

オンデマンド実時間配車サービス SAVS における待ち時間分散の最適化

Waiting Time Dispersion Optimization for
On-demand Real-Time Vehicle Dispatch Service SAVS西川 和真[†] 平田 圭二[†] 竹川 佳成[†]
Kazuma Nishikawa Keiji Hirata Yoshinari Takegawa

1. はじめに

現在、過疎地域・地方都市の高齢者は、移動手段の乏しさを抱えている。理由の一つは、高齢化社会や大都市集中による地域の過疎化である。過疎地域や地方都市は、都会のように鉄道やバスの本数は充実しておらず、公共交通による移動は利便性が高いとは言えない。これは公共交通の利用者の減少によって、事業者がサービスの採算性を保つことが難しくなり、本数を減らさざるを得ないことが一因している。そのため、住民は移動手段を自家用車へ頼らざるを得ない。しかし、近年の高齢者ドライバーによる交通事故の多発から、高齢者が自ら運転免許を返納することは珍しくなくなった。公共交通の本数も少なく、運転することも憚られる過疎地域・地方都市の高齢者は、移動手段の確保が難しくなっている。

こうした地域の抱える課題に対し、効率的な移動手段の提供を行うため、Smart Access Vehicle Service (SAVS) [1] の実証実験・社会実装が進んでいる。SAVS は、タクシーの利便性とバスの経済性を併せ持つ、デマンド応答型公共交通の一種である。乗客の乗車要求(デマンド)に対し、配車アルゴリズムによる配車計算を行い、需要に即した乗り合い車両の配車決定を行うことができる。SAVS は全国各地での実証実験[2]を経て、群馬・岩手県等で、実際に公共交通としてのサービスを開始している[3]。

SAVS における配車アルゴリズムは、野田ら(2008)が提案した逐次最適挿入法[4]を採用している。この手法は十分な乗車要求と車両台数が存在すれば、路線バスよりも利便性の高い移動サービスを提供できることが示されている[4]。しかし、過疎地域・地方都市ごとに事情が異なる中で、SAVS を導入しても乗車要求が十分でなく、車両台数を確保できない状況も考えられる。その状況下においては、逐次最適挿入法のパフォーマンスが十分に発揮できず、デマンド達成数の減少や、乗客間での車両待ち時間(デマンド発生から乗客が乗車するまでの時間)のばらつきが増大し、待ち時間の不公平さが生まれる可能性が存在する。

本稿はこの課題を解決するために、逐次最適挿入法を改良し、デマンド全体の車両待ち時間の分散を最小化する改良アルゴリズムを提案する。この提案手法は、デマンド達成率の向上とデマンド全体の待ち時間における分散の抑制を目的としている。提案手法の有効性の検証方法として、交通流シミュレータを用いて逐次最適挿入法と提案手法に配車計算を行わせ、車両待ち時間の変動係数・平均待ち時間とデマンド達成率を比較した。

本稿の構成は以下の通りである。2章では関連研究を述べ、本稿の立ち位置を示す。3章では、提案手法の概要を

説明する。4章では、交通流シミュレーションの実験条件について述べ、5章で逐次最適挿入法と提案手法のシミュレーション結果を示す。最後に6章で本稿をまとめる。

2. 関連研究

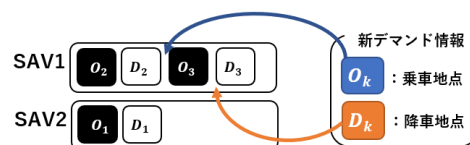
SAVS における配車計算のように、乗車要求を行った n 人の利用者のために車両のルートとスケジュールを設計する問題を Dial-a-ride 問題 (DARP) と呼ぶ[5]。DARP は主に乗車要求の形態によって分類される。乗車要求があらかじめ知られている場合は静的 DARP、乗車要求が徐々に発生する場合は動的 DARP と分類されている[5]。

静的 DARP の解法として、厳密解法(Exact-method)がある。厳密解法の例として、DARP を定式化し、組み合わせ最適化問題の有効手法である枝刈りアルゴリズムを解法とした Cordeau (2006) の手法[6]などがある。厳密解法は静的 DARP において、配車における最適解を見つけることができるが、動的 DARP ではタイムリーに解を計算できない可能性が存在している[7]。そのため、SAVS などのデマンドに対しリアルタイムで配車を行うサービスにおいては実装が難しいと考えられる。

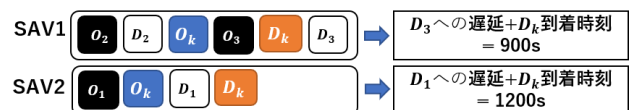
動的 DARP の解法として、挿入ヒューリスティクスがある。この手法の特徴は、計算時間が高速であることと、実装が簡単な点である[8]。厳密解法とは違い計算時間が高速なことにより、確率的に発生する乗車要求に対し、リアルタイムに配車計算を行うことが可能である。

逐次最適挿入法は動的 DARP の解法と位置づけられる。逐次最適挿入法の概略図を図1に示し、野田らの論文[4]から一部引用して説明する。

1. 新デマンドの発生



2. 新デマンド情報の挿入・コスト計算



3. 最小コストの車両へ割り当て



図1 逐次最適挿入法の概略図

[†] 公立はこだて未来大学 Future University Hakodate

- 1) 各車両は乗降地点の経路順をリストとして保持している。デマンド 1 の乗車地点を O_1 、降車地点を D_1 と表す。新しいデマンド k が発生したとき、各車両の経路地点リストを取得する。各車両は新デマンドの乗車・降車地点を、全ての挿入パターンで経路地点リストに挿入する。
- 2) 全挿入パターンにおける配車コストを求める。配車コストは新デマンドを挿入したことによる、既存のデマンドへの遅延時間、新デマンドの達成予定時刻の二つの総和とする。ただし、挿入によって既存または新しいデマンドの制限時刻を超過してしまう場合は、その挿入は配車候補から除外する
- 3) 全ての車両・挿入パターンの中で、最もコストが小さいものを求め、その車両に新デマンドを割り当てるよう経路地点リストを更新する。

逐次最適挿入法は、最適解ではなく準最適解を求めることで計算量を抑え、リアルタイムでの配車を実現している。さらに最小化するコストを、既存デマンドへの遅延時間と新デマンドの達成予定時刻の総和とすることで、デマンド遂行の平均時間を最小化することができる。逐次最適挿入法は十分な乗車要求と車両台数が存在すれば、路線バスよりも利便性の高い移動サービスを提供できる [4]。

SAVS の運行方法を扱った論文として、過疎地域における SAVS の課題に取り組んだ岩田ら (2020) の先行研究がある。岩田らは広域過疎地域において長距離のデマンドが受理されにくい点を指摘し、デマンドの距離別で配車する車両を分担する運行方法を提案している [9]。

本稿は、逐次最適挿入法を改良することによる、デマンド達成率の上昇や車両待ち時間分散の抑制を目的としている。配車アルゴリズム自体を変更する利点は、運行方法を変えずに既存手法との併用を行えることである。デマンド発生頻度が高い時間帯は逐次最適挿入法を使い、低い時間帯に提案手法を使うなど、配車手法の組み合わせを行うことができ、一日を通して最適な運行を提供することができる。この利点から、配車アルゴリズム自体を改良するというアプローチを取った。

3. 提案手法

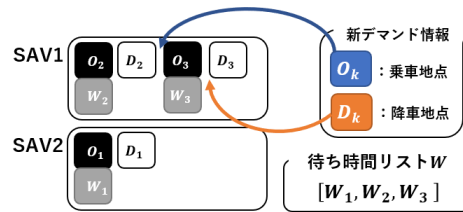
3.1 車両待ち時間分散の最小化

デマンド不成立は、以下の 3 点が主な原因である。

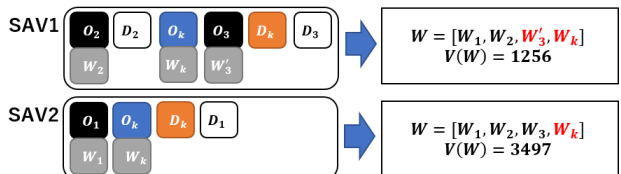
1. 制限時間の超過
2. 車両の定員超過
3. 乗客のデマンドキャンセル

提案手法は車両待ち時間のばらつきを最小化するほかに、デマンド不成立における 1 の原因について、逐次最適挿入法とは異なる方法でデマンド不成立を減少させることを考える。制限時間の超過とは、各車両が新しく発生したデマンドを受け付ける時間的余裕がないということの意味する。つまり、この時間的余裕を得られるような配車アルゴリズムであれば、デマンド達成率を上昇させることができる。時間的余裕を得る方法として、逐次最適挿入法は平均時間を最小化することによって、別のデマンドに対応できるまでの時間を最短にしている。しかし、逐次最適挿入法は乗車要求や車両台数が少ない場合にはパフォーマンスが低下し、余裕を作れなくなることでデマンド達成率が低下する可能性がある。そこで提案手法は、デマンドにおける待ち

1. 新デマンドの発生



2. 新デマンド情報の挿入・コスト計算



3. 最小コストの車両へ割り当て

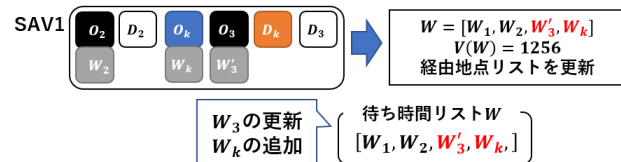


図 2 提案手法の概略図

時間分散を最小化し、平均待ち時間を少し増加させる。これにより、乗車地点までの迂回経路をあえて多くさせ、本来ならば受理できなかったデマンドを受理できるようになる時間的余裕を持たせる。また、乗客間の待ち時間のばらつきを最小化することで、サービスの不公平さを抑えることができる。そのため、提案手法はデマンド全体の車両待ち時間における分散を最小化する配車コストとする。

3.2 改良アルゴリズムの概要

図 2 に提案手法の概要図を示し、以下に逐次最適挿入法から変更した主な点を述べる。

1. 過去に配車したデマンドの待ち時間を記録していく、待ち時間リストを導入した。
2. 配車コストを、新デマンドの待ち時間を待ち時間リストに追加したときのリスト全体の分散とした。

待ち時間リストは、過去に配車したデマンドにおける待ち時間を参照し、既存デマンドとの分散を計算するために設定した。配車コストは、デマンドが発生した際、新デマンドの車両待ち時間をリストに追加し、リスト全体の分散を配車コストとする。新デマンドを配車する際、この配車コストが最も小さい車両・デマンド情報の挿入パターンで配車を行う。

以下に計算手順を述べる。

- 1) 新デマンドが発生したとき、各車両の経路地点リストと待ち時間リストを取得する。このときの新デマンドの乗車地点を O_k 、降車地点を D_k とする。待ち時間リストにおける W_1 はデマンド 1 における待ち時間を示す。

新しいデマンド k が発生したとき、各車両の経由地点リストを取得する。各車両は新デマンドの乗車・降車地点を、全ての挿入パターンで経由地点リストに挿入する。

- 2) 全挿入パターンにおける、配車コストを求める。配車コストの算出は、まず挿入によって変動した既存デマンドの待ち時間 W_i' を待ち時間リストに反映し、新デマンドにおける車両待ち時間 W_k を待ち時間リストに追加する。そしてリスト全体の分散を算出し、これを配車コストとする。ただし、挿入によって既存または新しいデマンドの制限時刻を超過してしまう場合は、その挿入は配車候補から除外する。
- 3) 全ての車両・挿入パターンの中で、最もコストが小さいものを求め、その車両に新デマンドを割り当てるよう経由地点リストを更新する。そして成立したデマンド k における待ち時間 W_k を待ち時間リストに追加する。この時、新デマンドの挿入によって他のデマンドの待ち時間が変動した場合、その変動を待ち時間リストに反映する。

提案手法の特徴は、過去のデマンドの待ち時間を参照し、新デマンドの待ち時間との分散を配車コストとしている点である。提案手法は新たなデマンドが発生すると、その瞬間のデマンド全体（新たなデマンド+過去のデマンド）の分散を最小化する配車を行う。この配車をデマンドが発生するたびにを行うことによって、結果的に期間内（一日、または任意の期間）に発生したデマンド全体の待ち時間が最小化されることが期待できる。そのために待ち時間リストを導入し、配車コストを新デマンドにおける待ち時間を待ち時間リストへ追加したときのリスト全体の分散とした。

4. シミュレーション実験

本稿は提案手法の有効性を検証するため、交通流シミュレーションによる実験を行った。本章ではシミュレーションにおける実験条件と、比較する3つの指標について説明する。

4.1 実験条件

交通流シミュレータはオープンソースソフトである Simulation of Urban MObility (SUMO) を用いた。

シミュレーションの舞台設定として、以下の条件を持つ道路網を用いた。

- 道路網全体は 5km 四方の正方形であり、50×50 のグリッドが 100m 間隔で構築されている。
- 一般車両は存在せず、SAV は一定の速度で走行する
- SAV は直進と右左折を同じ速度で行う
- 乗車・降車地点の分布は一様である

デマンド分布（デマンドにおける乗車・降車地点）をシミュレーションに設定する手法として、Diana ら（2004）の実稼働しているデマンドタクシーのデータからデマンド分布を反映させる実験手法[10]などが存在するが、アルゴリズムの特性を走行結果へ反映させやすくするため、デマンド分布は一様とした。

また、実験に用いたパラメータを表 1 に示す。

4.2 比較する 3 つの指標

本稿では、逐次最適挿入法と改良アルゴリズムにシミュレーションを行わせたときの 3 つの指標を算出し有効性を検証する。

表 1 シミュレーションにおけるパラメータ

パラメータ	値
シミュレーション時間	36000s
デマンド発生頻度	1/240,300,360,420,480,540 (回/s)
車両台数	3,4,5,6台
車両速度	30[km/s]
最大搭乗人数	4名
乗車制限時間	600s
降車制限時間	1200s

(1) 変動係数

車両待ち時間における標準偏差を平均値で割った数値を表す。改良アルゴリズムが待ち時間の相対的なばらつきを縮小できるかを評価するために算出する。

(2) 平均待ち時間

デマンド全体における車両待ち時間の平均値を表す。最小化するコストを変更したことによって、平均待ち時間がどのくらい増加するかを評価するために算出する。

(3) デマンド達成率

達成したデマンド数を発生したデマンド数で割った数値を表す。平均待ち時間を増加させて生まれた時間的余裕が、デマンド達成数に影響を及ぼしているかを評価するために算出する。

これらの指標は車両台数・デマンド発生頻度の条件 1 セットにつき 3 通りのデマンド群をシミュレーションし、得た 3 つの値の平均値とした。これは、ランダムに発生するデマンドにおいて、車両台数・デマンド発生頻度の条件における、尤もらしい値を取得するためである。

5. シミュレーション結果と考察

5.1 シミュレーション結果

逐次最適挿入法と提案手法の車両待ち時間における 3 つの指標を、車両台数・デマンド発生頻度をパラメータとするグラフとして示す。図中の new/prev はそれぞれ提案手法/逐次最適挿入法のデータを表している。変動係数を図 3 に示す。車両台数・デマンド発生頻度の全ての条件において、提案手法の変動係数が逐次最適挿入法の変動係数よりも 0.07~0.18 小さいことが確認できる。平均待ち時間を図 4 に示す。図 4 から、車両待ち時間の平均値が逐次最適挿入法の平均値よりも約 22~63 秒ほど増加していることが確認できる。デマンド達成率を図 5 に示す。図 5 から、車両台数が 6 台かつデマンド発生頻度が 1/420~1/240[s] のとき、提案手法のデマンド達成率が 0.3~1.1% 上昇していることが確認できる。しかし、それ以外の条件ではデマンド達成率は等しい、または 0.1%~2.1% 減少した。

5.2 考察

変動係数について、すべての条件で低下を確認したことから、提案手法が車両待ち時間のばらつきを縮小させる配車を行っていることが示唆される。

平均待ち時間について、すべての条件で上昇を確認した。これは、逐次最適挿入法における配車コストの算出方法を変更したためであると考えられる。

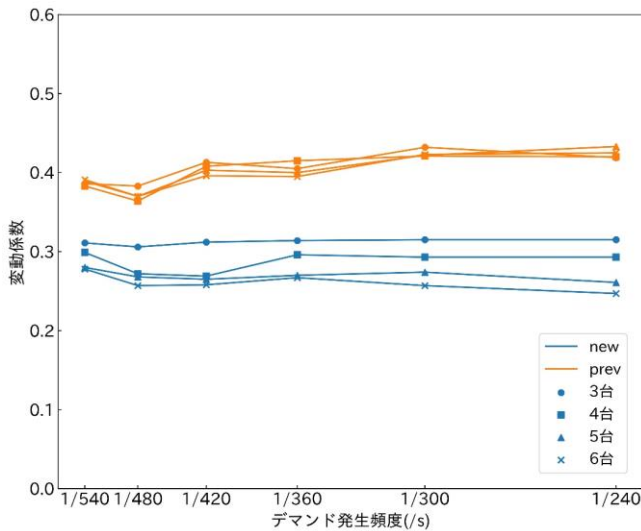


図3 車両台数別の変動係数

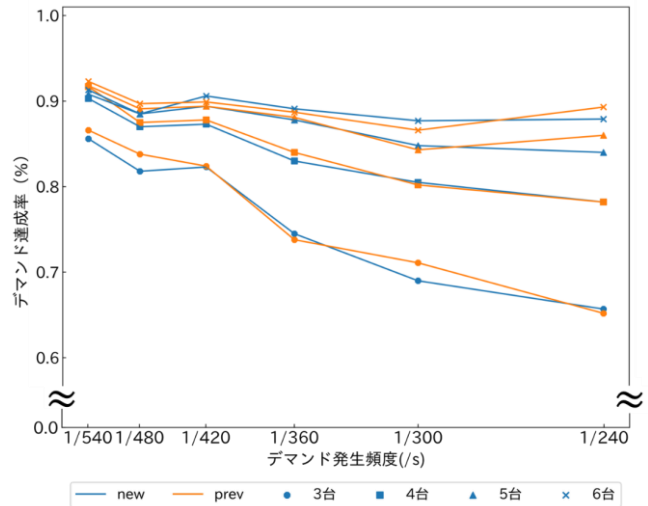


図5 車両台数別のデマンド達成率

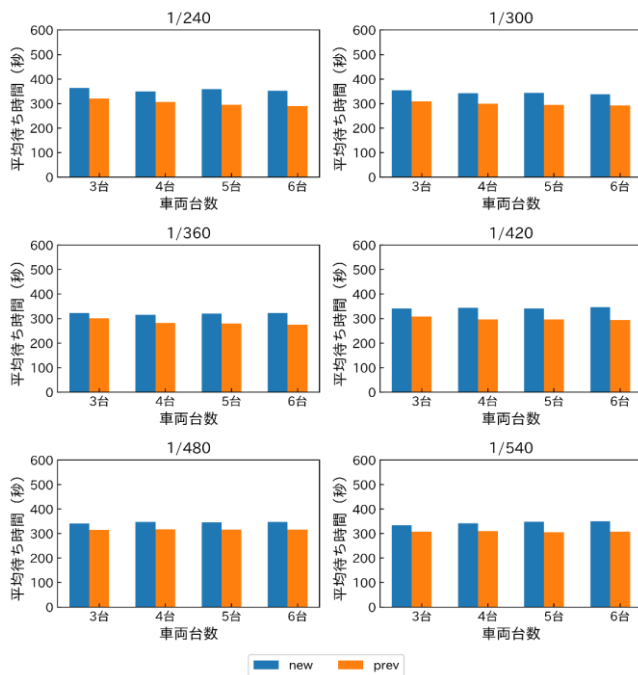


図4 デマンド発生頻度別の平均待ち時間

デマンド達成率について、台数が多い条件においてわずかに上昇したことが確認されたが、台数が少ない条件では同等もしくは低下していることが確認された。よって、デマンド達成率を上昇させるという目的に対して、課題が残る結果となった。

6. おわりに

本稿は、逐次最適挿入法における配車コストを変更し、分散を最適化するための手法を提案した。シミュレーションの結果から、車両待ち時間の分散が減少したことを確認した。また、平均待ち時間が増加したことを確認した。また、車両台数が6台導入され、かつデマンド発生頻度が1/405~1/240[s]である限定的な条件下において、デマンド達成率がわずかに上昇することを確認した。

今後の課題として、デマンド達成率が上昇する条件についてより調査を進めていく必要がある。また、デマンド達成率の上昇幅も十分なものではないため、よりデマンド達成率の上昇に効果を生むようアルゴリズムを改良していく必要がある。

参考文献

- [1] 中島秀之, 小柴等, 佐野渉二, 落合純一, 白石陽, 平田圭二, 野田五十樹, 松原仁, “フルデマンド型公共交通配車システムの実装と評価, 情報処理学会論文誌”, Vol.57, No.4, pp.1290-1302 (2016).
- [2] 平田圭二, 鈴木恵二, 野田五十樹, 落合純一, 金森亮, 松館渉, 中島秀之, 佐野渉二, 白石陽, 松原仁, “完全自動リアルタイムフルデマンド交通システム SAVS 向けプラットフォームの設計と実装, 情報処理学会研究報告”, Vol. 2017-ITS-68, No.1, pp.1-6 (2017).
- [3] 未来シェア, “サービスレポート”, [Online] <http://www.miraishare.co.jp/report/>, (2021/06/04 Access).
- [4] 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).
- [5] Cordeau, J. F., & Laporte, G., “The dial-a-ride problem: models and algorithms”, *Annals of operations research*, Vol.153, No.1, pp.29-46 (2007).
- [6] Cordeau, J. F., “A branch-and-cut algorithm for the dial-a-ride problem”, *Operations Research*, Vol.54, No.3, pp.573-586 (2006)
- [7] Ho, S. C., Szeto, W. Y., Kuo, Y. H., Leung, J. M., Petering, M., & Tou, T. W., “A survey of dial-a-ride problems: Literature review and recent developments”, *Transportation Research Part B*, Vol.111, pp.395-421(2018).
- [8] Campbell, Ann Melissa, and Martin Savelsbergh. "Efficient insertion heuristics for vehicle routing and scheduling problems", *Transportation science*, Vol.38, No.3, pp.369-378 (2004).
- [9] 岩田聖, 鈴木恵二, “広域地方に向けた SAVS シミュレーション分析”, 人工知能学会全国大会論文集, Vol.JSAI2019, pp.1-2 (2019).
- [10] Diana, M., Dessouky, M.M., “A new regret insertion heuristic for solving large-scale dial-a-ride problems with time windows”, *Transportation Research Part B*, Vol.38 No.6, pp.539-557 (2004).