

共通の目的地をもつ顧客による タクシー相乗りのためのモデル作成と評価

吉田 岳人^{1,a)} 矢野 正基¹ 堀川 健一郎² 佐藤 啓太² 南 翔太¹ 繁野 麻衣子¹

概要: 近年、ライドシェアリングは広く注目を集めているが、その中でもタクシー相乗りは効果が高いことが期待されている。本研究では、イベントへの参加などで共通の目的地のある乗客のタクシー相乗りの可能性を探る。タクシー相乗り問題では通常移動コストの最小化を扱うが、ここでは、タクシーの総走行距離が長くない中で、乗客の総移動距離を最小化することを目的とする。この問題を混合整数線形計画問題として定式化するとともに、乗車人数に制限がある場合に対する厳密アルゴリズムと制限がない場合に対するヒューリスティックアルゴリズムを提案する。そして、数値実験により、ヒューリスティックアルゴリズムの解が適切であることを検証し、さらに、得られた解の相乗り方法と支払料金から評価して妥当性を示す。

キーワード: タクシー相乗り, 数理モデル, 混合整数線形計画, マッチングアルゴリズム, ヒューリスティックアルゴリズム

Modeling and evaluating taxi ride-sharing for event trips

TAKETO YOSHIDA^{1,a)} MASAKI YANO¹ KENICHIRO HORIKAWA² KEITA SATO² SHOTA MINAMI¹
MAIKO SHIGENO¹

Abstract: While ride-sharing systems have been raised great interest and widely spread in recent years, taxi ride-sharing expects high effective. This research investigates the possibility of taxi ride-sharing for passengers having a common purpose like as an event trip, which takes charge of passengers having the same reason for trips. Although solutions of the taxi ride-sharing problems are usually evaluated by distance traveled by taxis, the objective of our model adopts to minimizing the total trip distance of all passengers, without extending the minimum total distance traveled by taxi so long. This taxi ride-sharing problem is formulated by a mixed integer linear programming (MILP). For this problem, an exact algorithm under the restriction of a riding capacity and a heuristic algorithm solving general case are proposed. Moreover, numerical experiments assess the performance of our heuristic algorithm and evaluate the solution by routes of passengers and payment fare.

Keywords: Taxi ride sharing, mathematical modeling, mixed integer linear programming, matching algorithm, heuristic algorithm

1. はじめに

ライドシェアリングは運賃削減のみでなく、交通渋滞や

¹ 筑波大学
University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, 305-8573, Japan

² (株)デンソー
DENSO CORPORATION, Nihonbashi, Tokyo, 103-6015, Japan

a) s1720607@s.tsukuba.ac.jp

環境問題対策としても広く注目されてきており、近年ではスマートフォンやGPS(全地球測位システム)を活用したサービスが提供されている。ライドシェアリングには様々なタイプがあるが[1], [3], [4], サービス対象の特性に応じたシェアリングシステムの設計と解析が必要である。

タクシーは、通常、乗車率が低いことから、ライドシェアリングの効果が期待できる。地域公共交通の手段として

導入が進んでいるデマンドタクシーも相乗りの一つの方法である。しかし、日本では、基本的には個人の車を利用したライドシェアリングやタクシー相乗りのビジネスが禁止されている。最近、タクシー相乗りの実証実験が行われたり、相乗りをサポートするスマートフォンアプリケーションがリリースされるなどの動きもあるが、タクシー相乗りを数理モデルとして扱った研究は、日本ではまだ少ない。

本研究では、イベントへの参加など共通の目的地のある乗客のタクシー相乗りの可能性を探る。イベントへの参加者が相乗りするので、到着時刻も共通であり時間的制約がなくなる。また、事前登録するためにオンラインで状況が変化することもない。さらに、目的地が一つであることから数理モデルが単純になる。この問題は Massobrio-Fagúndez-Nesmachnow [5] や Ben-Smida et al. [2] が扱った一つの出発地をもつタクシー相乗り問題と基本的に同じである。Tao-Chen [6] も出発地が一つである問題を扱っているが、彼らのモデルはオンラインで時間の制約も考慮している。

タクシー相乗り問題では、相乗りする乗客の組み合わせと送迎順を決定する。これを“相乗り方法”とよぶ。通常、タクシー相乗り問題ではタクシーの総走行距離や費用の最小化を扱うが、本研究では乗客の満足度に影響する“遠回り”を排除するルートを探すために、乗客の総移動距離の最小化を目指す。これにより、遠回りを避け、かつタクシーの走行距離も抑えることが期待される。この問題を混合整数線形計画問題として定式化するとともに、乗車人数に制限がある場合に対する厳密アルゴリズムと制限がない場合に対するヒューリスティックアルゴリズムを提案する。そして、数値実験により、ヒューリスティックアルゴリズムの解が適切であることを検証し、さらに、得られた解を相乗り方法と支払料金から評価して妥当性を示す。

2. タクシー相乗りのモデルと定式化

共通のイベントへの参加者 n 人がタクシー相乗りをすることを考える。育児サークルのようなイベントへの参加を想定しているために、相乗りする相手（同乗者）の性別や相性などを考慮する必要はなく、距離的な制約によってのみ同乗者が決定されるとする。 N を n 人の参加者集合とする。乗客 $i (i \in N)$ がタクシーに乗車する地点 p_i と i を含めた同伴者数 f_i がわかっているとする。そして、イベントが開催される共通の目的地を p_g 、ダミーのスタート地点を p_o と表す。そして、 p_i から p_j までの距離を d_{ij} で表す。便宜上、 $\tilde{N} = N \cup \{o, g\}$ とし、 $f_o = 0$ 、任意の $j \in \tilde{N}$ に対して、 $d_{oj} = 0$ とする。そして、タクシーの乗客定員を F とする。一般的には F は 3 または 4 である。

イベント参加のためのタクシー相乗り問題に対して、まずは、タクシーの総走行距離を最小化する問題を考える。以後、タクシー総走行距離を最小化するタクシー相乗り問

題を TRSP_T と表記する。TRSP_T は、混合整数線形計画 (mixed integer linear programming; MILP) 問題として式 (1)–(8) で定式化できる*1。

$$\text{最小化} \quad \sum_{i,j \in \tilde{N}} d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\text{条件} \quad \sum_{\substack{i \in \tilde{N} \\ i \neq j}} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (2)$$

$$\sum_{\substack{j \in \tilde{N} \\ j \neq i}} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} x_{io} = \sum_{j \in N} x_{gj} = 0 \quad (4)$$

$$u_i - u_j + F x_{ij} \leq F - f_i \quad \forall i, j \in \tilde{N} \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in \tilde{N} \quad (6)$$

$$u_i \geq 0 \quad \forall i \in N \quad (7)$$

$$u_o = 0, \quad (8)$$

ここで、 x_{ij} は、あるタクシーが参加者 i の直後に参加者 j を迎車する場合に 1 となる 0-1 変数であり、 u_i はポテンシャルと呼ばれる非負の変数である。この定式化においては、 u_i は、場所 p_i に到着したときのタクシー内の同乗者を含む乗客の数を意味する。目的関数 (1) は、タクシーの走行距離の合計を最小にする。ただし、タクシーの走行距離には、最初に乗る参加者の迎車距離は含まれていない。制約条件 (2)–(4) は、各参加者がいずれかのタクシーでちょうど 1 回迎車されることを保証する。制約条件 (5) は、巡回セールスマン問題における Miller-Tucker-Zemlin 制約の変形である。この制約条件で部分巡回が禁止され、全てのタクシーはダミースタート地点 p_o から出発し、目的地 p_g で終了することを表す。さらに、この制約条件 (5) は乗客の数が乗客定員 F を越えないことも保証している。

タクシー運賃は走行距離に依存するため、タクシーの総走行距離は相乗り方法の評価に影響する。しかし、総走行距離を最小化するために、ある参加者にとって目的地とは異なる方向へ同乗者の送迎に向かうことは不満につながる。このことは、実際にタクシー相乗りをした乗客の意見として報告されている [7]。例えば、図 1 で示されているような地点配置を考える。各地点間の距離はほぼ直線距離になるように表 1 で与える。それぞれの地点 i において 1 人が乗車、つまり、 $f_i = 1$ とし、乗客定員 $F = 2$ とする。このとき、最小のタクシー総走行距離は 60 となり、2 台のタクシーは、 p_1 - p_2 - p_g 、 p_3 - p_4 - p_g の順に訪問する。この訪問順序だと、参加者 1 は参加者 2 の送迎のために遠回りさせられる。この場合においては、2 台のタクシーが、 p_1 - p_4 - p_g 、 p_2 - p_3 - p_g と訪問したほうがすべての参加者にとって望ましいといえる。つまり、参加者の迂回距離を考慮するべきで

*1 [2] の定式化とは多少異なる。

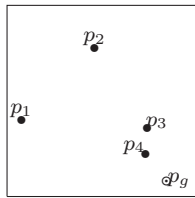


図 1 4 人の参加者の乗車地と目的地の例

Fig. 1 Example of locations for 4 participants and the common destination

表 1 図 1 の距離行列

Table 1 Distance matrix for Fig.1

	p_2	p_3	p_4	p_g
p_1	19	24	25	30
p_2		18	23	28
p_3			5	10
p_4				8

あり、そのために全参加者の総移動距離で評価する。後者の相乗りでは、参加者 1,2,3,4 の移動距離は、それぞれ $d_{14} + d_{4g} = 33$, $d_{23} + d_{3g} = 28$, $d_{3g} = 10$, and $d_{4g} = 8$ となる。よって、全参加者の総移動距離は $33 + 28 + 10 + 8 = 79$ となる。逆に、TRSP_T の最適解である前者の相乗り方法では、全参加者の総移動距離は、 $47 + 28 + 13 + 8 = 96$ となる。目的を全参加者の総移動距離の最小化とするなら、後者の相乗り方法が採用される。ただし、目的関数を全参加者の総移動距離最小化とすると、各参加者が 1 人でタクシーに乗車して相乗りをしないのが最良の方法となってしまう。したがって、タクシーの総走行距離の増加が最小限となるようにタクシー台数を設定した上で、全参加者の総移動距離を最小にすることを目的とする。

ここで、同伴者を除いた全参加者の総移動距離を最小にするタクシーライドシェアリング問題を TRSP_P と表す。議論の簡略化のため、それぞれの乗客は同伴者を持たない、つまり全ての $i \in N$ において $f_i = 1$ とする。TRSP_P は以下のように式 (9)–(19) で定式化される。

$$\text{最小化} \quad \sum_{i,j \in \tilde{N}} d_{ij} y_{ij} \quad (9)$$

$$\text{条件} \quad \sum_{\substack{i \in \tilde{N} \\ i \neq j}} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (10)$$

$$\sum_{\substack{j \in \tilde{N} \\ i \neq j}} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (11)$$

$$\sum_{i \in N} x_{io} = \sum_{j \in N} x_{gj} = 0 \quad (12)$$

$$\sum_{j \in N} x_{oj} = \sum_{i \in N} x_{ig} = k \quad (13)$$

$$v_i - v_j + (F + 2)x_{ij} \leq F + 1 \quad \forall i, j \in \tilde{N} \quad (14)$$

$$y_{ij} \geq v_i + x_{ij} - 1 - F(1 - x_{ij}) \quad \forall i, j \in \tilde{N} \quad (15)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in \tilde{N} \quad (16)$$

$$v_i \geq 1 \quad \forall i \in N \quad (17)$$

$$v_o = 0 \quad (18)$$

$$y_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in \tilde{N} \quad (19)$$

ここで y_{ij} は、地点 p_i から地点 p_j までの経路上でタクシーに乗っている参加者の数を表し、 v_i は地点 p_i を出発した時のタクシーに乗っている乗客の数を表す。もし同伴者を考慮したい場合には、この定式化に制約条件 (5)(7)(8) を追加すれば良い。この定式化によって得られる相乗り方法は、車両 k の数に依存することに留意されたい。この問題では、TRSP_T での最適なタクシー数を k として用いる。

3. アルゴリズム

最初に最大 2 人までの参加者が同乗できるという状況下でのアルゴリズムを考える。例えば、育児サークルのようなイベントでは、それぞれの参加者は子供連れであるため 2 組しか同乗できない。この場合は、同伴する子供の数により同乗できる参加者の組が決定される。最大 2 組までしか同乗できないということは、同乗する組を見つける問題となり、一般グラフのマッチング問題に変換できる。参加者集合 N をノード集合、2 人の参加者が同乗可能かどうかを表す辺によって構成される辺集合 E からなるグラフ $G = (N, E)$ を考える。最大 2 組が同乗できるという状況の下では、TRSP_T の実行可能解 x に対し、 $\{(i, j) \in N \times N \mid x_{ij} = 1\}$ は G のマッチングである。逆に、 G のマッチング M は、TRSP_T の実行可能解 x^M を以下により対応づけられる。

- 頂点 i が M の任意の辺と接続していないならば、 $x_{oi}^M = x_{ig}^M = 1$ 。
- 辺 (i, j) が M に含まれているとき、 $x_{oi}^M = x_{ij}^M = x_{jg}^M = 1$ あるいは $x_{oj}^M = x_{ji}^M = x_{ig}^M = 1$
- 上記で設定されない変数は $x_{ij}^M = 0$ 。

マッチング M における辺 (i, j) は、 i と j が同乗することに対応するが、 i と j の訪問順序で 2 通りの相乗り方法が対応する。 x^M はこの 2 通りのうち走行距離が小さい方を採用するとする。これにより、マッチングと TRSP_T の実行可能解 x^M が対応する。辺 $(i, j) \in E$ の重みを、参加者 i と j が同乗することによって節約される距離、つまり、

$$d_{ig} + d_{jg} - \min\{d_{ij} + d_{jg}, d_{ji} + d_{ig}\}$$

で与えると、マッチング M の重みは、対応する M の実行可能解 x^M において、

$$\sum_{i \in N} d_{ig} - \sum_{i,j \in \tilde{N}} d_{ij} x_{ij}^M$$

と等しくなる。それゆえに、 G の最大重みマッチングは TRSP_T の最適解に対応する。

TRSP_P に対しては、グラフ $\hat{G} = (N \cup \hat{N}, E \cup \hat{E})$ を

考える。ここで、 \hat{N} は $2k - n$ 個のダミーノードを表し、 $\hat{E} = \{(i, j) \mid i \in N, j \in \hat{N}\}$ である。 \hat{G} の完全マッチングは、タクシー k 台を用いた相乗り方法に対応する。つまり、辺 $(i, j) \in \hat{E}$ が完全マッチングに含まれるならば、参加者 i が単独乗車し、辺 $(i, j) \in E$ が完全マッチングに含まれるならば、参加者 i と j が相乗りする。辺 $(i, j) \in E$ の重みを参加者 i と j の最小総移動距離、つまり、

$$\min\{d_{ij} + 2d_{jg}, d_{ji} + 2d_{ig}\},$$

で与え、辺 $(i, j) \in \hat{E}$ の重みは、乗客 i が 1 人でタクシーに乗る際の移動距離 d_{ig} で与える。すると、完全マッチングの重みは、対応する相乗り方法における参加者の総移動距離と等しくなる。したがって、最小重み完全マッチングは、TRSP_P の最適解に対応する。以上より、2 組までしか同乗できないという状況下では、TRSP_T、TRSP_P 共にマッチングアルゴリズムを用いることにより、多項式時間で解くことができる。

次に、3 組以上の同乗を許したタクシー相乗り問題を考える。一般的なタクシー相乗り問題は NP 困難であることが知られており [2]、ヒューリスティックアルゴリズムを設計する。TRSP_T は適切なタクシー台数 k を見つけるために用いているので、今回は、適切な k を求めながら TRSP_P を解く。つまり、適切な k と参加者の総移動距離が小さくなるような参加者の分割を求める。参加者の分割は目的地を中心とした地点情報を用いて、配送計画問題に対するスイープ法のおこなう。 S を目的地を中心としたときの各地点の緯度経度情報によるコサイン類似行列とする。すなわち、 S の (i, j) 成分は、地点 p_i と地点 p_j の類似度を表し、

$$\frac{\Delta \text{lat}_i \Delta \text{lat}_j + \Delta \text{long}_i \Delta \text{long}_j}{\sqrt{(\Delta \text{lat}_i)^2 + (\Delta \text{long}_i)^2} \sqrt{(\Delta \text{lat}_j)^2 + (\Delta \text{long}_j)^2}}$$

で与えられる。ただし、 Δlat_i と Δlong_i は地点 p_i と p_g の緯度経度各々の差分を表す。そして、 S に対して適当なクラスタリング法を用いて N を $X_1, X_2, \dots, X_{k'}$ に分割する ($\bigcup_{l=1}^{k'} X_l = N$, かつ、任意の $1 \leq i < i' \leq k'$ に対して、 $X_i \cap X_{i'} = \emptyset$ を満たす)。ただし、クラスタリング法では通常乗客定員を考慮しない。そこで、乗客定員を満たすように繰り返しクラスタリング法を適用する。このアルゴリズムを Algorithm 1 に示す*2。アルゴリズムでは、2 つの閾値パラメータ θ と α を用いる。

Algorithm 1 で得られた分割 $\mathcal{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_{k'}\}$ に対して、各 X_l ($l = 1, \dots, k'$) 内の参加者を訪問する最適な訪問順序を算出する。 F が大きいときは、 X_l 内の参加者のすべての訪問順序を列挙して最も良いものを取り出す。 F が小さいときには巡回セールスマン問題に対する

*2 簡単のために、すべての参加者 i は同伴者がなく $f_i = 1$ と仮定していたことに注意

Algorithm 1 iterative clustering

```
[initialization]  $h := 2, \mathcal{X} := \emptyset$  and  $Nr := N$ 
repeat
  obtain a partition  $X_1, X_2, \dots, X_h$  of  $Nr$  by a clustering algorithm for  $S$ 
  if  $|X_l| > F$  for all  $l = 1, \dots, h$  then
     $h \leftarrow h + 1$ 
  else
    for all  $X_l$  ( $l = 1, \dots, h$ ) such that  $|X_l| \leq F$  do
      if  $|X_l| \leq \alpha$  or  $s_{ij} \geq \theta$  for any  $i, j \in X_l$  then
        add  $X_l$  to  $\mathcal{X}$  and update  $Nr \leftarrow Nr \setminus X_l$ 
      end if
    end for
     $h \leftarrow 2$ 
  end if
until  $|Nr| \leq h$ 
output  $\mathcal{X}$ 
```

Algorithm 2

```
find partition  $\mathcal{X}$  of  $N$  by the iterative clustering algorithm
construct a tour of a taxi assigned to each  $X \in \mathcal{X}$ 
repeat
  find a maximum weight matching in  $G_{\mathcal{X}}$  and combine pairs of clusters corresponding to the matching
  update a tour of a taxi assigned to each combined cluster
until there are no appropriate combination of clusters
```

適切な方法を用いる。参加者 N の分割数 k' はタクシー台数を考慮しておらず通常大きな値となる。そのために、 X_l 内の参加者の総移動距離は大きくなる傾向にある。そこで、分割を統合することで解の改善を図る。ここでもマッチングアルゴリズムを用いる。ノード集合を分割 \mathcal{X} 、辺集合を $E_{\mathcal{X}} = \{(X_l, X_{l'}) \in \mathcal{X} \times \mathcal{X} \mid |X_l| + |X_{l'}| \leq F, s_{ij} \geq \eta, i \in X_l, j \in X_{l'}\}$ とするグラフ $G_{\mathcal{X}} = (\mathcal{X}, E_{\mathcal{X}})$ をつくる。ただし、 η は θ よりも小さい閾値パラメータである。辺 $(X_l, X_{l'}) \in E_{\mathcal{X}}$ の重みを分割 X_l と $X_{l'}$ を統合することで短縮される距離とする。すなわち、 $\text{dist}(X)$ を 1 台のタクシーで X 内の参加者をすべて送迎するときの参加者の総移動距離、 M を大きな定数値としたときに

$$M - \text{dist}(X_l \cup X_{l'}),$$

で辺 $(X_l, X_{l'})$ の重みを与える。そして、 $G_{\mathcal{X}}$ の最大重みマッチングを求め、マッチングに辺 $(X_l, X_{l'})$ が含まれていたら、 X_l と $X_{l'}$ を統合する。必要であれば、最大重みマッチングを求めて分割を統合することを繰り返す*3。以上の手続きをまとめたものが Algorithm 2 である。

4. 数値実験

前節で示した Algorithm 2 の挙動と TRSP_P の解の妥当性を検討するために数値実験をおこなう。

*3 次節の数値実験のように F が小さいときには繰り返しはおこなわない

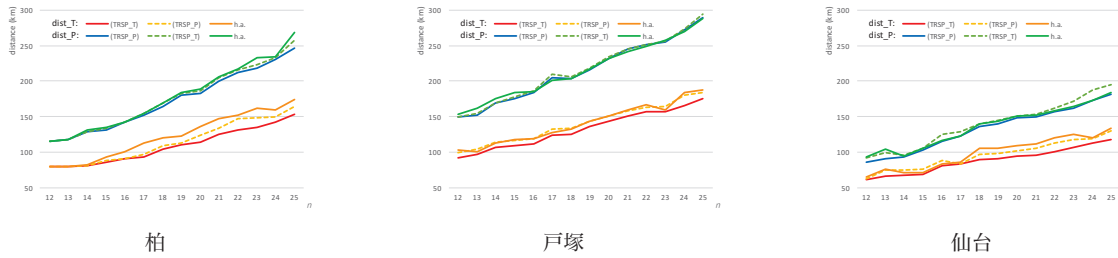


図 2 $F = 2$ のときの dist_T と dist_P の比較
Fig. 2 Comparing dist_T and dist_P for $F = 2$

4.1 設定

実験対象を柏，戸塚，仙台とし，それぞれの都市の中心の駅を共通の目的地とする．駅を中心に半径 10km に設定して Google map を用いて教育関連施設 25 個を抽出して，そこからランダムに n 個を取り出して，参加者の地点 p_i とする．地点間の距離は Google map API で取得する．

Algorithm 1 のクラスタリング法は k -medoids を使用し， k -medoids 法は初期解に依存するため，Algorithm 2 を 15 回実行してタクシー台数 k が最小のなかで参加者の総移動距離が最小の解を出力する．閾値パラメータは $\theta = 0.9, \alpha = F, \eta = 0.75$ としている．

TRSP_T および TRSP_P の MILP は，FICO Xpress Optimizer 27.01.02 で Intel Core i7, 3.20GHz CPU, 12.0 GB メモリ搭載の hp pavilion HPE h8-1090jp 上で解く．計算時間の改善のために，妥当不等式を加える．TRSP_T には，

$$u_i - u_j + Fx_{ij} + (F - f_i - f_j)x_{ji} \leq F - f_i, \quad \forall i, j \in N$$

$$1 + (1 - x_{oi}) \leq u_i, \quad \forall i \in N$$

$$u_i \leq F - f_i - (1 - x_{ig}) - (F - 2)x_{oi}, \quad \forall i \in N$$

TRSP_P には

$$v_i - v_j + (F + 2)x_{ij} + Fx_{ji} \leq F + 1, \quad \forall i, j \in N$$

$$1 + (1 - x_{oi}) \leq v_i, \quad \forall i \in N$$

$$v_i \leq F - (1 - x_{ig}) - (F - 2)x_{oi}, \quad \forall i \in N$$

$$x_{ij} \leq y_{ij} \leq Fx_{ij}, \quad \forall i, j \in \tilde{N}$$

$$y_{ij} \leq v_i, \quad \forall i \in N, \forall j \in \tilde{N}$$

$$v_i = \sum_{j \in \tilde{N}} y_{ij}, \quad \forall i \in N$$

を加える．

4.2 アルゴリズム評価

まず，乗客定員 F が 2 のときに，Algorithm 2 の解と TRSP_T, TRSP_P をマッチングアルゴリズムで解いた解の比較をする．各地区で $n = 12$ 地点を取り出し，そこに 1 地点ずつ $n = 25$ まで地点を追加してデータを作成する．タクシーの総走行距離 (dist_T)，参加者の総移動距離

(dist_P) を比較したグラフを 図 2 に示す．寒色系のラインが “dist_T”，暖色系のラインが “dist_P” を表し，“h.a.” は Algorithm 2 を適用した結果を表す．破線は参考のために，TRSP_P の解での dist_T, TRSP_T の解での dist_P を表す．グラフから dist_P は h.a. と最適解 (TRSP_P の解) にあまり差がないことがわかる．実際，相対誤差は 15% 以内にすべて収まり，平均は 2% であった．h.a. が最適解よりもよくなっているのは，h.a. でのタクシー台数が多いためである．戸塚，仙台では特に，TRSP_T で決められた台数よりも平均 0.8 台多くなっていた．一方，dist_T に関しては，h.a. と最適解との相対誤差は平均 10% であったが，h.a. と TRSP_P の解で dist_T を比較すると相対誤差は平均 3% であり，TRSP_P に対するよい近似解を与えているといえる．

乗客定員 F が 3 のとき，TRSP_T, TRSP_P をソルバーで解くときの制限時間を 3600 秒とする． $n = 15$ 以上になると制限時間以内に最適解が得られないことがあり，その場合には暫定解を用いて評価する． $n = 12$ 地点をランダムに取り出し，そこに $n = 16$ まで地点を追加した問題を地区ごとに 3 種類作成して比較した結果を 図 3, 図 4, 図 5 に示す． $F = 2$ のときと傾向に大きな差はなく，dist_P に関する相対誤差は，柏，戸塚，仙台で各々 -1.4% ， -2.1% ， 1.9% であった．h.a. のタクシー台数が TRSP_T での台数よりも多いと，dist_P が短くなるが，戸塚の問題例で h.a. のタクシー台数が TRSP_T での台数より少なくなることもあった (図 4 右の $n = 14$ のケース)．h.a. と TRSP_P の解で dist_T を比較すると相対誤差は平均 -0.5% であり， $F = 3$ においても TRSP_P に対するよい近似解を与えているといえる．また，これら相対誤差は n よりも地域に依存しているといえる．

4.3 相乗り方法の評価

相乗り方法の妥当性をみるために，一例として $F = 3$ ， $n = 14$ での戸塚の問題に対して得られた相乗り方法を 図 6 に示す*4．TRSP_T では遠回りを強いられた参加者がいるが，TRSP_P では遠回りが少なくなっている．さらに，Algorithm 2 の解はより目的地に向かう経路上の参加者と

*4 図のルートは実際の道にそってはならず，訪問順序を表す

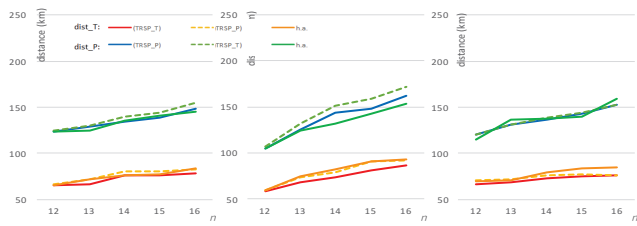


図 3 $F = 3$ のときの柏の dist_T と dist_P の比較

Fig. 3 Comparing dist_T and dist_P for $F = 3$ Kashiwa

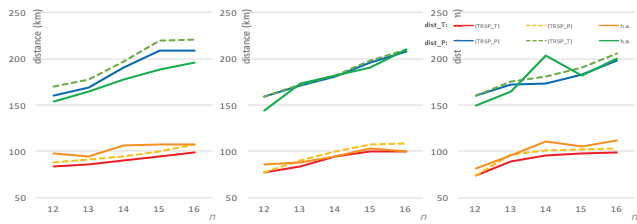


図 4 $F = 3$ のときの戸塚の dist_T と dist_P の比較

Fig. 4 Comparing dist_T and dist_P for $F = 3$ Totsuka

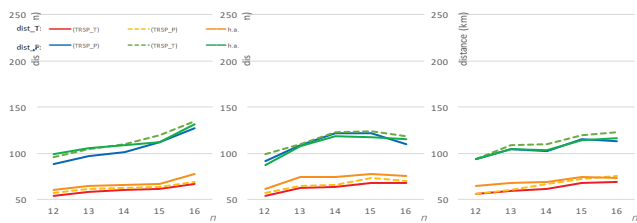


図 5 $F = 3$ のときの仙台の dist_T と dist_P の比較

Fig. 5 Comparing dist_T and dist_P for $F = 3$ Sendai

の同乗が実現しているように見える。

さらに、タクシー料金を算出し、[7]で述べられている方法で相乗りしたときの料金を求める。単独乗車ときの料金比率で配分する比例配分法と DEA ゲームでの配分を適用した結果、配分方法により料金にわずかな差があるもののその増減に関してはほぼ同じ結果となった。 $F = 3$ のときに $n = 12$ から $n = 25$ まで増やしながら、Algorithm 2 で求めた相乗り方法に対して、比例配分法での料金算出を 3 つの問題に対して行った結果を戸塚に関して、図 7 に示す。このヒートマップは、それぞれのグラフにおいて $n = 12$ の時の料金を 1 とした時に、 n の増加によって料金がどれだけ増減するかを表したものである。また、各参加者の料金の増減はほとんどが 0.5 倍から 1.5 倍に含まれていたため、ヒートマップが表す幅は 0.5 から 1.5 に設定している。各行が参加者に対応しており、目的地からの距離が遠い順に並べてある。各列が n に対応しており、12 から 25 までである。右の例のように参加者数により個人の支払料金が異なることもあるが、多くの例では、左や中央のように大きな違いはなく、また、目的地からの距離に応じて偏りがあることもなかった。このことより、料金に関しても、大きな不満が生じることはないと考えられる。

5. 結論

本研究では、イベント参加などの目的地が同じ乗客のタクシー相乗り問題を考えた。乗客の総移動距離を最小化するヒューリスティックアルゴリズムを提案し、相乗り方法や支払料金が妥当であることを示した。

参考文献

- [1] Agatz, N., Erera, A., Savelsbergh, M. and Wang, X.: Optimization for dynamic ride-sharing: A review, *European Journal of Operational Research*, Vol. 223, No. 2, pp. 295–303 (2012).
- [2] Ben-Smida, H. E., Krichen, S., Chicano, F. and Alba, E.: Mixed Integer Linear Programming Formulation for the Taxi Sharing Problem, *Smart Cities: First International Conference, Smart-CT 2016, Málaga, Spain, June 15-17, 2016, Proceedings* (Alba, E., Chicano, F. and Luque, G., eds.), Springer International Publishing, Cham, pp. 106–117 (2016).
- [3] Chan, N. D. and Shaheen, S. A.: Ridesharing in North America: Past, Present, and Future, *Transport Reviews*, Vol. 32, No. 1, pp. 93–112 (2012).
- [4] Furuhata, M., Dessouky, M., Ordóñez, F., Brunet, M.-E., Wang, X. and Koenig, S.: Ridesharing: The state-of-the-art and future directions, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 57, No. Supplement C, pp. 28–46 (2013).
- [5] Massobrio, R., Fagúndez, G. and Nasmachnow, S.: A parallel micro evolutionary algorithm for taxi sharing optimization, VIII ALIO/EURO Workshop on Applied Combinatorial Optimization (2014).
- [6] Tao, C. C. and Chen, C. Y.: Heuristic Algorithms for the Dynamic Taxipooling Problem Based on Intelligent Transportation System Technologies, *Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD 2007)*, Vol. 3, pp. 590–595 (2007).
- [7] 南, 堀川, 佐藤, 渡辺, 吉田, 矢野, 繁野: イベント参加者のためのライドシェアサービスの支払い料金配分設計, 第 6 回サービス学会全国大会予稿集 (2018). 掲載予定.



図 6 戸塚の相乗り方法

Fig. 6 tours sketched for Totsuka

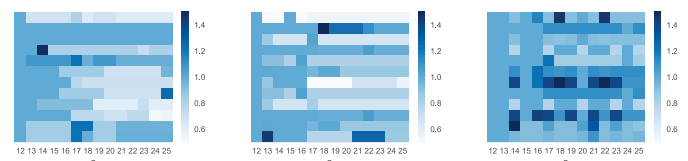


図 7 戸塚における参加者の支払い料金

Fig. 7 The changes of the fares of the first 12 participants in Totsuka