

自動運転車を用いたデマンド型交通における 配車手法の実装と評価

恋塚 葵^{1,a)} 大岸 智彦¹

概要：ユーザの希望に応じて乗合を実現するデマンド型交通は、人口減少が進んだ過疎地域においてより少ない経費で住民の足を確保できると着目されている。また、郊外部や農村部では運転手の不足が課題となっており、将来的には無人化した自動運転車の利用が望まれている。このような需要を見据え、筆者らは自動運転車向けデマンド型交通運行管理システムの開発を進めている。自動運転車の運行では、非サービス中を含めてスケジューリングを行うことが重要となる。提案する配車手法では、非サービス中の車両の待機場所である拠点から出発し各デマンドの輸送を終え拠点に帰着するまでの一連の運行をトリップと定義し、トリップに基づく配車計算を行う。本稿では、配車や予約管理の機能を含む運行管理システムを紹介するとともに、実証実験・シミュレーションを通じて配車手法の評価を示す。

キーワード：デマンド、自動運転、配車、予約

Implementation and Evaluation of Vehicle Allocation Method in On-demand Transport System for Autonomous Vehicles

Abstract: On-demand transport system, which realizes ride-sharing according to the wishes of users, is attracting attention as it can secure the transportation for residents at less cost in depopulated areas where the population is declining. In suburbs and rural areas, the shortage of drivers has become an issue, and the use of unmanned autonomous vehicles is desired in the future. In anticipation of such situation, we are developing an on-demand transport operation management system for autonomous vehicles. It is important to schedule even during non-service time in the operation of autonomous vehicles. Our proposed vehicle allocation method defines a series of operation from the base, which is a waiting place for non-served vehicles, to the completion of transportation of each demand and the return to the base as a trip, and calculates the vehicle allocation based on the trip. This paper introduces the operation management system that includes vehicle allocation and reservation management functions, and evaluates the vehicle allocation method through a demonstration experiment and simulations.

Keywords: demand, autonomous vehicle, ride-sharing, reservation

1. はじめに

少子高齢化に伴い人口減少が進んだ地域では、路線バスの利用者数が減少傾向にあり、採算性の悪化が問題となっている。例えば、群馬県では1965年度から2002年度にかけて、路線バスの年間輸送人員は13,771万人から874万人へ、その輸送分担率は53.3%から0.8%へと減少している[1]。一方で、近年は高齢者の運転免許返納が促進され

ており、高齢者をはじめとした住民が快適に利用できる公共交通の整備が求められている。

このような中、ユーザの希望に応じて乗合を実現するデマンド型交通は、より少ない経費で住民の足を確保できると注目されており、各地で導入が進められている。デマンド型交通には複数の運行形態があり、定路線をベースに予約に応じて寄り道を行う迂回ルート・エリアデマンド型[2]、[3]や運行ルートは定めず予約に応じて運行を行う自由経路型[4]、[5]などが存在する。このうち、需要量が比較的少ない郊外部や農村部では、配車の自由度が高い自

¹ 株式会社 KDDI 総合研究所
KDDI Research, Inc

^{a)} ao-koizuka@kddi.com

由経路型が有効であるといわれている [6].

自由経路型のデマンド型交通を対象とした配車システムはこれまで提案がなされてきたが、多くは運転手が運転を行う自動車の利用が想定されている。しかしながら、郊外部や農村部では運転手の不足が課題となっており、将来的には無人化した自動運転車の利用が望まれている。以上の観点から、郊外部や農村部を主な対象地域としたデマンド型交通サービスの実現を目指し、筆者らは自動運転車向けデマンド型交通運行管理システムの開発を進めている。配車手法には、自動運転車を用いる場合などに特に必要となる、非サービス中の車両を拠点にて待機させる運行を実現するため、拠点からの出発・帰着を考慮したトリップ単位に基づく手法を提案する。本手法では、今すぐの配車を希望する即時予約と出発希望時刻もしくは到着希望時刻を指定する事前予約の双方に対応し、希望の配車が見つからなかった場合に指定時刻に近い配車割当てを試みる配車再提案機能を有する。

本稿の構成は以下の通りである。2で配車手法の関連研究について紹介し、3で自動運転車の運行を見据えた配車の提案手法を示す。4で提案した配車手法を実装した運行管理システムを紹介し、5にて本システムを用いた実証実験・シミュレーション評価を述べる。最後に、6でまとめとする。

2. 関連研究

本節では、運行管理システムの根幹をなす配車手法の関連研究について述べる。複数の車両で複数の需要地を巡回する際に、全ての需要や制約を満たしつつその移動コストを最小化する経路を求める問題を Vehicle Routing Problem (VRP) と呼ぶ。VRP には制約や問題設定に応じた様々な派生があり、本研究のように人の輸送を前提としたものは Dial-A-Ride Problem (DARP) と呼ばれる [7]。DARP では一般的に、各人のデマンド (移動要求) として出発地 (Origin)、目的地 (Destination) や希望時刻の制約などを考慮する。

DARP を含む VRP は問題規模が大きくなると計算時間が爆発的に増える NP-hard の問題として知られており、その解法は最適解を求める方法 (exact solution) [8], [9] と準最適解を求める方法 (heuristic solution) [4], [5], [10], [11], [12] に分類される。前者は最適解を算出できることが保証されているが、問題が大きくなると計算時間が大幅に増える。一方、後者は最適解の算出は保証されていないものの計算時間は少ない。本研究で扱う運行管理システムでは、ユーザからの予約要求を受けた際に都度配車計算を行いその場で結果を返すため、レスポンス時間が重要であることから、後者の準最適解を求める方法を対象とすることとした。

DARP にて準最適解を得る手法は、すでに確定されている予約の順序は変えずに新規予約の挿入を試みる挿入法が

一般的である。[4], [10], [11] では、新規予約の出発地・目的地を挿入可能なペアの全ての組み合わせについて移動コストを計算し、最もコストの小さい配車・経路を決定する。挿入法は準最適解を得る手法であるものの、問題規模が大きくなると少なからず計算時間に影響がでるため、さらに計算を効率化するための派生型も存在する。[5] では、新しい予約を配分する車両を予約・車両の移動ベクトルに関する類似度を元に限定することで、計算時間の削減を行っている。[12] では、動的計画法に基づくアルゴリズムを導入することで、線形時間にて実行可能な計算量への削減を行っている。

本研究では、運行車両には将来的な需要が予想される自動運転車を想定する。無人化した自動運転車の運行では非サービス中のスケジューリングも必要となるが、上述の既存研究ではいずれも十分な考慮はされていない。本研究で提案する配車手法では、非サービス中の車両を予め定めた拠点にて待機させるものとし、拠点から出発し各デマンドの輸送を実現し拠点に帰着するまでの運行をトリップと呼び、トリップ単位に基づく配車計算を行う。また、予約形態としては、今すぐの配車を希望する即時予約と出発希望時刻もしくは到着希望時刻を指定する事前予約の双方に対応する。希望時刻が指定された予約処理の課題として、希望時刻を満たす配車が見つからなかった場合、ユーザは希望時刻をずらして再度配車検索を行う必要があることやそれに伴いサービス利用の機会損失を生む可能性があることが挙げられる。これに対し、本研究の配車手法では希望時刻を満たす配車が見つからなかった場合に、希望時刻に近い配車割当てを試みる配車再提案機能を有する。

3. 配車手法

3.1 自動運転車を利用したデマンド型交通の制約

運転手が運転を行うデマンド型交通では、デマンド間の非サービス中の時間帯は適宜路上待機や休憩場所へ戻るなど、運転手の判断に任せられており、そのスケジューリングを検討する必要がなかった。一方、自動運転車を利用するデマンド型交通では、将来的に車内は無人となるため非サービス中の時間帯のスケジューリングも考慮する必要がある。本配車手法では自動運転車に対応するため、非サービス中の車両は拠点にて待機するものとし、拠点からの出発、各デマンドの経由、拠点への帰着までの一連の運行をスケジューリングする。ただし、本配車手法は完全無人となる自動運転レベル 4 の前に、緊急時などに備え車掌が乗車するレベル 3 での利用に対応する。そのため、車両のメンテナンス・充電・燃料補給の時間に加え、車掌の休憩時間が配車における制約となる (本稿ではまとめて休憩時間と呼ぶ)。

3.2 基本方針

本配車手法は、新規デマンド(予約)が入るたびに配車計算を行うリアルタイム処理方式であり、ユーザは予約した時点で出発地の出発予定時刻、目的地への到着予定時刻を把握することができる。予約は、即時予約と事前予約の2種類を可能とする。双方とも出発地・目的地を指定するが、即時予約は時刻の指定をせず、事前予約は希望出発時刻または希望到着時刻の指定を行う。はじめに、あるデマンドの出発地を O (Origin)、目的地を D (Destination) とし、 t_O を出発地への車両到着時刻、 t_D を目的地への車両到着時刻とする。また、出発拠点を BS 、帰着拠点を BG とし、 t_{BS} を拠点を出発する時刻、 t_{BG} を拠点到着する時刻とする。本配車手法では、車両が時刻 t_{BS} に拠点を出発し、各デマンドの経由地 (O または D) を通り、時刻 t_{BG} に拠点到着するまでの一連の運行をトリップと呼ぶ。図1に示すように、トリップは一日の運行時間中に複数形成されるものとする。

とある配車が成立するにはユーザの要求やサービスに関する制約条件を全て満たなければならない。以下に、本配車手法で考慮する各制約条件を挙げる。

● デマンドの制約条件

図2にトリップの一例を示す。車両は t_{Omin} から t_{Omax} の間に乗車地 O に到着し、 t_{Omax} に乗車地 O を出発しなければならないとする。また、車両は t_{Dmin} から t_{Dmax} の間に降車地 D に到着しなければならないとする。ここで、 $T_W = t_{Omax} - t_{Omin}$ は出発地での待機可能時間、 $T_R = t_{Dmax} - t_{Dmin}$ はトリップへ追加挿入されるデマンドにより発生する遅延を吸収するための到着ゆとり時間と定義される。以上より、とあるデマンドの制約条件は乗車地と降車地それぞれ以下の式で表される。

$$t_{Omin} \leq t_O \leq t_{Omax} \quad (1)$$

$$t_{Dmin} \leq t_D \leq t_{Dmax} \quad (2)$$

● 乗車定員の制約条件

車両ごとに乗車定員は決まっているため、定員を超過した乗車を行うトリップを生成することはできない。また、相乗り拒否のリクエストが含まれたデマンドについては、デマンドの予約人数が定員未満であっても定員分の予約人数とみなして処理することで、相乗り拒否に対応する配車を実現する。

● トリップ時間に関する制約条件

あるトリップのトリップ時間帯 ($t_{BS} \sim t_{BG}$) は既存の他のトリップ時間帯や車両の運行時間外・休憩時間と重複してはならない。

● 拠点出発時刻に関する制約条件

トリップ生成時、拠点出発時刻 t_{BS} は予約確定想定時

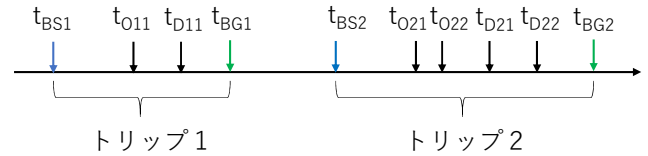


図1 トリップの概念



図2 デマンドの制約条件

刻(現在時刻 + 配車確定猶予時間)よりも後とならなければならない。この制約条件は時間通りに拠点を出発するために必要な条件である。

本配車手法は、すでに確定されている予約の順序は変えずに新規予約の挿入を試みる挿入法に基づく。全車両それぞれに対し、図3に示すフローチャートの処理を行い、各車両で最も遅延コストの小さい配車を計算する。その後、全車両の中で、最も遅延コストの小さい配車を最終的な配車として決定する。遅延コストは、新規デマンドが即時予約のとき、事前予約のときのそれぞれの場合で以下のように定めた。

新規デマンドが即時予約の場合

(新規デマンドの到着予定時刻-現在時刻)+(既存デマンドの到着予定時刻-出発予定時刻)の総和

新規デマンドが事前予約の場合

(新規デマンドの到着予定時刻-出発時刻)+(既存デマンドの到着予定時刻-出発予定時刻)の総和

3.3 車両ごとのトリップ生成処理

新規デマンドに対して車両ごとに候補となる配車(トリップ)の算出を行う、図3のフローチャート中の処理①、処理②について説明する。

処理①では、はじめに図2のように新規デマンド単体のトリップ形成を行う。 t_{BS} 、 t_O 、 t_D 、 t_{BG} は、指定された予約形態ごとに以下のように決定する。

即時予約の場合

車両が最短で拠点を出発可能な時刻を t_{BS} とし、 t_O 、 t_D 、 t_{BG} は各地点間の移動時間を t_{BS} に順に加算していくことで決定する。 t_{Omax} はこの時点の t_O とし、 t_{Dmin} はこの時点の t_D とする。

事前予約(希望出発時刻)の場合

希望出発時刻を t_O とし、時刻 t_O に乗車地 O に到着するための拠点出発時刻を t_{BS} とする。残りの t_D 、 t_{BG} は即時予約の場合と同様に、各地点間の移動時間を t_{BS} に順に加算していくことで決定する。 t_{Omax} はこの時点の t_O とし、 t_{Dmin} はこの時点の t_D とする。

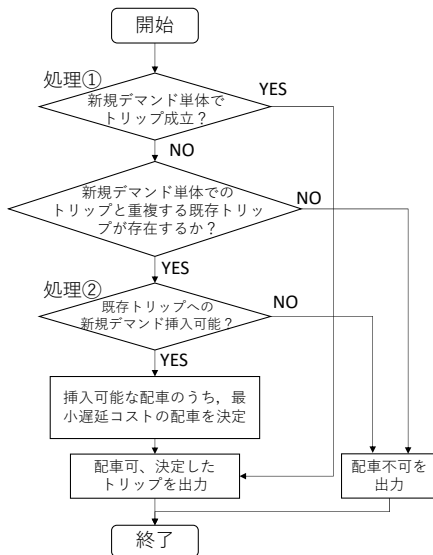


図 3 配車計算フローチャート

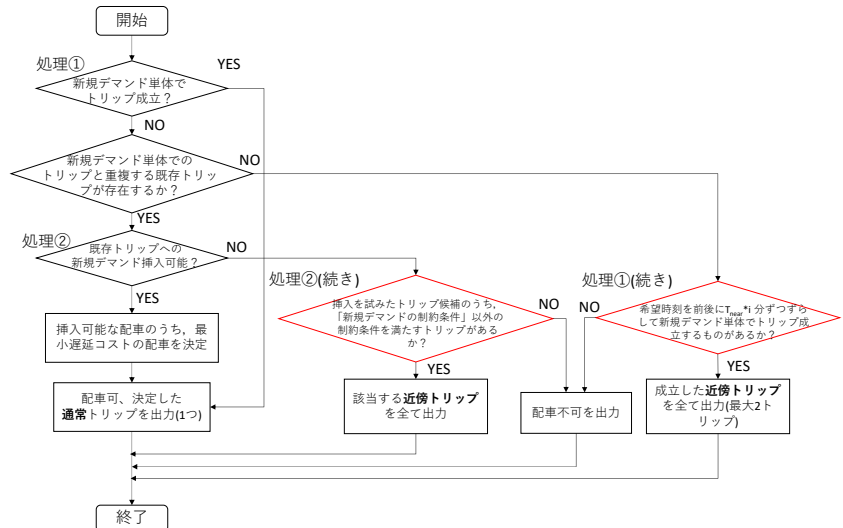


図 4 配車計算フローチャート (配車再提案含む)

事前予約 (希望到着時刻) の場合

希望到着時刻を t_{Dmax} とし, t_{Dmax} によって定まる t_{Dmin} の時刻を t_D とする. t_{BS} , t_O は各地点間の移動時間を t_D から順に減算していくことで, t_{BG} は D-BG 間の移動時間を t_D に加算することで決定する. t_{Omax} はこの時点の t_O とする.

このようにして各時刻を決定したトリップについて, 上述の制約条件をすべて満たす場合, 新規デマンド単体でのトリップが成立し, 制約条件を一つでも満たさなければ, 新規デマンド単体でのトリップは不成立となる.

処理②では, 処理①にて新規デマンド単体で形成したトリップと重複する既存トリップが存在する場合, その既存トリップへの新規デマンド挿入を試みる. 既存トリップ内に $N-1$ 個の既存デマンドがあり, 新たに N 番目の新規デマンド (ON $\rightarrow$ DN) を挿入する場合を考える. はじめに一般的な挿入法の考え方に則り, 新規デマンドの挿入場所が選択される. 例えば, 既存トリップに 1 つの既存デマンド (O1 $\rightarrow$ D1) があり, 新たに新規デマンド (O2 $\rightarrow$ D2) を挿入する場合には, $3! = 6$ 通りの挿入場所が存在する. 次に, 選択された挿入場所に新規デマンドを挿入した際の各時刻 t_{BS} , t_{Ok} , t_{Dk} , $t_{BG}(k = 1 \sim N)$ を, 直前の経由地の出発時刻に経由地間の移動時間を加算して算出する. ただし, 各経由地の出発時刻は, 出発拠点の場合 t_{BS} , 乗車地の場合 $t_{Omax}(t_O < t_{Omax})$, $t_O(t_{Omax} \leq t_O)$, 目的地の場合 t_D と定める. また, 新規デマンドの制約条件は以下のように設定する.

即時予約の場合

$$t_{ONmax} = t_{ON}, t_{DNmin} = t_{DN}$$

事前予約 (希望出発時刻) の場合

$$t_{ONmax} = \text{希望出発時刻}, t_{DNmin} = t_{DN}$$

事前予約 (希望到着時刻) の場合

$$t_{ONmax} = t_{ON}, t_{DNmax} = \text{希望到着時刻}$$

このようにして各時刻を決定したトリップについて, 上述の制約条件をすべて満たす場合, 既存トリップへの新規デマンド挿入可能と判定される. ただし, 出発拠点 (BS) と最初の経由地との間への新規デマンド挿入がある場合, 既存デマンドの制約条件は必ず非成立となるため, 拠点出発時刻 t_{BS} を一定時間早めて各時刻を再算出する処理が必要となる. 処理②では, 新規デマンドの挿入場所の組み合わせ毎にこの判定を行うため, 複数のトリップ候補が出力されることとなる.

3.4 配車再提案手法

希望時刻が指定された予約処理の課題として, 希望時刻を満たす配車が見つからなかった場合, ユーザは希望時刻をずらして再度配車検索を行う必要があることやそれに伴いサービス利用の機会損失を生む可能性があることが挙げられる. これに対し, 希望時刻を満たす配車が見つからなかった場合に, 希望時刻に近い配車割当てを試みる配車再提案を行う場合の配車計算フローチャートを図 4 に示す. ここでは, 希望時刻を満たすトリップ・デマンドをそれぞれ通常トリップ・通常デマンド, 希望時刻を満たさないが配車再提案にて成立したトリップ・デマンドをそれぞれ近傍トリップ・近傍デマンドと呼ぶ. はじめに, 処理①にて新規デマンド単体でトリップ形成が可能であるか判定する. 可能であると判定された場合, 算出した通常トリップを出力して終了する. 一方, 可能でないと判定された場合, 処理①にて新規デマンド単体で形成したトリップと重複する既存トリップが存在するか判定を行う. ここで重複する既存トリップが存在しない場合, 図 3 では配車不可を出力し

ていたが、図 4 では処理①(続き)を行い近傍トリップの出力を試みる。

処理①(続き)では、希望時刻を前後に $T_{near} \times i$ 分ずつシフトして処理①を再度実行し、新規デマンド単体でトリップ成立するものがあるか判定を行う。 i はあらかじめ設定した最大値 M まで、 $i = 1, 2, \dots, M$ と設定して検索を行う。例えば、 $T_{near} = 10$ 分、 $M = 2$ の場合、希望時刻を前に 10 分、20 分シフトし、後に 10 分、20 分シフトする。ただし、即時予約の場合は、拠点出発時刻に関する制約条件から後へのシフトのみ実行する。前後へのシフト毎に成立するトリップが見つかった時点で判定を終了する。

処理①(続き)にて成立するトリップが見つかった場合、希望時刻の前後へのシフト毎に近傍トリップとして出力する。前後へのシフト毎に出力するため、最大 2 トリップが出力されることとなる。処理①(続き)にて成立するトリップが見つからなかった場合、該当車両では配車不可を出力する。

処理②にて既存トリップへの新規デマンド挿入が可能であった場合、挿入可能なトリップ(配車)のうち最小遅延コストのトリップを決定し通常トリップとして出力して終了する。一方、処理②にて既存トリップへの新規デマンド挿入が不可能であった場合には、処理②(続き)を行い近傍トリップの出力を試みる。処理②(続き)では、処理②にて挿入を試みたトリップ候補のうち、「新規デマンドの制約条件」以外の全ての制約条件を満たすトリップがあるか判定する。条件を満たすトリップが見つかった場合、該当する全トリップを近傍トリップとして出力する。条件を満たすトリップが一つも見つからなかった場合、該当車両では配車不可を出力する。

以上のように、図 4 では処理①(続き)および処理②(続き)にて希望時刻に近い近傍トリップを出力することで、希望時刻を満たす配車が見つからなかった際の配車再提案を実現している。

4. 運行管理システム

本節では、提案した配車手法を元に開発した自動運転車向けデマンド型交通運行管理システムを紹介する。図 5 にシステム構成を示す。本システムでは、高齢者を主な対象ユーザとするため、予約方法として敷居の低い電話予約を基本とする。電話受付オペレータはユーザからの配車依頼を受け付けると、予約受付 WEB システムを用いて配車予約の処理を行う。運行管理サーバでは配車予約要求を受けると、3 の配車手法や複数のユーザニーズに配慮した予約状態管理 [13] に基づいて要求の処理を行う。一方、自動運転車内では車両オペレータが車掌アプリを用いて、予約情報やルート情報の確認を行うとともに、ユーザの乗降車登録や自動運転車へ走行指示を行うための経路登録を行う。以下、本システムの構成機能のうち予約受付・管制 WEB

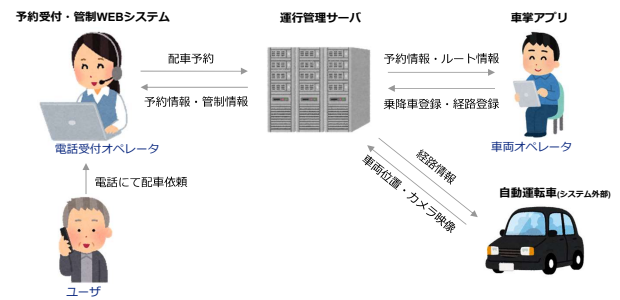


図 5 運行管理システム構成

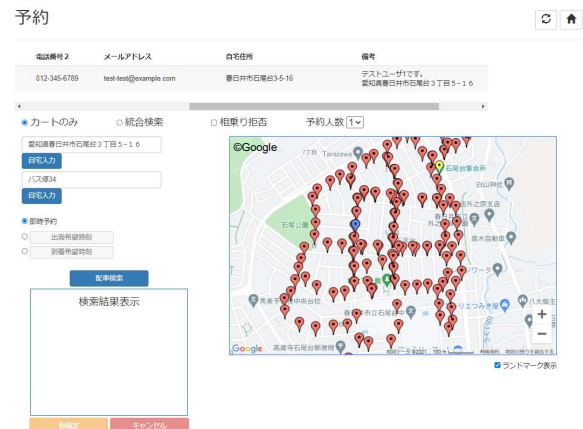


図 6 予約受付 WEB システム画面例

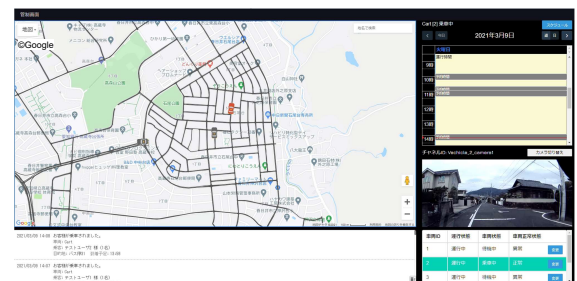


図 7 管制 WEB システム画面例

システム、車掌アプリについてそれぞれ説明する。

4.1 予約受付・管制 WEB システム

予約受付 WEB システムでは、ユーザ登録を行った後、図 6 に示す予約画面にて出発地、目的地、予約形態、相乗り拒否、予約人数などを入力し配車検索を行う。運行管理サーバから配車結果が返されると、その配車の予約仮確定、予約確定を画面上で行い配車を確定する。また、必要な場合予約キャンセルを実行する。各予約状態は画面上で一覧にて確認でき、車掌アプリと連動し乗車中や降車済みなどの情報を表示する。

管制 WEB システムは車両の運行状況を確認するためのものであり、図 7 に示す管制画面にて全車両の現在位置、予約スケジュール、カメラ映像、車両状態などを確認で



図 8 車掌アプリ画面例

きる。

4.2 車掌アプリ

車掌アプリのトップ画面を図 8 に示す。画面左側の地図上には、現在の車両位置、運行中のトリップに含まれるデマンドの乗降位置、トリップ経路、次の経由地までの経路などが表示されている。画面右側には運行中のトリップに含まれるデマンドタグを表示する。デマンドタグ中にはデマンド情報とともに、実車・降車ボタンを設け、乗客が乗降車した際にこれらのボタンを押下することで実績を運行管理サーバへ登録する。画面右下には、車両正常状態を切り替える異常ボタンと自動運転車へ次の経由地までの経路を登録する経路登録ボタンを備える。

5. 評価

5.1 実証実験

4 の運行管理システムを用い、2021 年 6 月 21 日～8 月 27 日 (うち運行日は 42 日) の期間、愛知県春日井市石尾台地区にて一般住民を対象とした実証実験を行った。名古屋大学の開発した自動運転車両 (ゆっくりカート) 1 台と連携し、午前 9 時から午後 4 時 (正午～午後 1 時を除く) の運行時間、利用料金は無料にて地区内の住民の試乗を受け付けた。

実証実験中、成立した予約は 114 件、平均予約人数は 1.23 人/件、予約形態は即時予約 14 %、出発希望時刻指定 84%、到着希望時刻指定 2% となった。乗降地のどちらかに地元のスーパーが選択された予約は全体の 68% であり、自宅から買い物に出かける目的で利用するユーザが大半を占めた。

5.2 配車手法

3 の配車手法をシミュレーション評価するため、実証実験で収集したデータを元に 1 日分の疑似予約データの作成を行った。疑似予約データの出発地・目的地は、実験データで実際に運行された予約の出発地・目的地の選択確率 (1 時間毎) を元に、ランダムに決定した。予約人数は全て 1 人、相乗りは全て許容、予約形態は実験データでは 84 % が出発希望時刻指定であったことから疑似予約データでは

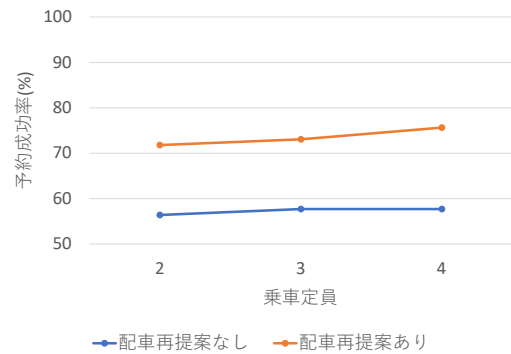


図 9 予約成功率 (車両台数 4 台)

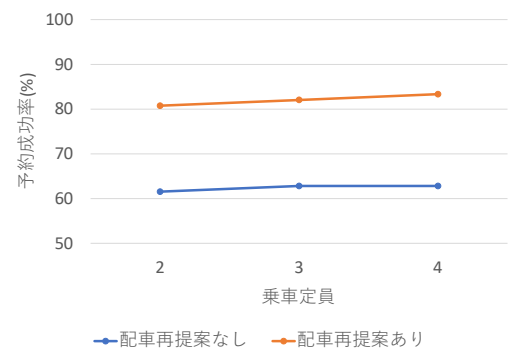


図 10 予約成功率 (車両台数 5 台)

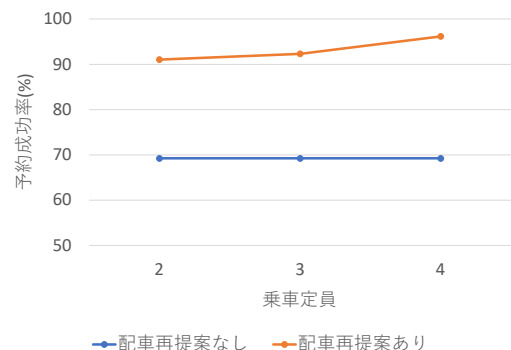


図 11 予約成功率 (車両台数 6 台)

全て出発希望時刻指定とした。1 日の予約数については、名古屋大学にて石尾台地区住民約 4,600 人を対象に事前に実施したアンケートに基づき、「地区内移動サービス」の潜在的利用者数を約 195 人と仮定し、各々週 (平日) に 2 回利用する想定で 78 人と設定した。出発希望時刻は、1 時間の粒度で実験データの分布と等しくなるようランダムに決定し、予約作成時刻は出発希望時刻の 1～4 時間前の範囲でランダムに定めた。配車手法の各パラメータは、 $T_W = 15$ 分、 $T_R = 15$ 分、 $T_{near} = 10$ 分、 $M = 6$ と設定した。

車両台数が 4～6 台のときの乗車定員 (2～4 人) と予約成功率の関係を図 9～11 に示す。全体として車両台数・乗車定員が増えるほど予約成功率が向上したものの、乗車定

員の増加による効果は比較的小さくなった。これは、予約失敗の原因の多くは乗車定員の制約条件を満たさなかったことではなく、デマンドの制約条件やトリップ時間に関する制約条件など、時刻の制約を満たさなかったことであったためと考えられる。また、全車両条件において3.4の配車再提案機能がある場合の方が無い場合に比べて予約成功率が向上した(平均19.9%)。なお、評価では配車再提案時に複数の近傍トリップが出力された際は最も遅延コストの小さいトリップを採用した。配車再提案機能を導入することにより、失敗していた予約の58.1%を予約成功させることができた。一方で、成功していた予約の一部は逆に予約失敗となったが、その割合は2.5%と予約成功したものと比べ少なく、全体の予約成功率向上に至った。配車再提案あり・全車両条件において、成功した予約のうち近傍デマンドの割合は45.0%であり、出力された近傍デマンドの出発予定時刻と指定した出発希望時刻との平均差は20.8分であった。

6. おわりに

本稿では、自動運転車を用いたデマンド型交通のための配車手法を提案し、本手法を取り入れた運行管理システムを紹介した。配車手法の評価として、実証実験の実績を元に作成した疑似予約データにてシミュレーションを実施し、配車再提案機能により予約成功率が平均19.9%向上することを示した。今後、ユーザの受容により適したシステムの実装に取り組んでいく。

謝辞 本研究に多大なご協力を頂いた名古屋大学 未来社会創造機構 金森特任准教授をはじめ、名古屋大学 COI での実証実験関係者の皆様に深く感謝する。

参考文献

- [1] 大島登志彦: 地方都市域の路線バスの変遷に内在する制度や諸課題の考察——群馬県内の事例でみる諸問題——, 高崎経済大学論集, Vol. 62, No. 3・4, pp. 159–179 (2020).
- [2] 坂井佑理, 瀧瀬和樹, 浅野泰仁, 吉川正俊: 寄り道型デマンドバス路線のルート設計に関する手法の検討, 第10回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム, 日本データベース学会 (2018).
- [3] 坂井佑理, 浅野泰仁: スター型デマンド分布に対する寄り道型デマンドバスの活用手法の提案, 第11回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム, 日本データベース学会 (2019).
- [4] 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: Smart Access Vehicle System: 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).
- [5] 大和裕幸, 坪内孝太, 稗方和夫: オンデマンドバスのためのリアルタイムスケジューリングアルゴリズムとシミュレーションによるその評価, 運輸政策研究, Vol. 10, No. 4, pp. 002–010 (2008).
- [6] 国土交通省中部運輸局: 続・デマンド型交通の手引き, 国土交通省中部運輸局 (オンライン), 入手先 (<https://www.tb.mlit.go.jp/hokkaido/content/000174198.pdf>) (参照 2021-10-26).
- [7] Larsen, A.: The dynamic vehicle routing problem, PhD Thesis, Institute of Mathematical Modelling, Technical University of Denmark (2000).
- [8] Contardo, C. and Martinelli, R.: A new exact algorithm for the multi-depot vehicle routing problem under capacity and route length constraints, *Discrete Optimization*, Vol. 12, pp. 129–146 (2014).
- [9] Pessoa, A., Sadykov, R., Uchoa, E. and Vanderbeck, F.: A generic exact solver for vehicle routing and related problems, *Mathematical Programming*, Vol. 183, No. 1, pp. 483–523 (2020).
- [10] Bischoff, J., Maciejewski, M. and Nagel, K.: City-wide shared taxis: A simulation study in Berlin, *2017 IEEE 20th international conference on intelligent transportation systems (ITSC)*, IEEE, pp. 275–280 (2017).
- [11] Huang, Y., Jin, R., Bastani, F. and Wang, X. S.: Large scale real-time ridesharing with service guarantee on road networks, *arXiv preprint arXiv:1302.6666* (2013).
- [12] Tong, Y., Zeng, Y., Zhou, Z., Chen, L., Ye, J. and Xu, K.: A unified approach to route planning for shared mobility, *Proceedings of the VLDB Endowment*, Vol. 11, No. 11, p. 1633 (2018).
- [13] 恋塚葵, 大岸智彦: 複数のユーザニーズに配慮したデマンド型交通向け予約状態管理手法, ソサイエティ大会, 電子情報通信学会 (2021).