば有用に機能するかの検証も行った. 検証結果としてはやはり輸送者数や輸送者が輸送に使える時間が長いほど効果的に中継輸送

が機能し, また輸送者の平均距離は適度な距離があると考えられることが判明した.

現実社会においては検証結果ほどの長時間かつ多くの人がこ



(a) 輸送距離の平均減少率



(b) 荷物一つあたりの平均実行時間

図 5 荷物の平均距離=1.0km での実験

の中継輸送に関わることは困難であり、検証結果と同じ程度に中継輸送が効果的に機能するとは限らない。しかし、路線バスが空いたスペースで荷物を輸送するサービス⁷やタクシーが乗車待ちしている時間などで荷物を運ぶサービス⁸などの公共交通機関が配送を一部を負担する新たなサービスも試みられている。提案手法では全ての輸送者が同じ速度で移動する条件で定式化を行っているため、移動速度を各輸送者ごとに設定できるように拡張すれば、バスやタクシー等の公共交通機関を一人の輸送者と捉えてこの輸送モデルを適応できると十分に考えられる。したがって、検証結果で示した程度の効率度に近づけることも可能になると考えられる。また、将来的にはドローンなどの配送に特化したロボットが開発され、無人輸送が可能となる社会へ発展していくと予想される。その場合には、本研究はロボット間が連携して輸送するという点で貢献できると考えている。さらに、提案手法では1つの荷物と複数の輸送者との一対多の中継を考慮した輸送経路を決定するものであるため、複数の荷物と複数の輸送者との多と多の中継を考慮した輸送経路の方がより最適な輸送経路となると考えられ、輸送者が小人数で短い時間でも効果的な中継輸送が行えると予想される。今後の課題としては、このような多対多の割当てでも考慮した手法に取り組んでいきたい。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費基盤研究 (S) No. 17H06099, (A) No. 18H04093, (C) No. 18K11314 の助成を受けたものです。

文 献

- [1] 藤井貴彬, 浅野泰仁, “中継可能な協調型輸送の提案とアルゴリズムの効率化,” DEIM, 2019.
- [2] Y.Jiang, J.Shang, Y.Liu, J.May, “Redesigning promotion strategy for e-commerce competitiveness through pricing and recommendation,” *International Journal of Production Economics*, 167(3), 257-270, September 2015.
- [3] G.Mallapragada, S.R.Chandukala, Q.Liu, “Exploring the effects of “what” (product) and “where” (website) characteristics on online shopping behavior,” *Journal of Marketing*, 80(2), 21-38, March 2016.
- [4] X.Xu, C.L.Munson, S. Zeng, “The impact of e-service offerings on the demand of online customers,” *International Journal of Production Economics*, 184(2), 231-244, February 2017.
- [5] D.Yan, Z.Zhao, W.Ng, “Efficient Algorithms for Finding Optimal Meeting Point on Road Networks,” *Proceedings of the VLDB*, 4(11), 968-979, 2011.
- [6] E.Ahadi, M.A.Nascimento, “k-Optimal Meeting Points Based on Preferred Paths,” *ACM SIGSPATIAL, Poster Pater*, October 31 - November 3, 2016.
- [7] G.B.Dantzig, J.H.Ramser, “The truck dispatching problem,” *Management Science*, 6(1), 80-91, 1959.
- [8] G.Nagy, S.Salhi, “Heuristic algorithms for single and multiple depot vehicle routing problems with pickups and deliveries,” *European journal of operational research*, 162, 126-141, 2005.
- [9] W.Ho, G.T.S.Ho, P.Ji, H.C.W.Lau, “A hybrid genetic al-

- gorithm for the multi-depot vehicle routing problem,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21, 548-557, June, 2008.
- [10] B Yu, Z.Z.Yang, J.X.Xie, “A parallel improved ant colony optimization for multi-depot vehicle routing problem,” *Journal of the Operational Research Society*, 62(1), 183-188 January 2011.
- [11] S.Salhi, A.Imran, N.A.Wassan, “The Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Vehicle Fleet: Formulation and A Variable Neighborhood Search Implementation,” *Computers & Operations Research*, 52, 315-325, December 2014.
- [12] R.Lahyani, L.C.Coelho, J.Renaud, “Alternative formulations and improved bounds for the multi-depot fleet size and mix vehicle routing problem,” *OR Spectrum*, 40(1), 125-157, 2018.
- [13] A.Garcia-Najera, J.A.Bullinaria, “An improved multi-objective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem with time windows,” *Computers & Operations Research* 38(1), 287-300, January 2011.
- [14] T.Vidal, T.G.Crainic, M.Gendreau, C.Prins, “A Hybrid Genetic Algorithm with Adaptive Diversity Management for a Large Class of Vehicle Routing Problems with Time Windows,” *Computers & Operations Research* 40(1), 475-489, January 2013.
- [15] X.Zhang, Y.Asano, M.Yoshikawa, “Mutually beneficial Confluent Routing,” *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 28(10), 2681-2696, 2016.
- [16] K.Takise, Y.Asano, M.Yoshikawa, “Multi-user Routing to Single Destination with Confluence,” *ACM SIGSPATIAL, Poster Pater*, October 31 - November 3, 2016.
- [17] B.Cao, L.Alarabi, M.F.Mokbel, A.Basalamah, “A scalable dynamic ride sharing system,” *Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM)*, 2015.
- [18] F.Drews, D.Luxen, “Multi-hop ride sharing,” *Proceedings of the Sixth International Symposium on Combinatorial Search*, 71-79, 2013.

7 : <https://www.yamato-hd.co.jp/csr/highlights/2017highlights01.html>

8 : <https://www.sbb.it/jp/article/cont1/34393>