

スマートシティのための電気自動車利用スケジューリング

代表研究者	柴田 直樹	奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 准教授
共同研究者	川井 明	滋賀大学 准教授
共同研究者	上田 知幸	奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科

1 序論

近年、地球温暖化の原因の一つとして、自動車による温室効果ガスの排出が問題となっており、その対策が電気自動車（EV）である。EV は環境負荷が少ない、ガソリン車と比較してエネルギー効率が高い、電力貯蔵装置として利用可能といった長所がある。一方で、EV にはガソリン車と比較して航続可能距離が短い、充電時間が長いという欠点がある。平成 25 年におけるハイブリッド自動車の保有台数が約 300 万台であるのに対し、EV の保有台数は約 6 万台であり、EV が普及に至っていないことがわかる。一方、平成 25 年における国内の車両保有台数は 800 万台まで増加し、さらに人口の都市部集中が原因で渋滞や駐車場不足が大きな問題となっている。このような問題に対して、登録を行った会員間で特定の自動車を共同利用するカーシェアリングが注目され、車両保有台数削減や環境負荷低減などの効果が期待されている。

カーシェアリングに関する既存研究のほとんどは、共同利用する車両は EV ではなくガソリン車が想定されている。本研究では EV と片道カーシェアリングの仕組みを組み合わせ、複数のユーザが目的地に停車している EV を共同利用する環境において、EV を効率的に運用するシステム EVTour を提案する。EVTour において、ユーザは任意の目的地における車両の利用返却が可能である。このように、片道カーシェアリングの仕組みを取り入れることで、ユーザは残り電力量の少ない EV を乗り換えて移動を継続でき、EV の短い航続可能距離や長い充電時間といった欠点を補うことが可能となる。提案手法は二つの算出部から構成され、ユーザスケジュール算出部ではユーザの予約内容（希望目的地や時間制約など）を満たす巡回経路及び乗車する EV 情報、充電場所をスケジュールを算出しユーザに提示する。本研究の目的は複数のユーザからの予約申請に対して、予約受率を最大化することである。しかし、片道カーシェアリングを想定しているため、EV の分布が予約受率を左右する重要な要因となる。従って、再配置スケジュール算出部では目的地に停車中の EV 台数に基づき、予約可能な EV に余裕のある目的地から不足している目的地へ EV を配車を決定し、車両分布を修正する。EVTour の有効性を確認するためシミュレータを実装し、評価実験を行った。実験の結果、700 人のユーザに対して EV340 台で 80 % 程度の予約受率を達成した。また、従来手法と比較し提案手法は少ない配車回数で高い予約受率を達成することを確認した。予約受率は最大約 9 % 程度、配車回数は最大 15 % 程度の改善を確認した。

2 問題設定・システム使用イメージ

2-1 想定環境

本研究は複数のユーザが各目的地に配置された EV を共同利用し、それぞれ希望する目的地を訪問・滞在し移動を終了する環境を想定する。ユーザは各目的地に設置されたシステムの予約用端末、またはユーザ自身の携帯端末を利用してシステムの予約を申請する。ユーザの入力は全てサーバに集められ、サーバがユーザの希望を満たす巡回経路や各目的地における行動（充電や乗換）を含むスケジュールを算出し、ユーザに提示する。また、サーバは EV の分布が偏らないよう EV の再配置スケジュールを算出する。このような想定環境に対し、以下のように仮定を置く。

2-2 仮定

カーシェアリングに対する仮定：ユーザは目的地に配置された EV を共同利用する。片道カーシェアリングを仮定し、ユーザは EV を借りた目的地に EV を返却する必要はなく、任意の目的地へ返却が可能である。また、ユーザは目的地において、残り電力量の少なくなった EV を乗り換えて移動を継続できる。

目的地に対する仮定：EV を配置する目的地としてコンビニ、ショッピングモール、駅等を想定する。それぞれの目的地には EV を配置する駐車場、EV 充電用のブース、予約用端末、スタッフ専用の管理端末を

設置している。

ユーザに対する仮定：ユーザには、前日までにあらかじめ予約を完了するユーザ（以下 事前予約ユーザ）と、当日 EV を利用する目的地を訪れ、予約を行うユーザ（以下 現地予約ユーザ）がいる。事前予約ユーザは自身の携帯端末から予約用のアプリケーションを利用して予約を行う。一方、現地予約ユーザは目的地に設置された予約用端末を利用して予約を行う。予約時、ユーザは出発・帰着目的地、希望目的地、目的地の重要度、滞在時間、時間制約などの情報を入力する。

EV に対する仮定：想定する環境における車両は全て同モデルの EV とする。

スタッフに対する仮定：スタッフは各目的地に待機し、スタッフ専用端末で指示された EV の配車を実行する。

2-3 ユーザ視点の使用イメージ

事前予約ユーザと現地予約ユーザそれぞれの行動について、予約から移動終了までの流れに沿って説明する。

事前予約ユーザの行動：事前予約ユーザは携帯端末の予約用のアプリケーションを利用して、前日までに希望目的地などの必要な情報を入力し予約を行う。ユーザの入力はサーバに送信され、直後にユーザはサーバから携帯端末に予約の結果（受理または破棄）を受け取る。もし予約が受理されていた場合は希望目的地の巡回経路も一緒に受け取る。当日の出発時刻になると、ユーザはサーバから最初に乗車する EV の情報を受け取り、指定された EV に乗車後、巡回経路に従い移動を開始する。その後、共通する行動に示す行動をとる。予約を破棄されたユーザは予約を諦める。

現地予約ユーザの行動：現地予約ユーザは移動当日の出発地到着直後、出発地に設置された予約用端末を利用し必要な情報を入力後、予約を行う。事前予約ユーザ同様、ユーザの入力はサーバに送信され、直後にユーザはサーバから携帯端末に予約の結果を受け取る。もし予約が受理されていた場合は巡回経路と最初に乗車する EV の情報を受け取る。ユーザは指定された EV に乗車後、巡回経路に従い移動を開始する。その後、共通する行動に示す行動をとる。予約を破棄されたユーザは予約を諦める。

ユーザの共通する行動：ユーザは目的地到着後、用事を済ませ次の目的地へ移動する。目的地に到着した際、乗車してきた EV に充電が必要な場合は、サーバからユーザの携帯端末に充電を指示される。ユーザは目的地に設置された充電ブースで充電を開始してから用事に移る。用事後、次の目的地へ出発するユーザは各自の携帯端末で乗車する EV を確認して移動する。このとき、ユーザは乗車してきた EV へ再度乗車指示される場合と、別の EV へ乗り換えを指示される場合がある。また、次に目指す目的地がないユーザは移動を終了する。ただし出発する際、乗車する EV が確保できない場合、乗車可能な EV が到着するまで待機の指示を受ける。

スタッフの行動：各目的地に待機しているスタッフは、目的地に設置された管理端末を通じてサーバから指示された EV の配車を実行する。に沿って、スタッフが配車する手順について説明する。各目的地で待機しているスタッフは、サーバからの配車指示を目的地に設置された管理端末を通じて確認する。スタッフはサーバに指定された EV に乗車後、指定された配車先の目的地へ移動する。目的地到着後、管理端末を通じて充電を指示された場合は、充電を開始して配車を完了する。

2-4 サーバの動作イメージ

想定環境において事業者はサーバを設置し、ユーザの情報、EV の位置や残り電力量、充電ブースの状態を管理する。サーバの役割は二つあり、一つ目はユーザの希望を満たすスケジュールを算出・提示することである。二つ目は EV の分布の修正するスケジュールを算出し、配車を実行するスタッフにスケジュールを提示することである。ここでは、サーバがユーザとスタッフに対してスケジュールを提示する方法について説明する。

ユーザとスタッフに対するスケジュール提示方法：サーバはユーザ入力を受け取り、ユーザの希望目的地において EV や充電ブースを確保できるか判定し、巡回経路と各目的地における行動（EV の充電、乗換）を含むスケジュールを計算する。ここでは、サーバがユーザに対してどのような手順でスケジュールを提示するか説明する。まず、事前予約ユーザ、現地予約ユーザに対する、予約から出発までのスケジュール提示手順、及び配車を実行するスタッフに対するスケジュール提示手順について説明する。

事前予約ユーザ出発までのスケジュール提示手順：サーバは事前予約ユーザの予約を受け取ると、ユーザの希望を満たすスケジュールを算出する。スケジュールを算出できれば、ユーザの携帯端末に予約受理の結

果と目的地の巡回経路を送信する。予約が受理されたユーザが出発地に到着すると、サーバはユーザの携帯端末に乗車する EV 情報を送信する。事前予約ユーザ出発後は、ユーザの出発から移動終了までのスケジュール提示手順に示す手順でスケジュールを提示する。

現地予約ユーザ出発までのスケジュール提示手順：サーバは現地予約ユーザの予約を受け取ると、ユーザの希望を満たすスケジュールを算出する。スケジュールを算出できれば、ユーザの予約用端末とユーザの携帯端末に予約受理の結果と目的地の巡回経路、最初に乗車する EV 情報を送信する。現地予約ユーザ出発後は、ユーザの出発から移動終了までのスケジュール提示手順に示す手順でスケジュールを提示する。

スタッフに対するスケジュール提示方法：サーバがユーザの予約を受理すると予約可能な EV 台数が変化する。サーバはユーザの予約を受理し、乗車する EV を指示した直後、目的地毎の予約可能な EV 台数を確認する。このとき、サーバが配車が必要であると判断した場合、配車する EV が停車しているスタッフに対して配車を指示する。続いて、ユーザの出発から移動終了までのスケジュール提示方法と、渋滞などの影響で EV の到着が遅れた場合のスケジュール提示方法に分けて説明する。ユーザの出発後は、事前予約ユーザと現地予約ユーザは区別しない。

ユーザの出発から移動終了までのスケジュール提示手順：ユーザが目的地に到着すると、サーバはユーザが乗車していた EV の残り電力量を確認する。EV の充電が必要な場合、サーバはユーザの携帯端末に対して充電を指示する。さらにサーバはユーザの出発時刻に合わせて、ユーザの携帯端末に次に乗車する EV 情報を送信する。ただし、ユーザの出発時刻になっても、EV を確保できない場合、サーバは想定外の問題が発生した場合のスケジュール提示手順に示す手順に従いスケジュールを提示する。

想定外の問題が発生した場合のスケジュール提示手順：当初ユーザに割り当てるはずであった EV が渋滞などの影響で目的地に到着していないという状況が考えられる。このとき、サーバはユーザに別の EV を割り当てるために、スケジュールの再算出を試みる。スケジュールが算出できればユーザへ乗車 EV 情報を送信する。しかし、スケジュールが算出できない場合、当初割り当てられていた EV の到着、または別の EV が配車されるまで待機を指示しなければならない。このように、ユーザの予約受理時点の予定通りにスケジュールが進むとは限らないため、サーバはユーザのスケジュールを随時変更する。サーバが柔軟にスケジュールを変更できるよう、ユーザの予約受理段階では予約の結果と巡回経路のみを提示し、ユーザが乗車する EV や乗換、充電といったスケジュールの詳細を提示しない。

3 提案システム

3-1 概要

EVTour ではユーザスケジュール算出部と再配置スケジュール算出部を実装している。ユーザスケジュール算出部では遺伝的アルゴリズムを利用し、ユーザの予約内容を満たす巡回経路、乗車する EV、充電場所を含むスケジュールを算出し提示する。再配置スケジュール算出部では、各目的地で利用できる EV 台数に従って、他の目的地から EV の配車を必要とする目的地（以下 需要目的地）と他の目的地へ EV を供給可能な目的地（以下 供給可能目的地）を決定し、配車を実行する時刻、どの需要目的地へ、どの供給可能目的地から配車するか決定する。再配置スケジュール算出部のアルゴリズムには、焼きなまし法に基づいた手法を提案する。

3-2 ユーザスケジュール算出部

ユーザスケジュール算出部での目的は、ユーザが乗車する EV を確保し、ユーザの希望する時間帯に目的地へ到着できるよう、目的地を巡回する順序を決定することである。これは、巡回セールスマン問題（TSP）を本問題に帰着できるため NP 困難な問題であり、現実的な時間で最適解を求めることは困難である。そこで、提案手法では実用的な時間で計算を行うために遺伝的アルゴリズム（GA: Genetic Algorithm）を利用する。遺伝的アルゴリズムは、探索空間の集団内に複数の近似解を持っているため、解探索を一定時間で打ち切っても解候補が得られるため、実用的な時間に合わせた探索が可能になる。

3-3 再配置スケジュール算出部

再配置スケジュール算出部では、偏った EV の分布による予約受理率低下を防ぐため、どの目的地からどの目的地へ EV を配車するかを指定したスケジュールを算出する。提案手法では、供給可能目的地と需要目的地を決定後、二段階の再配置アルゴリズムに従い配車を実行する。一段階目は、需要目的地の隣接目的地を調べ、供給可能目的地が隣接していれば配車を実行する。隣接目的地から EV を配車することで、できる

だけ短い時間で余裕度の小さい目的地をなくす狙いである。二段階目では、供給可能目的地と需要目的地から EV のバラつきが小さくなるような組み合わせを探索し配車を実行する。供給可能目的地と需要目的地が複数ある場合、目的地数の増加に伴い階乗のオーダーでこれらの組み合わせは指数的に増加する。提案手法では、実用的な時間で適切な組み合わせを探索するため焼きなまし法（SA：Simulated Annealing：）を利用する。焼きなまし法を用いた手法では、一つの目的地に集中した EV を別の目的地へ配車することで、EV のバラつきを小さくすることが狙いである。

4 評価実験

一定数の事前予約ユーザを発生させた後、8：00 - 18：00 まで現地予約ユーザをランダムな目的地に発生させシミュレーションを行う。各目的地には 5 台ずつの EV を配置した（総 EV 台数：340）。地図データは日本道路交通情報センター（JARTIC）が公開している東京都心部の地図を利用した。JARTIC の地図データの交差点をノード、交差点を結ぶ道路をリンクとしたグラフで表現し利用する。道路網には JARTIC より取得した渋滞情報を反映させた。

提案手法と比較を行う手法を二つ用意した。Do-Nothing (DN)：配車を実行しない方法。Max-Allowance (MA)：従来手法 [1]。供給可能目的地の中で余裕度が最大の目的地から、需要目的地の中で余裕度が最小の目的地へ配車する方法。

ユーザ数を 500 人から 700 人と変化させたときの予約受率率の変化を調べた（図 1）。提案手法は DN 法、従来手法と比較して常に高い予約受率率を達成している。DN と比較して最大 9 % 程度、MA と比較して最大 4 % 程度予約受率率が向上することが確認できた。

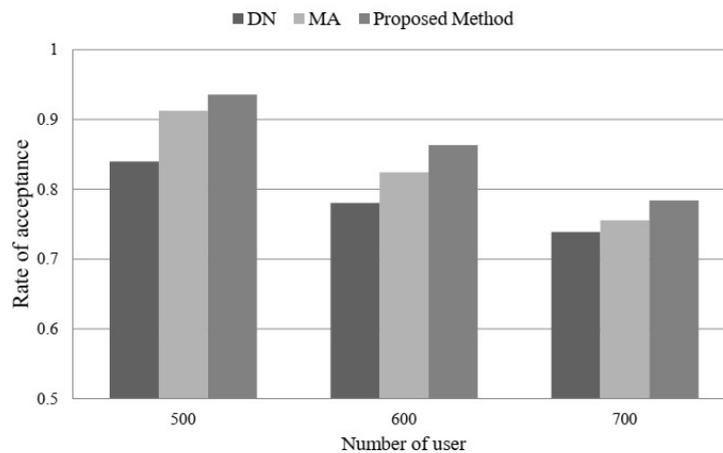


図 1 ユーザ数と予約受率率

予約受率率同様、ユーザ数を 500 人から 700 人と変化させたときの EV 一台あたりの配車回数の変化を調べた（図 2）。提案手法は MA 法と比較して最大 15 % 程度少ない配車回数で高い予約受率率を達成している。また、ユーザ数増加に対して配車回数の増加が少ない。これは、MA 法が常に余裕度の高い目的地から、余裕度の低い目的地へ配車するのに対し、提案手法では需要目的地への配車を隣接目的地に限定している点、全目的地における EV の分布を修正するために必要な配車を実行しているためであると考えられる。

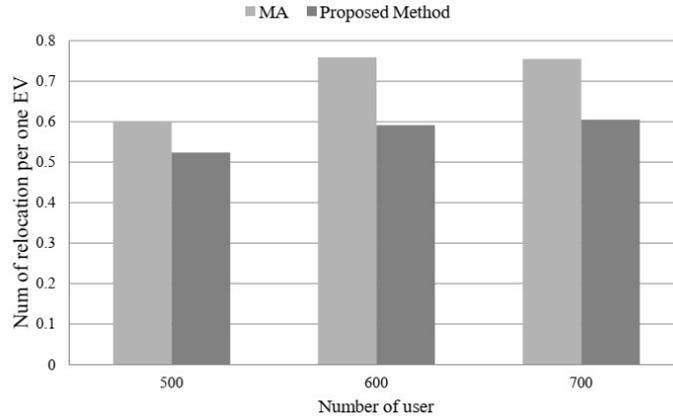


図2 ユーザ数とEV一台あたりの配車回数

提案システムがどの程度渋滞の影響を受けるか評価するため、渋滞が発生する道路網で配車を実行しない場合と、提案手法を適用した場合の予約破棄率を比較する。ここでは、JARTICより取得した二日分の渋滞情報を利用した。図3はユーザ数700人に対してシミュレーションを行った場合の予約破棄率を示している。配車を実行しない場合、予約破棄率は12%程度であるのに対し、提案手法では3%程度に抑えられており配車の効果が顕著に表れている。これは渋滞で遅れたユーザが、別のユーザに影響を与えないような状況を提案システムが作り出しており、渋滞に対する頑健性があると言える。

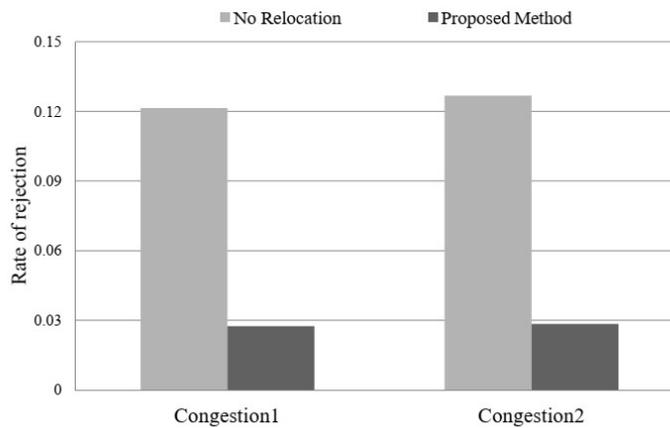


図3 予約破棄率

以上、提案システムを予約受理率、配車回数、予約破棄率という項目についてシミュレーションによる評価を行った。その結果、提案手法は比較手法よりも少ない配車回数で高い予約受理率を達成していることを確認した。実験結果から、提案システムの効率性について考察する。提案手法は700人のユーザに対し、340台(目的地数68, EV5台/目的地)のEVで78%程度の予約受理率を達成している。これは一台のEVあたり1:6人程度のユーザを乗車させていることになる。仮に受理された予約と同数のユーザがそれぞれ自家用車を所有した場合と比較すると、提案システムはより少ない車両数で効率的にユーザの予約を満たしていると言える。また、提案システムは片道カーシェアリングを取り入れることで、表5に示したように、ユーザはEVの充電終了を待たず、別のEVへ乗り換えて移動を継続できる。これらの結果から、提案システムはEVの短い航続可能距離や長い充電時間という欠点を補いながら効率的にEVを運用できていると言える。一方で、提案システムのユーザは出発地でEVを確保できることを保証されていないため、時間制約の強い出勤などの用途ではなく、比較的時間に余裕がある用途(観光や買い物など)を想定したユーザが向いていると考える。

EVTourの改善点として、パークアンドライド導入による公共交通機関との連携が考えられる。ユーザの移

動手段が増えることで、ユーザによる EV の占有時間が減少し、予約受理率の向上だけでなく、EV 台数やスタッフ、配車回数の削減が期待できる。

また、EVTour 運用コストを考慮していく必要がある。既に述べたようにパークアンドライドを導入する場合、EVTour の利用料金と別に公共交通機関の賃金が発生する。一般的にユーザは利用料金が増えることは望ましくない。そこでユーザスケジュール算出部における満足度に利用料金を導入し、利用料金も考慮した満足度を最適化する必要がある。一方で運用コストを考慮した場合、EVTour 事業者がユーザへ利用料金の割引を提案し、その引き換えにユーザが EV の配車を実行するという仕組みも考えられる。このような仕組みを導入することで、スタッフによる配車回数の削減が期待できる。

5 結論

本稿では、EV と片道カーシェアリングを組み合わせて、複数のユーザが EV を共同利用する環境で、EV を効率的に運用するシステム EVTour を提案した。今後はより少ないスタッフ、配車回数でシステムを運用する工夫が必要である。例えば、パークアンドライドによる公共交通機関との連携が考えられる。パークアンドライド導入によりユーザによる EV の占有時間が減少し、予約受理率の向上だけでなく、スタッフや配車回数の削減も期待できる。一方で、ユーザは公共交通機関を利用するための料金を払う必要があるが、支払う料金が増えることは一般的に望ましくない。したがって、パークアンドライドを導入する場合、ユーザが支払う料金を考慮し、公共交通機関を利用するユーザに割引を適用するなどの工夫が必要である。

【参考文献】

- [1] A. Kek, R. Cheu, and M. Chor, “Relocation simulation model for multiprestation shared-use vehicle systems,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1986, pp. 81–88, 2006.

〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
EVTour: Online Scheduling System for Tours with Multiple Destinations by One-Way EV Sharing	2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)	Sept. 2016
EVTour : 電気自動車の乗換スケジュールリング法の提案と性能評価	情報処理学会論文誌	2017年2月

徒歩移動を含むオンデマンドバスルートスケジューリング

代表研究者	柴田 直樹	奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 准教授
共同研究者	南 和宏	統計数理研究所 准教授
共同研究者	政野 博紀	奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科

1 序論

地方都市の過疎地域では、バスなどの不採算路線が廃止され、ますます公共交通が衰退していく現状にある。地方自治体が住民の移動手段確保のために運行するコミュニティバスも財政負担を招き、その維持が困難になりつつある。これに対し、より効率的なバスの運行形態としてデマンドバスが注目されている。デマンドバスは、定時的な固定ダイヤを持たず、乗客の需要に合わせて動的にダイヤや経路を設計する、より柔軟なバス運行形態である。従来の路線バスやコミュニティバスよりも運行地域を面的に網羅することができるため、交通空白地域の解消を目的にデマンドバスを導入する自治体があるが、依然として運行コストの多くを自治体の財政支出に依存する現状である。このような地域では元々公共交通の利用率が低く、またデマンドバスは通常の固定路線のバスよりも迂回が多くなる。そのため、乗客 1 人あたりの運行コストが大きくなることが考えられ、スケジューリングの効率化が求められる。

従来自治体で実用化されていたデマンドバスの多くがオペレータによる予約の受付と経路設計であったが、近年はコンピュータを用いて自動で予約と経路設計を行うシステムの研究が行われている。デマンドバスの経路設計問題は Dial-A-Ride Problem (DARP) [1]として定式化され、タイムウィンドウを用いて経路設計を行うアルゴリズム、Advanced Dial-A-Ride with Time Windows (ADARTW) が Jaw らにより提案されている [2]。この ADARTW に類似する手法を用いて経路設計を行うデマンドバスシステムの研究および実証実験が行われ、デマンドバスがコンピュータの制御により運行可能であることが実証されている [3][4]。さらに、デマンドバスの効率化についても研究が行われており、デマンドバス同士で乗り換えを行うものや、デマンドバスを中型バスに集約するもの、乗客をクラスタリングし複数の乗降車地点を 1 つにまとめ徒歩移動を案内するものなどがある。

これらの効率化の研究では、需要や車両のリソースがある程度見込める中規模都市以上が想定されており、需要が類似する複数ユーザのグループを形成できることが前提であるが、低需要な場合や車両台数が少ない場合はデマンドバスの効率化手法の有用性が低いことが報告されている。またこれらのクラスタリング手法では、複数ユーザとまとめるために一定時刻までデマンドを蓄積し、デマンドバスの経路設計を行うバッチ処理型を採用している。

本研究では、ユーザの徒歩移動を含むデマンドバスのスケジューリングを、リアルタイム処理型で行うことを提案する。本提案手法は、システムが提案したバスの迂回が少なくなる地点でユーザは乗降車し、ユーザの出発地・目的地と乗降車地点間は徒歩移動を行う。これにより、バスの細街路への迂回を削減するだけでなく、ユーザの待ち時間の有効活用、乗降車が困難である地点の考慮が可能であると考えられる。本手法はクラスタリングが前提ではなく、トリップが類似するユーザ同士のグループが形成できない場合でも徒歩移動を案内するため、需要が少ない小規模都市を前提とした場合でもある程度のデマンドバスの効率化が可能であると考えられる。また、予約を必要とせずユーザのデマンドがある度にスケジューリングを行うリアルタイム型の処理が可能である。徒歩移動を含むデマンドバスの問題点として、ドアツードアのデマンドバスよりも旅行時間が増大する問題点も存在するが、本手法ではユーザの時間制約と乗合状況に合わせて降車後の徒歩移動の距離を動的に変動させることで、ユーザの旅行時間を調整する手法を取り入れる。

評価実験では小規模都市を想定し、人口 10 万人以下の異なる村落形態を持つ 3 か所の地図を OpenStreetMap から取得のうえ、マイクロ交通流シミュレータ SUMO によってバスと徒歩移動の動きを再現してシミュレートする。バス事業者の支出および運賃収入は政府データをもとに算出し、バス事業者の採算性、クエリ棄却率、バスの走行距離および時間、平均乗車人数およびユーザの利便性について、従来のセミデマンド式とフルデマンド式のオンデマンドバスおよびタクシーとの比較を行う。クエリ件数を 800 件に固定して評価した結果、提案手法のクエリ棄却率はバス台数 5-60 台の平均で 36-58% 程度減少した。また、提案手法の収益は、フルデマンド式に比較すると 3 つの地図の平均で 29-40% 程度増加する結果となった。

セミデマンド式に対しては、同手法が比較的良好な結果を示す塊村においても、提案手法は約 18% の増加を示し、散村においては約 100% の増加となった。また現状のデマンドバス利用者を参考にクエリ件数 50 件に対してバス台数を 5 台と一定の比率で確保した場合の評価では、フルデマンド式でクエリ棄却率が 20% 程度であったことに対し、提案手法のクエリ棄却率は 4% 以下に減少した。収益では従来のフルデマンド式との差異は見られなかったものの、提案手法の受理できたクエリ 1 件あたりの赤字額は 8-20% 程度改善した。

2 問題設定

デマンドバスでは新たなユーザをバスに乗車させるために現在の経路から迂回が生じる。本システムは、バスの迂回が削減される地点で乗降車を行うことで、ユーザに多少の利便性の低下を許容してもらう代わりに、より少ないリソースでより多くのユーザの乗車要求を受理することでデマンドバスの運行コストを削減する。ユーザがシステムに入力した出発地・目的地に対し、システムはユーザ制約を満たす範囲内でバスの迂回が削減される乗降地点を提示し、ユーザ希望地点と乗降地点間の徒歩経路と乗降時間を案内する。また、バスの迂回による遅延の状況に合わせて降車後の徒歩移動距離を調整し、制約を満たすように目的地到着時刻を調整することで、乗車中のバスに他のユーザも同乗するスケジュールの余裕を持たせる。

本システムではユーザは予約を必要とせず、ユーザが乗車したい時刻にネットワークに接続された端末等を用いて乗車要求を発行する。乗車要求には、任意の出発地、任意の目的地、乗車人数が含まれる。スケジュールの計算後、乗車するバスと乗降地点をシステムから通知を受け、ユーザは乗車地点に向かって即座に徒歩移動を開始する。乗車地点に到着後バスが到着するまで待機した後、スケジュールされたバスに乗車する。ユーザの乗車要求に対して乗車するバスが決定した時点で、ユーザの降車地点も決定しユーザに通知されているが、バスの迂回の遅延の状況によって降車地点が変更される場合がある。降車地点の変更があった場合には、ユーザが携帯する端末またはバス車内の何らかの設備を通じ、ユーザに新たな降車地点と目的地までの徒歩経路を案内する。降車後は即座に目的地までの徒歩移動を開始する。ユーザは出発地と目的地の距離に応じて目的地到着時刻の制約を持つ。予想される目的地到着時刻が制約満たさないスケジュールリングは行わず、制約を満たすスケジュールがない場合はユーザは乗車を諦める。

デマンドバスには無線通信機能を持つ車載器が搭載されているものとし、バスの位置情報は逐一サーバに送信されるものとする。この車載器により経路や乗降するユーザの情報を受信する。近年はタブレット等の端末が普及し、専用の車載器を用いずともこれらの機能は安価に実現可能であると考えられる。デマンドバスは車庫（営業所）から出発し、営業所に戻ることで業務を終了する。デマンドバスは自治体が運行することを想定し、営業所は市役所やその支所に設置することを仮定する。営業所は 1 つまたは複数存在し、各営業所に収容可能台数が設定されている。それぞれ営業所に設定された収容可能台数を全て合計すると運行するバスの台数に一致するように設定し、全てのバスがいずれかの営業所に収容できるものとする。また、営業所以外にバスが待機できる場所として駅前のバスターミナルを想定する。バスターミナルにおいてもバスの収容可能台数が設定され、それを超えない範囲で空車のバスが待機する。駅付近はユーザの需要が高いと考えられるため、営業所の空車のバスは駅に向けて回送し、駅で待機する。また駅で待機しているバスが偏ることを防ぐため、待機しているバスの数が均等になるよう、空車のバスが多く待機している駅からバスが待機していない駅に対して一部のバスを回送する。ユーザの乗車要求があった空車は、即座に営業所または駅を出発する。また営業運転中のバスの経路に変更があった場合は、車載端末を通じてドライバーに通知し、即座に経路変更を行うものとする。全てのユーザを降車させ空車となったバスは、現在地点から最も近い空きのある営業所または駅まで回送し、ユーザ待機状態に戻る。ユーザの乗車要求受付時刻終了後、すべてのバスは営業所に帰還させ業務を終了する。本システムではバス停は設置せず、地点で乗降できるものとする。バスの乗降にはユーザの数に比例して時間を要するものとする。乗車するユーザが乗車地点に到着していない場合、バスはその場で待機する。

サーバはユーザの乗車要求を受信するごとにユーザの乗降地点の候補を計算し、それぞれに対してスケジュールの逐次挿入法を実行するリアルタイム処理を行う。制約を満たすスケジュールが存在する場合は乗車要求を受理し、その中で最もコストの低いスケジュールを採用する。スケジュールの計算には数秒から数分程度の時間がかかることが考えられるが、本研究では簡易的にスケジュールの計算には時間を必要とせず、即座にユーザにスケジュール結果を通知できるものと仮定する。複数のバスと複数の乗降地点について、そ

それぞれの逐次挿入法の計算を並列で実行した場合には、高々数秒程度で計算が終了できると考えられる。乗降地点の候補は、最大徒歩移動距離を設定し、これを超えない範囲内にある任意の地点とする。最大徒歩移動距離はユーザの身体能力に合わせて個々に設定するか、全てのユーザに一律に設定する方法がある。

3 提案システム

本章では、徒歩移動を含むデマンドバスのスケジューリングを行うためのアルゴリズムと手法について述べる。本手法は基本的には ADARTW および逐次挿入法を徒歩移動に拡張したものである。ここでは処理をユーザの乗降地点候補の算出、バススケジュールの算出、降車地点の調整の 3 つに分割し、それぞれの詳細を後述する。

リアルタイム処理のデマンドバスのスケジューリングでは、ユーザのデマンドが入った時点でその都度スケジューリングを行う。ユーザのデマンドが入った時点のスケジューリングの処理の全体をアルゴリズム 1 に示す。アルゴリズム 1 では、それぞれのバスのスケジュールを参照し、スケジュールの中の何番目に割り込むかを逐次挿入法により決定する、あるいは空車のバスを手配する。新規ユーザの送迎により追加で発生するコストが最も少ないスケジュールを採用し、ユーザに通知する。バスの経路の計算では A*探索を用いる。以下、本手法において A*探索のヒューリスティック値は断りのない限りゴールまでのユークリッド距離を利用する。また本手法におけるグラフでは、エッジが規模に応じてラベル付けされていることが前提である。A*探索の高速化として、まずエッジの規模が一定以上のもののみを利用して探索を行い、ゴールまでの経路が見つからない場合のみすべてのエッジを利用して探索を行う。

乗車要求 qu を既に他のユーザの乗降予定を持つバス b のスケジュール S_b への挿入するには、ユーザ u の乗車および降車の予定を S_b の何番目に割り込ませるのがコストが低いか、計算・比較する。このとき、バスの最大乗車人数や既にスケジュールされているユーザの時間制約、ユーザ u の時間制約をそれぞれ満たす必要がある。また、既に i 個の停車予定があるスケジュール S_b への挿入する最適な順番を得るためには、ユーザ u の乗車 \Rightarrow 降車の順番を満たす順序対を全て $i!$ 通りの挿入パターンを試行する必要がある。一方で本手法においては、高速化のためユーザ u 乗車スケジュールのみ挿入するスケジュールの中で最適なスケジュール S_p を計算し、 S_p に対してユーザ u の降車スケジュールを挿入することで、準最適解を得る。本手法における徒歩移動を含むデマンドバスのスケジューリングは、1 ユーザが複数の乗降地点の候補を持ち、そのそれぞれに対してスケジュールの計算を試行する必要があるため、乗車の挿入と降車の挿入を切り分けてスケジューリングを行う。

徒歩移動の案内によりデマンドバスの迂回は削減されるものの、降車後にユーザの目的地まで徒歩移動する場合、目的地までドアツードアで直接送り届ける場合よりも目的地到着時刻が遅くなることがある。これは、降車後に徒歩移動する速度がバスに乗車している速度よりも遅いためである。この到着時刻の遅れにより、乗車中のユーザの目的地到着時刻の制約と目的地到着予想時刻の差が少なくなり、他のユーザを迂回して迎車し相乗りの機会を損失する場合があり、ドアツードア型の輸送よりもかえって非効率になってしまう場合がある。逐次挿入法によるリアルタイム処理では、既に受理されたユーザのスケジュールは変更しない。一方で本手法では、乗車中のユーザの目的地到着時刻の制約が逼迫し他のユーザをスケジュールに挿入する余裕がない場合に、乗車中のユーザの降車後の徒歩移動距離を短くし目的地到着時刻に余裕を持たせるように徒歩移動経路を変更することで、他のユーザが相乗りした方が効率がいい場合のスケジュールの損失を防ぐ。ユーザは乗車要求が受理された時点で、バスの前後の停車予定からユーザの目的地までの迂回経路上の地点集合を保持しており、これを用いて降車地点の再計算を行っている。計算をバスの前後の停車予定からユーザの目的地までの迂回経路上の地点に制限することにより、計算回数の削減を行っている。

4 評価

評価実験では、シミュレーションにより徒歩移動を含むデマンドバスの利便性、スケジューリング性能、クエリ棄却率および事業者の利益を評価する。実際の地図にもとづくシミュレーション環境において、従来

のデマンドバスの方式であるフルデマンド式およびセミデマンド式に加え、タクシーとの比較を行った。

提案手法に対して、以下の 3 つの手法と比較した。タクシー (TX) :他のユーザと乗合を行わず、経路は自由である運行方式。ドアツードアによりユーザを輸送するため、乗車地点と降車地点はユーザの出発地と目的地と一致する。セミデマンド:デマンドバスのうち、経路は自由だが乗降地点をバス停に限定する方式。ユーザは出発地・目的地と最も距離が近いバス停との間を徒歩移動する。フルデマンド:デマンドバスのうち、経路は自由だが、ドアツードアの輸送で乗降地点が出发地と目的地と一致する運行方式。

実験に用いる地図は、散村、塊村、山間部の 3 つの異なる典型的な村落形態を持つ 10km 四方の地図を、OpenStreetMap から取得した。

以下、シミュレーションにより得られた結果について説明する。

ユーザの利便性に関する項目として、待ち時間と徒歩移動時間が挙げられる。待ち時間は、ユーザが乗車地点に到着してからバスに乗車するまでにかかる時間とする。徒歩移動を伴わない場合は、乗車要求を発行した時間からバスに乗車するまでにかかる時間とする。待ち時間が短いほどユーザの利便性が高いといえる。徒歩移動時間は、出発地から乗車地点まで歩いた時間と降車地点から目的地まで歩いた時間を合算する。徒歩移動時間が短いほどユーザの利便性が高いと言える。

ユーザの乗車までの待ち時間は、バス台数が増えるにつれて減少し、散村および山間部において提案手法は、フルデマンド式と比較し 2 分から 3 分程度、タクシーと比較し 6 分から 8 分程度短縮される結果となった。またセミデマンド式は提案手法よりも 2 分から 3 分程度短いことが分かった。セミデマンド式の待ち時間が提案手法より短い結果となったのは、セミデマンド式の徒歩移動時間が散村と山間部で極端に長いこと、バスがユーザの徒歩移動終了を待つことになり、ユーザの待ち時間が短くなっていると考えられる。一方で塊村においては、バス台数が少ない場合に提案手法とセミデマンド式の待ち時間が長くなる傾向にあった。そのため、バス台数が 15 台以下の場合フルデマンド式の待ち時間が最も短く、台数が増えるにつれてセミデマンド式および提案手法の待ち時間のほうが短くなった。塊村ではバス停と集落の位置がおおよそ一致すると考えられ、長い距離を歩かずともバス停やバスの迂回が少なくなる乗車地点に辿り着くことができるため、特にバス台数が少ない場合に散村よりも待ち時間が長くなったと考える。

次にユーザの乗車前と降車後の徒歩移動時間の合計について述べる。提案手法は、おおむねどのバス台数においても散村では 16 分程度、塊村では 19 分程度、山間部で 12 分程度の徒歩移動時間となり、散村および山間部ではセミデマンド式よりも徒歩移動時間を削減した。散村ではクエリが分散するにもかかわらず塊村よりも徒歩移動時間が短い理由は、クエリが分散していることよりの制約を満たしにくく、降車後の徒歩移動を短くする処理を行う回数が多くなるためであると考えられる。特に散村および山間部では、提案手法の待ち時間はセミデマンド式よりも長い結果になったが、徒歩移動時間を含めると乗車要求から乗車するまでの時間はセミデマンド式よりも提案手法の方が短かった。一方で提案手法よりもフルデマンド式およびタクシーは待ち時間が長いものの、徒歩移動時間がないため実際に乗車するまでの時間は提案手法よりも短いことが分かった。よって、利便性では提案手法はタクシーやフルデマンド式よりも劣るが、セミデマンド式と比較すると同等、ないしはより優れていると考えられる。

提案手法における乗車要求の発行から目的地到着までにかかるユーザの平均旅行時間と、出発地から目的地までの直接移動時間をもとに計算される目的地到着時刻の平均制約時間を調べた。バス台数を増加させた場合、1 台のバスに乗車するユーザの数が減少しスケジュールに余裕が生じるため、待ち時間と乗車時間が減少する。一方で、本手法ではスケジュールに余裕がある場合でもバスの運行コストが少なくなるように乗降地点を設定するため、バス台数を増加させた場合でも徒歩移動時間は変化しない結果となった。平均制約時間は乗車要求の発行から散村、塊村、山間部でそれぞれ 64.1 分、68.6 分、49.9 分となっている。いずれの地図においても、ユーザの平均旅行時間は平均制約時間と比較し 55% - 91% 程度となっている。

クエリ棄却率は、すべての乗車要求に対して制約を満たす範囲内でスケジュールを見つけることができなかった乗車要求の割合とする。例えば 100 件の乗車要求に対して 20 件の乗車要求に対して制約を満たす乗車スケジュールを計算できなかった場合、クエリ棄却率は 20% となる。クエリ棄却率が低いほどユーザ

の利便性が高くスケジューリングの性能が高いといえる。

提案手法のクエリ棄却率は、比較手法より低い結果となった。提案手法、フルデマンド式、タクシーについてはいずれの地図においても同様の傾向を示し、バス台数が 60 台の場合においてタクシーはクエリ棄却率が 40-50% 程度あることに対し、フルデマンド式では 13-17% 程度、提案手法では 3-9% 程度となっている。山間部において提案手法は、散村・塊村よりも数 % 程度クエリ棄却率が高い結果となったが、山間部は道路に 2 次元的広がり少なく、徒歩移動できる範囲が小さいためであると考えられる。

5 結論

シミュレーションによる評価実験で従来のフルデマンド式およびセミデマンド式のデマンドバス、タクシーとの事業者収益の比較を行った結果、提案手法は比較対象と同等またはそれ以下のバスの走行で、より多くのユーザを受理することでバス事業者の収益が増加することが分かった。クエリ件数を 800 件に固定した場合、クエリ棄却率はバス台数を 60 台確保した場合でも、フルデマンド式で約 13-17%、セミデマンド式で 19-80% 程度あったことに対し、提案手法では 3-9% 程度であった。従来手法と比較し提案手法の収益の増加率は、フルデマンド式と比較すると 3 つの地図の平均で 29-40% 程度増加する結果となった。クエリが分散せずバス停と集落の位置がおおよそ一致すると考えられる塊村においては、セミデマンド式も比較的良好な結果を示したが、提案手法はさらに約 18% 収益を増加させ、クエリが分散する散村においてはセミデマンド式に比較し提案手法は約 100% の収益増加率を示した。

【参考文献】

- [1] Wilson, N. H. M., Sussman, J. M., Goodman, L. A. and Hignnet, B. T.: Simulation of a Computer Aided Routing System (CARS), in Proceedings of the Third Conference on Applications of Simulation, pp. 171-183 (1969).
- [2] Jaw, J.-J., Odoni, A. R., Psaraftis, H. N. and Wilson, N. H.: A heuristic algorithm for the multi-vehicle advance request dial-a-ride problem with time windows, Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 20, No. 3, pp. 243 - 257 (1986).
- [3] Tsubouchi, K., Hiekata, K. and Yamato, H.: Scheduling Algorithm for On-Demand Bus System, in 2009 Sixth International Conference on Information Technology: New Generations, pp. 189-194 (2009).
- [4] Nakashima, H., Sano, S., Hirata, K., Shiraishi, Y., Matsubara, H., Kanamori, R., Koshiba, H. and Noda, I.: One Cycle of Smart Access Vehicle Service Development, in Serviceology for Designing the Future: Selected and Edited Papers of the 2nd International Conference on Serviceology, pp. 247-262 (2016)

〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Real Time On-demand Bus Route Scheduling with the Use of Meeting Points for Rural Areas	IEEE Transactions on ITS	査読中