

乗合タクシーのライドシェア問題における空席ごとの受入柔軟性の差に着目した目的関数の提案

1. 研究の背景・目的

Ride-sharing problemとは（dial-a-ride problemとも）

- オンデマンドの乗合サービス（乗合タクシー、デマンドバス）の運用にあたって、**個々の車両がどの乗客群をいかなる経路で運送**するのか
- 巡回経路を求める（Vehicle Routing Problem）にあたってNP困難であり、乗車定員、リクエスト数の規模が大きくなると厳密解を求める計算時間が長く

課題意識

- 実際に乗合タクシーを運用する際に**何を持って優れた解とするのか目的関数**について考慮することが必要、目的関数について分析・工夫した既往研究は数少なく分析・改善の余地

研究	内容
Schuller et al. (2021)	リクエストの拒否率の空間的な不平等さをジニ係数で定義し、ジニ係数を下げることがを目的に、拒否率の高いエリアを出発地とするリクエストによる乗客の所要時間のコストを下げた目的関数を提案
Fielbaum et al. (2022)	需要と供給の空間的な偏りによる運送効率の低下を抑制するために、需要の多い地区に向かう割り当ての乗客の所要時間のコストを低減する目的関数を提案

研究の目的

- 悪天候時など**需要が過多となり供給が逼迫**する特定の状況において、**多くのリクエストを運送する目的関数**の提案

新規性

- 空席ごとの価値の差（受け入れ柔軟性の差）に着目した目的関数を提案

2. シミュレーションの諸条件



対象地域の道路ネットワークデータ

対象地域

- 東京都の大丸有地区を中心とした**16の小ゾーン**（第6回東京都市圏パーソントリップ調査）

需要データ

- 東京のタクシー 2021²⁾に基づくタクシー輸送実績とPT調査データから生成（1日あたり**51,141**トリップ）

道路ネットワークデータ

- 道路ネットワークデータをOpenStreetMapから生成
- 各リンクの旅行速度は道路交通センサスを基に補正

車両台数：6シナリオ

- **390台、480台、570台、660台、750台、840台**
 - 初期位置については、神田駅前交差点、八重洲中央口前交差点、新橋駅銀座口前交差点のリンクに運用台数の**3分の1**ずつ配置
 - 東京のタクシー2021から推定される対象地域の1日の実働車両**2,338**車と比較して少数

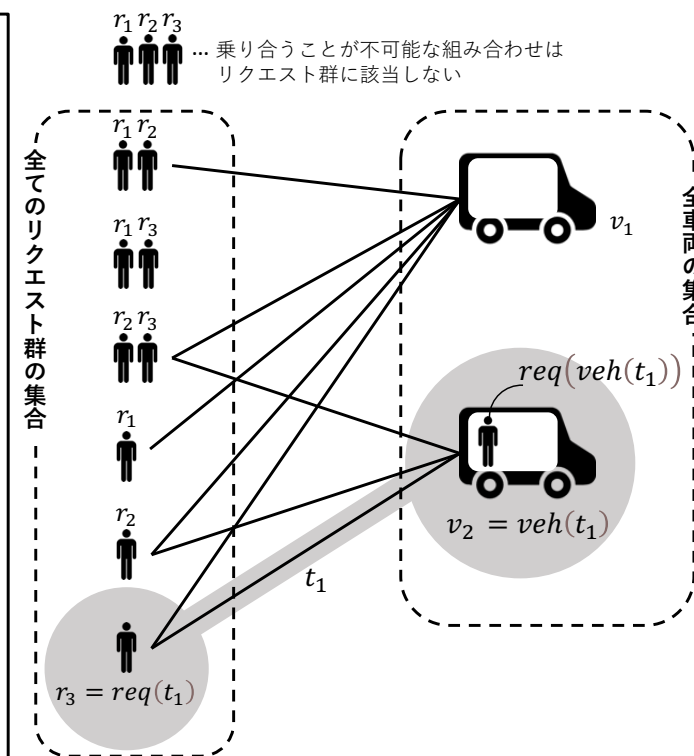
3.1 AMアルゴリズムの概要

解法の分類

- **Exact**：整数計画問題として定式化し、厳密解を得る
- **Dynamic**：未来の需要が既知でなく柔軟に需要に対応
- **バッチベース**：一定時間リクエストの蓄積をまたてから一括して割り当て
 - 本研究は**30秒ごと**にバッチ処理を行う

AMアルゴリズムの概要

- リクエスト群の定義
 - 30秒間に新たに生じたリクエストの集合を R_b 、前回以前のバッチ処理で既に車両が割り当てられているが乗車前のリクエストの集合を R_a
 - R_b と R_a の和集合 R_e に含まれるリクエストのうち、**乗り合うことが可能な組合せをリクエスト群**と定義
- **全てのリクエスト群の集合と全車両の集合は2部グラフ**を成し、バッチ処理では後述する**コストとペナルティを最小化する式を解くマッチング**を採用



リクエスト群と車両の2部グラフとトリップ
(3リクエスト・2車両の場合)

1. Schuller, P., Fielbaum, A. and Alonso-Mora, J. (2021) "Towards a geographically even level of service in on-demand ridepooling", In 2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), pp. 2429-2434.
2. Fielbaum, A., Kronmueller, M. and Alonso-Mora, J. (2022) "Anticipatory routing methods for an on-demand ridepooling mobility system", Transportation, 49(6), pp.1921-1962.

3.2 整数線形問題

トリップのコスト項

$$\min_{x,y \in \{0,1\}} \left\{ \sum_{t \in T} x_t c(t) + \sum_{r \in R_b} y_r p_b(r) + \sum_{r \in R_a} y_r p_a(r) \right\} \quad (1)$$

拒否ペナルティ項

s. t.

$$y_r + \sum_{t:r \in req(t)} x_t = 1 \quad \forall r \in R_e \quad (2)$$

$$\sum_{t:v=veh(t)} x_t \leq 1 \quad \forall v \in V \quad (3)$$

1. 式(1)はトリップのコストと拒否ペナルティからなる、最小化する目的関数
- 拒否リクエストには大きな定数ペナルティを設定しているため、既に拒否リクエスト数は可能な限り最小化

■ トリップのコスト項を工夫することで次回以降のバッチ処理の拒否リクエスト数を削減することを目的とも解釈
2. 式(2)は R_e に含まれる全てのリクエストはいずれかのトリップによって運送される、もしくは拒否されることを条件付け
3. 式(3)は個々の車両に2つ以上のリクエスト群は割り当てられないことを条件付け
- 上記の整数計画問題を解くマッチングをリクエストと車両の割り当てとして採用

➤ 式(1)～(3)の整数計画問題を解くにあたって最適化ソルバーとしてオープンソースソフトウェアのGLPKを用いた

3.3 リクエストに車両を割り当てる条件と2部グラフ

1. 待ち時間の許容最大値を6分
2. 到着遅延時間の許容最大値を11分
3. 乗車定員を4名
- 加えて、 R_a に含まれるリクエストについては、既定の割り当てよりも待ち時間が増加しないという条件を付す

➤ 初回のバッチ処理で車両が割り当てられなかったリクエスト（そのリクエストが含まれるどのリクエスト群にも車両が割り当てられなかった場合）は運送拒否となり、次回以降のバッチ処理で扱われない

■ 拒否リクエストによるペナルティ項を介して整数線形問題に影響を及ぼす（なるべく拒否リクエストが発生しないマッチングに）
- 2部グラフの作成
- リクエスト群と車両の2部グラフを作成し、待ち時間・到着遅延時間の最大許容値と乗車定員4名の条件を満たしながら運送することのできる全てのトリップ（リクエスト群と車両の辺）の集合 T を探索

4.2 目的関数 (c)空席制約度シナリオ

制約時間

$$c_s(t) = \sum_{d \in D(t)} time(d, t) \cdot \max_{r \in req(d, t)} \frac{\tau_p(r, t)}{1000} \cdot seat(d, t)$$

制約の強さ

影響を与える空席数

数学表記

Symbol	Meaning
$D(t)$	トリップ t に含まれる全降車地点の集合
d	1つの降車地点
$time(d, t)$	トリップ t における、降車地点 d の降車時刻と直前の降車地点の降車時刻（なければバッチ処理時刻）の差
$req(d, t)$	トリップ t における、降車地点 d とそれ以降の降車地点で降車するリクエストの集合
$seat(d, t)$	トリップ t における、降車地点 d における降車前の利用予定のない空席数（正確には、降車直前の移動を含む以降の最小空席数）

数学表記

Symbol	Meaning
R_b	30秒間に新たに生じたリクエストの集合
R_a	前回以前のバッチ処理で既に車両が割り当てられているが乗車前のリクエストの集合
R_e	R_b と R_a の和集合
r	1つのリクエスト
V	運用されている全車両の集合
v	1つの車両
T	2部グラフにおけるリクエスト群と車両の辺がトリップであり、条件を満たしながら運送することのできる全てのトリップの集合
t	1つのトリップ
$req(t)$	t に割り当てられたリクエスト群
$veh(t)$	t に割り当てられた車両
$req(v)$	車両 v に既に乗車済みのリクエストの集合
x_t	トリップ t が採用された際にのみ1の値をとる二値変数
y_r	リクエスト r が拒否された時にのみ1の値をとる二値変数
$p_b(r)$	30秒間に生じたリクエスト r ($\in R_b$)が拒否される際の定数ペナルティ（24時間）
$p_a(r)$	既に車両が割り当てられているが乗車前のリクエスト r ($\in R_a$)が拒否される際の定数ペナルティ（24,000時間）
$c(t)$	トリップ t のコスト
$\tau_p(r, t)$	トリップ t に従って運送される際のリクエスト r の到着遅延時間

4.1 目的関数 ベースシナリオ

乗客の到着遅延時間

$$c_b(t) = \sum_{r \in req(t)} \tau_p(r, t) + \sum_{r \in req(veh(t))} \tau_p(r, t) \quad (4)$$

車両の予定所要時間

$$c_v(t) = \left[\sum_{r \in req(t)} (1 - W_v) \cdot \tau_p(r, t) + \sum_{r \in req(veh(t))} (1 - W_v) \cdot \tau_p(r, t) \right] + W_v \tau_v(t) \quad (5)$$

数学表記

Symbol	Meaning
$\tau_p(r, t)$	トリップ t に従って運送される際のリクエスト r の到着遅延時間
$\tau_v(t)$	トリップ t による車両 v の所要時間（バッチ処理時点から未利用車両になるまでの予定所要時間）
W_v	区間[0,1]の値をとる車両の所要時間の重みを示す比率

車両の所要時間の重みシナリオ	
シナリオ	W_v
(a) LOS最大化	$W_v = 0$
(b) VKT最小化	$W_v = 1$

4.3 目的関数 (d)空席柔軟度シナリオ

$$c_f(t) = \left[\sum_{d \in D(t)} time(d, t) \cdot \frac{\tau_l}{1000} \cdot seat_l \right] - \sum_{d \in D(t)} time(d, t) \cdot \max_{r \in req(d, t)} \frac{\tau_l - \tau_p(r, t)}{1000} \cdot seat(d, t) \quad (7)$$

仮にずっと空車であった時の柔軟度

期間の長さ

期間中の柔軟性

期間中の空席数

数学表記

Symbol	Meaning
τ_l	到着遅延時間の許容最大値（11分）
$seat_l$	乗車定員（4名）

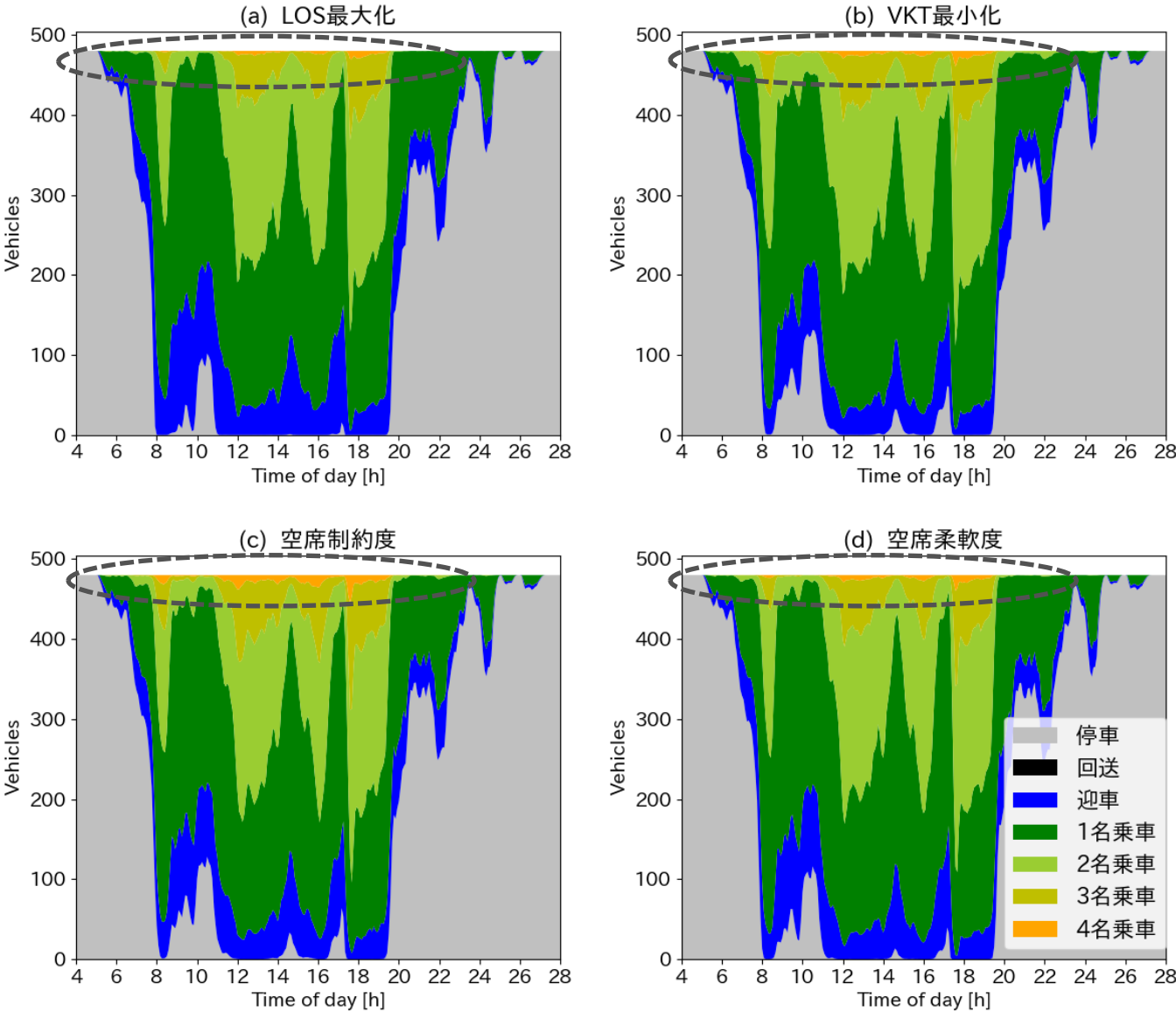
5. シミュレーション結果

表 各シナリオのLOSとVKT指標

シナリオ	拒否リクエスト数	平均待ち時間 (秒)	平均車内遅延 時間 (秒)	1台当たり平均 走行距離 (km)	計算時間 (mm:ss)
運用台数 390台					
(a) LOS最大化	10,068	234.3	202.0	233.3	7:48
(b) VKT最小化	9,698	232.9	223.9	227.3	8:04
(c) 空席制約度	9,167	225.0	217.7	227.1	8:06
(d) 空席柔軟度	9,498	230.0	211.2	230.8	8:05
運用台数 480台					
(a) LOS最大化	4,788	219.4	158.5	223.1	9:09
(b) VKT最小化	4,500	218.4	191.9	213.8	9:35
(c) 空席制約度	3,930	204.4	176.9	213.8	9:58
(d) 空席柔軟度	4,293	212.3	168.8	219.5	9:55
運用台数 570台					
(a) LOS最大化	1,967	200.0	104.7	211.0	9:02
(b) VKT最小化	1,797	201.7	150.0	198.5	10:28
(c) 空席制約度	1,444	182.7	126.4	199.3	10:44
(d) 空席柔軟度	1,640	192.1	117.2	206.4	10:10
運用台数 660台					
(a) LOS最大化	844	180.9	59.9	196.9	9:08
(b) VKT最小化	797	187.8	111.7	182.3	10:15
(c) 空席制約度	572	166.0	87.6	184.1	8:49
(d) 空席柔軟度	706	174.1	73.4	191.5	8:44
運用台数 750台					
(a) LOS最大化	230	166.1	38.4	180.7	8:38
(b) VKT最小化	192	177.5	88.7	166.2	11:36
(c) 空席制約度	18	153.3	62.7	168.4	8:56
(d) 空席柔軟度	69	160.4	50.3	175.2	8:26
運用台数 840台					
(a) LOS最大化	14	153.3	20.4	164.6	6:37
(b) VKT最小化	23	168.6	70.6	151.4	8:52
(c) 空席制約度	17	144.4	44.3	153.9	7:30
(d) 空席柔軟度	15	149.4	30.6	159.9	7:14

*(a) LOS最大化を基準とした増減率と差分をカッコ内に示した

図 車両の状態別台数の推移（400台運用）



6. シミュレーション結果の分析

表 LOSとVKT指標

- (c)：最も拒否リクエスト数を削減、(d)：(c)に劣るが拒否リクエストを削減
- (c),(d)：平均待ち時間が減少、車内遅延時間が増加、VKTが減少
- (c),(d)：運用台数に余裕が出ると拒否リクエスト削減の優位性が失われる

図 車両の状態別台数推移

- (c)空席制約度シナリオは8時~19時の時間帯の4名乗車の車両台数と停車台数が多い

空席ごとの受入柔軟性に着目した目的関数は拒否リクエスト数を削減
将来的なオンデマンドの乗合の配車・運送ロジックへの活用に期待