

需要応答型交通の車両定員と運行方法に関する 一考察

Joshua Teguh SANTOSO¹・井料 隆雅²

¹学生会員 東北大学 大学院情報科学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

E-mail: joshua.teguh.santoso.r5@dc.tohoku.ac.jp

²正会員 東北大学教授 大学院情報科学研究科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

E-mail: iryo@tohoku.ac.jp

近年、道路における新しい交通手段としてライドシェアリングのような車両の保有と利用を分離したものが多く研究されまた実装されている。一方、そのようなサービスは個々の利用者を個別の車両で運ぶという点においては自家用車による移動と差がなく、限られた道路インフラを有効に利用するものとは必ずしも言えない。需要応答型交通のように乗り合いを許容すればこの問題は改善しうが、異なる起終点の旅客を同時に輸送するには、一部または全部の旅客に迂回を強いる必要が往々にしてあり、その度合いが過ぎると、個々の旅客を別々に輸送した方がむしろ輸送効率が良くなることもありうる。本研究では、起終点が所与の旅客需要を指定された台数の(定員の制限がない)車両で最も短い所要時間で輸送する問題を考える。この問題の最適解が与えられたときに、最大どれだけの人数が一台の車両に乗車しうかを見ることにより、乗り合いを行うことによる効果を見積もった。その結果、一台あたりに乗車しうる旅客の最大人数は、基本的には旅客数と平均移動距離に依存して決まるが、空間的な輸送効率が悪いときには旅客数が増えても最大人数が増えない、すなわち車両の定員を増やしてもそれが活用されないことがあることがわかった。

Key Words: demand responsive transport, on-demand bus service

1. はじめに

近年、道路における新しい交通手段としてライドシェアリングのような車両の保有と利用を分離したものが多く研究^{1),2),3)}されまた実装^{4),5),6)}されている。保有と利用が分離されているので、公共交通機関と相補的關係になるように活用できれば、公共交通機関の利便性向上に有用であることが期待できる。しかし、Oh et al. (2020)⁷⁾は、シンガポールを対象としたシミュレーションにより、ライドシェアリングのような Mobility-on-Demand (MOD) が公共交通の需要を食い潰してしまうことを示した。また、このようなサービスを導入することによって、交通ネットワーク上の渋滞も増加することを示している。そもそも、これらのサービスの多くは個々の利用者を個別の車両で運ぶという点においては自家用車による移動と差がなく、都市における限られた道路インフラを有効に利用するものとは必ずしも言えない。

輸送効率を確保して利便性を向上するための一つの方策としては、複数の旅客を、それぞれに固有の起点から終点までの全部または一部の区間を同時に輸送することを許容することがある。複数の旅客を運ぶものとして一般的な通常の公共交通と異なるのは、固定された経路でなく旅客側が示す起終点間の輸送を行うと

いう点である。このような交通サービスは需要応答型交通(いわゆる Demand-Responsive Transport, DRT)と呼ばれる。複数の旅客を適切にマッチングできれば、より少ない走行量で多くの旅客の需要を捌けることが期待できる。Alonso-Mora et al. (2017)¹⁾は、大量のリクエストを対応できる効率的に計算できる動的に最適な車両の走行経路の解法を開発している。この解法は、最初に貪欲法による割り当てを行い、制約付き最適化によってそれを改善し、時間の経過とともに最適な割り当てに収束する解を迅速に計算する。Simonetto et al. (2019)⁸⁾は、線形割当問題として割当問題を定義し、Alonso-Mora et al.(2017)の解法に比べて計算効率がより良い解法を構築している。

異なる起終点の旅客を同時に輸送するには、一部または全部の旅客に迂回を強いる必要が往々にしてある。迂回の程度が過ぎると、単に利便性が損なわれるだけではなく、それらの旅客に乗り合いをさせずに、別々に輸送した方がむしろ輸送効率が良くなることもありうる。このことは、車両の定員を大きくしても、それによる輸送効率の向上には限界があることを示唆する。また、その限界は起終点のパターンにも依存するだろう。例えば一定時間帯内の全ての旅客の起終点が同じであれば、それらを可能な限り大きい定員の車両で運ぶことが最も走行量が少なくなることは言うまでもな

い。一方で、それぞれの旅客の起終点が互いに離れているときは、それらをまとめることによる迂回が著しくなり、乗り合いによる輸送効率の向上は望めないだろう。van Engelen et al. (2018)⁹⁾ は、自身の提案アルゴリズムのケーススタディにおいて車両定員数を変更することによる利用者の利便性（待ち時間や所要時間などからの観点）の影響を分析している。それにより、小数の大型車両（定員数が多いの場合）より、大数の小型車両（定員数が少ないの場合）のほうが、短い待ち時間でより短い迂回およびより少ないリクエスト否定が実現できることを示している。また、理想的な車両定員数は旅行距離及び需要集中レベルによって決まることも論じている。

本研究では、ネットワーク上に起終点ペアとして旅客の交通需要が与えられたときに、それらを与えられた台数の（定員の制限がない）車両で、最も短い所要時間で輸送する問題を考える。交通需要が所与なので、所要時間が短いことは、単位時間あたりの旅客処理数が大きいことに対応する。これはシステムのスループットが大きいことを意味する。スループットを最大化した時に、最大どれだけの人数が一台の車両に乗り合わせるかを見ることにより、乗り合いを行うことによる効果を見積もる。

本稿は 4 章からなる。第 1 章で研究の背景と目的を述べた。第 2 章で上述の最適化問題を定式化する。第 3 章でその最適解の持つ性質を解析する。第 4 章で考察と今後の課題を述べる。

2. 最適旅客割当問題の定式化

定式化に先立ち以下の諸量を定義する：

- i, I, m : 旅客とその集合, 旅客数, $i \in I, m = |I|$
- j, J, n : 車両とその集合, 車両数, $j \in J, n = |J|$
- I_j : 車両 j に乗車する旅客の集合,
 $I_j \cap I_k = \emptyset \forall j \neq k$.
- o_i, d_i : 旅客 i の起点および終点ノード
- $t(a, b)$: ノード a から b までの最短経路旅行時間,
 $a, b \in N, N = \{o_i | i \in I\} \cup \{d_i | i \in I\}$
- R_j : 各車両の経路, $R_j = \{a_1, a_2, \dots\}, a_k \in N$.
- R : 全車両の経路, $R = \{R_j | j \in J\}$
- R^{ALL} : 全旅客を 1 回だけ輸送する, という条件を満たす R の集合
- $c_j(R_j)$: 車両 j の最大乗車人数
- $c(R)$: 全車両の最大乗車人数, $c = \max_{j \in J} c_j(R_j)$
- $T(R_j)$: 経路 j の総走行時間
- $Z(R)$: 最大総走行時間, $Z(R) = \max_{j \in J} T(R_j)$

本稿では混雑は考慮しないので, $t(a, b)$ は a, b のみに依存する定数であるとする。また, 旅客の乗降にかかる時

間は 0 とする。 $c_j(R)$ の最大値は $|I_j|$ であるが, $c_j(R) = |I_j|$ とは必ずしもならないことに注意したい。これは, もしある旅客が降車したあとに別の旅客が乗車すれば, その 2 人が同時に乗車することはないからである。

全ての旅客を輸送するのに必要な時間は $Z(R)$ に等しいので, それを最小化する問題（最適旅客割当問題）は

$$R^* = \arg \min Z(R) \text{ subject to : } R \in R^{\text{ALL}} \quad (1)$$

と書ける。 R^* は最適な旅客の割り当て結果を示す。本研究では異なる車両間の異質性は考慮せず, 旅客は OD のみで区別される。よって最適旅客割当問題の入力は, $\{(o_i, d_i) | i \in I\}$ と $\{t(a, b) | a, b \in N\}$ である。

本稿では具体的な OD およびネットワーク構造に対する式 (1) の解の導出する方法そのものについては議論せず, 最適解における最大乗車人数である $c(R^*)$ の性質を調べることを行う。特に以下の集計量に対してどのように $c(R^*)$ が変化するかを概算することを行う：

- A : ネットワークが存在する領域の面積（長さは移動時間の単位で計算する）
- \bar{t} : OD 間の最短移動時間 $t(o_i, d_i)$ の平均値。
 $\bar{t} = n^{-1} \sum_{i \in I} t(o_i, d_i)$.
- m (旅客数) および n (車両数)

3. 最適旅客割当問題の解の性質の分析

最適旅客割当問題の解の性質を, 特に $c(R^*)$ に着目することにより分析する。分析手法としては, 近似に基づく解析的手法と, 数値計算に基づく手法の 2 つを用いる。なお本稿では数値計算に基づく手法については省略している。これについては発表の際に紹介する。

解析的手法の考え方の理解を助ける例として, 車両が 1 台しかない ($n = 1$) とした上で, 以下に 2 つの簡単かつ極端な状況を示す：

1. すべての旅客の起点と終点と同じ
2. R_j^* 内のノードの配列が「起点 1, 終点 1, ..., 起点 m , 終点 m 」のように, ある車両の起点の直後に必ず同一車両の終点が出現している。

1 つめの例であれば, すべての旅客を唯一の車両で一度に輸送するのが明らかに最適である。このときは, $c(R^*) = m$, すなわち最大乗車人数は旅客の総人数に等しいと計算できる。2 つめの例では, 車両に乗り合っている旅客が降車して初めて次の旅客が乗車するので, 明らかに $c(R^*) = 1$, すなわち最大乗車人数は常に 1 である。この例のように, 最大乗車人数は旅客の OD パターンおよびそれを最適に輸送する経路に依存して 1 から旅客の人数の範囲で大きく変化しうる。

上記の 2 つの例を参考にして, 最大乗車人数と最適輸送経路のあいだのより一般的な関係の概略を近似的

に求めてみよう。いま、車両 j の最適輸送経路の旅行時間は $T(R_j^*)$ であるが、この中に旅客 $i \in I_j$ の OD が均等に分布しており、かつ、どの旅客も自身の OD を最短距離で移動できているとすると、

$$c(R_j^*) \simeq \frac{\bar{t}|I_j|}{T(R_j^*)} \quad (2)$$

と概算することができる。実際には「均等に分布」「最短経路」は理想的すぎる前提であり、これらの前提が崩れると $c(R_j^*)$ はより大きい値になることが予想される。いま、簡単のために、車両 j が $|I_j|$ 人の旅客を輸送する際の各旅客の乗車時間は $\bar{t}|I_j|^\alpha$ のように、旅客数のべき乗に比例すると考えよう。ここで α は 0 以上の定数とするが、旅客数が 10 倍になったときに 1 人あたりの乗車時間が 10 倍になるとは考えづらく、そこまでは大きくならないと思われるので、以降では $0 \leq \alpha < 1$ と仮定する。この仮定に加えて「均等に分布しない」効果は車両台数に依存しない定数倍で表現できると考え、式 (2) に代えて

$$c(R_j^*) \simeq \frac{C\bar{t}|I_j|^{\alpha+1}}{T(R_j^*)} \quad (3)$$

を用いることにしよう。なお C は 1 から大きく外れない正の定数である。さらに「各車両へ配分される旅客数がほぼ等しい」という仮定をおき、 $T(R_j^*)$ についても車両ごとの差異を考慮しなければ

$$c(R_j^*) \simeq \frac{C\bar{t}r^{\alpha+1}}{\bar{T}} \quad (4)$$

とできる。ただし

$$r = \frac{m}{n} \quad (5)$$

$$\bar{T} = \frac{\sum_{j \in J} T(R_j^*)}{n} \quad (6)$$

とした。 r は 1 台あたりの平均輸送旅客人数に相当する。

式 (4) の \bar{T} は個々の車両がどの程度走行するかを示す。もし、配車の効率を考慮せずに全くランダムに旅客を選んで順次輸送すれば、全車両の走行時間の合計 $n\bar{T}$ は、対象領域を正方形と考え、その領域内のランダムな 2 点間の平均移動時間が \sqrt{A} に比例するとすれば、概ね $m\sqrt{A}$ に比例することになる。一方で領域内の旅客を一筆書きで拾うように走行すれば、その点のあいだの移動時間は旅客の密度 $\rho = m/A$ の平方根の逆数に比例すると考えられるので、概ね $m/\sqrt{\rho}$ に比例することになる。この 2 つの状況を補間するために、 β (ただし $0 \leq \beta \leq 1$) を用いたべき乗の式を用い、以降では

$$\bar{T} \simeq \frac{D}{n} \sqrt{\frac{m^{3-\beta}}{\rho}} \quad (7)$$

とする。ただし D は 1 から大きく外れない正の定数である。ここで、 $\beta = 0$ はランダムに旅客を運んだ状況に、 $\beta = 1$ は一筆書きで旅客を運んだ状況に対応することに注意したい。

式 (4) と (7) をあわせて

$$c(R_j^*) \simeq \frac{qnr^{\alpha+1}\bar{t}\sqrt{\rho}}{\sqrt{m^{3-\beta}}} = c_0 \frac{qr^\alpha}{\sqrt{m^{1-\beta}}} \quad (8)$$

を得る。ただし $q = C/D$ 、 $c_0 = \bar{t}\sqrt{\rho}$ である。以降では、この c_0 を「標準最大乗車人数」と呼ぶことにする。なお、 C, D とも 1 から大きく外れないとしているので、 q も 1 からは大きく外れない値であると考えられる。以降ではこのことを前提に議論を進める。

c_0 は「旅客の平均最短移動時間を旅客の起点間の平均移動時間で割ったもの」を意味する。この値は、すべての旅客を、旅客の起点間の平均移動時間だけ間隔をあけて直線上に均等に配置し、その直線上を車両が走行して旅客を乗り降りさせた時の最大乗車人数に対応する。 c_0 は旅客数の平方根に比例する値であることに注意したい。もし最大乗車人数が c_0 になるのであれば、旅客数が増えれば、それに応じて最大乗車人数も緩やかに増える、という直感的にわかりやすい結論を得ることになる。

式 (8) の持つ意味の解釈を試みる。式 (8) を、車両の走行経路が一筆書きになるかランダムに旅客を拾うような経路になるかに着目する (ただし、旅客の迂回はないものとし、 $\alpha = 0$ とおく) と、

1. 一筆書きで計算したものに相当すれば、 $\beta = 1$ より、 $c(R_j^*) = qc_0$ となる。すなわち最大乗車人数は標準最大乗車人数に比例する。
2. ランダムに旅客を拾うものに相当すれば、 $\beta = 0$ より、 $c(R_j^*) = qc_0/\sqrt{m} = q\bar{t}/\sqrt{A}$ となる。すなわち最大乗車人数が利用者数に依存しなくなる。

のように評価できる。このことは、 β が 1 から小さくなれば、旅客数が増えても最大乗車人数はそれほど増えなくなる ($\beta = 0$ だと全く増えない) ことを示唆する。一方、 $\alpha > 0$ の場合は、 $r > 1$ であることより最大乗車人数は増加する。すなわち旅客が迂回を強いられると最大乗車人数は増える。

4. まとめと今後の課題

本研究では、乗り合いを許容する需要応答型交通を対象に、スループット最大化を目的関数とする最適旅客割当問題を定式化し、その最適解における各車両への最大乗車人数を近似的に見積もることを行った。その結果、理想的な状況では、最大乗車人数は、旅客を直線上に配置しなおした上で、その直線上を車両が走行して旅客を乗り降りさせた時の最大乗車人数である「標準最大乗車人数」 c_0 で表せることがわかった。一方、車両の経路に無駄がある (= 完全な一筆書きにならずに対象空間内をランダムに行き来するような性質をもつ) 場合には、標準最大乗車人数は達成されず、特に、

完全にランダムに行き来するような経路のときは、旅客が増えても最大乗車人数は全く増えないことがわかった。また、旅客が迂回を強いられるときは最大乗車人数は増えることがわかった。

本研究の結果からは以下のことを推察できよう：

1. 旅客を近い地点から遠い地点に順番に輸送できるような状況であれば、最大乗車人数は旅客の空間密度に応じて増えるので、それにあわせて車両の定員を増やせば、より少ない車両台数で効率的に旅客を輸送できる。
2. 旅客の輸送経路が効率化できない（対象領域を行ったり来たりしなくてはならなくなる）ときは、最大乗車人数の増大は 1. のケースに対して限定されるので、車両の定員を増加させることの効果が薄くなる。

以上のことより、乗り合いのできる需要応答型交通を活用して道路インフラを有効に活用するには、「一筆書き」のような経路で効率的に旅客を輸送できる状況であることが望ましいことがわかる。このような状況が成立するか否かは旅客の交通需要の空間パターンに依存するが、例えば、旅客の OD 間の距離が短い（すなわち \bar{f} が短い）ときであれば、一筆書きで旅客を拾っていくことは相対的に容易であると考えられよう。ただし、 \bar{f} が短いと標準最大乗車人数 c_0 が 1 よりも小さくなってしまい、そもそも乗り合い自体が発生しないほど需要が少ない状況になることも予想される。このことは、乗り合いのできる需要応答型交通には、そのパフォーマンスを最大限活かせる OD の距離帯が存在する可能性を示唆する。これが正しければ、無秩序に旅客の需要に応じて輸送を請け負うのではなく、移動距離帯に一定の規制を書けることにより、道路インフラの利用効率の向上が実現できるかもしれない。

本稿では大幅な近似を導入した解析計算だけを行っており、結果の信頼性は必ずしも高いとはいえない。数値計算等による定量的な検証が必要である。各種パラメータが実際にはどの程度の値を取るかの情報も、より定量的な政策提案のためには必要である。数値計算

の結果については発表の際に紹介する予定である。

謝辞： 本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究 (A) 「MaaS + CV 時代の次世代交通システムに向けたインフラと制度の設計（課題番号：20H00265, 代表：井料隆雅）」の援助によりなされた。

参考文献

- 1) Alonso-Mora, J., Samaranayake, S., Wallar, A., Frazzoli, E., and Rus, D.: On-demand high-capacity ride-sharing via dynamic trip-vehicle assignment, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol.114, No.3, pp.462–467, 2017.
- 2) Segui-Gasco, P., Ballis, H., Parisi, V., Kelsall, D. G., North, R. J., and Busquets, D.: Simulating a rich ride-share mobility service using agent-based models, *Transportation*, Vol.46, No.6, pp.2041–2062, 2019.
- 3) Lavieri, P. S. and Bhat, C. R.: Modeling individuals' willingness to share trips with strangers in an autonomous vehicle future, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.124, No. August 2018, pp.242–261, 2019.
- 4) Grab Holdings Inc.: GrabShare, <https://www.grab.com/sg/driver/transport/share/>, (2022 年 9 月 28 日閲覧).
- 5) Uber Technologies Inc.: UberX Share, <https://www.uber.com/jp/en/ride/uberx-share/>, (2022 年 9 月 28 日閲覧).
- 6) Lyft, Inc.: Lyft Shared, <https://www.lyft.com/rider/shared>, (2022 年 9 月 28 日閲覧).
- 7) Oh, S., Seshadri, R., Azevedo, C. L., Kumar, N., Basak, K., and Ben-Akiva, M.: Assessing the impacts of automated mobility-on-demand through agent-based simulation: A study of Singapore, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.138, No. May, pp.367–388, 2020.
- 8) Simonetto, A., Monteil, J., and Gambella, C.: Real-time city-scale ridesharing via linear assignment problems, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.101, No. February, pp.208–232, 2019.
- 9) van Engelen, M., Cats, O., Post, H., and Aardal, K.: Enhancing flexible transport services with demand-anticipatory insertion heuristics, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.110, pp.110–121, 2018.

(Received 2022. 9. 30)

VEHICLE CAPACITY AND OPERATING METHODS FOR DEMAND-RESPONSIVE TRANSPORT: AN OBSERVATION

Joshua Teguh SANTOSO, Takamasa IRYO