

EVTour：電気自動車の乗換スケジューリング法の提案と性能評価

上田 知幸¹ 柴田 直樹^{1,a)} 川井 明^{2,b)} 伊藤 実^{1,c)}

受付日 2016年5月23日, 採録日 2016年11月1日

概要：近年、環境問題対策として電気自動車（EV）が注目されているが、短い航続距離や、長い充電時間が原因となり普及に至っていない。本研究ではEVを使ったカーシェアリングを考案し、EVを効率的に運用するためのシステム EVTour を提案する。EVTour では、ユーザは任意の目的地にて車両の利用・返却ができ、残り電力量の少ないEVを乗り換えて移動を継続できる。提案手法はユーザの予約内容（希望目的地や時間制約）を満たす走行経路、EV情報、充電場所を含むスケジュールを算出し提示する。ユーザの利用時間が長くなるにつれ、EVの分布に偏りが生じ、予約受率に悪影響を与える恐れがあるため、提案手法は各ステーション間でEV車を融通しあい、最大多数のユーザに実行可能な走行スケジュールを提供することを目的とする。

キーワード：遺伝的アルゴリズム、片道カーシェアリング、電気自動車

EVTour: A Scheduling Method for Electric Vehicles Car Sharing

TOMOYUKI UEDA¹ NAOKI SHIBATA^{1,a)} AKIRA KAWAI^{2,b)} MINORU ITO^{1,c)}

Received: May 23, 2016, Accepted: November 1, 2016

Abstract: Electric vehicles (EV) have become popular in the past several years. However, the short travel distance and the long charge time are big problems. In this study we propose a scheduling algorithm to operate EVs more efficiently using car-sharing service. It is possible for users to return EVs to any parkings, and transfer another EV from an EV with small remaining power. At departure place, the user inputs the desired destinations and arrival time. The server collects the inputs and calculates the route and action (charge or transfer). The purpose of this study is to maximize the reservation accepted rate. However, because we allow users one-way travel, the distribution of EVs is an important factor for the reservation accepted rate. In our method, we relocate EVs from stations with many EVs to other stations with few EVs.

Keywords: genetic algorithm, one way car-sharing, electric vehicle

1. はじめに

近年、地球温暖化の原因の1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、その一対策が電気自動車（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 [2]。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ており、国内におけるカーシェアリング会員数、車両台数は年々増加している [3]。

EVの欠点を補う研究や、カーシェアリングの特徴を活かした研究がさかんに行われている。環境負荷低減効果の

¹ 奈良先端科学技術大学院大学
NAIST, Ikoma, Nara 630-0192, Japan

² 滋賀大学
Shiga University, Hikone, Shiga 522-0069, Japan

a) n-sibata@is.naist.jp

b) akira-kawai@biwako.shiga-u.ac.jp

c) ito@is.naist.jp

定量化や、カーシェアリング利用者のモデル化に関する研究の中、ある調査では、カーシェアリングにより1年あたりの車両の平均移動距離を約27%削減でき、さらに1年で世帯あたり0.84tの温室効果ガスの削減効果を期待できるとしている[9]。現在のカーシェアリングサービスは、車両を借りた場所に返却する、往復利用を前提としたものは多いが、カーシェアリングの利便性を向上させるため、片道利用を許容したカーシェアリング（以下片道カーシェアリング）が研究されている。しかし、片道カーシェアリングの場合、車両分布が偏り、車両数が少ない駐車場では利用者が車両を確保できないといった問題が予想され、課題が多い。また、これらの研究のほとんどは、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EVステーションにある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EVステーションにおける車両の利用と返却が可能であり、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。

提案手法の目的は複数のユーザからの予約申請に対し、最大多数のユーザに実行可能なスケジュールを提示することである。本手法は2つのパートで構成される。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）を満たす走行経路、EV情報、充電場所を含むスケジュールをユーザに提示する。再配置スケジュール算出部では、EVステーションに停車中のEV台数を把握し、EV車両数に余裕のあるステーションから不足しているステーションへEVの融通（再配置）を行う。

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率を達成することを確認した。予約受率率は最大約9%程度、配車回数は最大15%程度の改善を確認した。

2. EVをとりまく環境および関連研究

近年、地球温暖化など環境問題が報じられており、EVはその対策として注目されている。EVは走行中に排気ガスを出さない、ガソリン車よりエネルギー効率が高い、振動や騒音が少ないといった長所を持ち、環境負荷の少ない自動車である。国内において、ハイブリッド車の保有台数が約300万台であるのに対し、EVは約6万台である点からも本格的な普及に至っていないことが分かる[1]。航続可能距離が200km程度で、充電にも30分の時間を要するといったEVの欠点が主な原因と考えられる。

EVは自宅などでの普通充電が基本だが、EVの充電切れの不安感の軽減や利便性を担保するために街中・出先で充電できる充電インフラの整備が重要となる。国内の急速充電器の規格にはCHAdeMOがあり、平成26年2月時点で国内には約2,000台の急速充電器が設置されている[13]。EVの欠点を克服できる有効活用方法が環境保護の観点からも期待されている。

カーシェアリング

平成25年の国内における車両保有台数は約8,000万台であり、都市部では駐車場不足や車両の維持費の高騰が大きな問題となっている[2]。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ている。カーシェアリングの車両台数、会員数は年々増加しており、平成25年における国内車両台数は約9,000台、会員数は約30万人に達している[3]。しかし、タイムズカープラスなどをはじめとした国内のカーシェアリングサービスは、利用者に対して借りた場所に車両を返却する往復利用を前提としている[4]。

一方、欧州や北米の都市では、すでにカーシェアリングが広く普及しており、片道利用を許容したautolibやcar2goなどのカーシェアリングサービスが展開されている[5]、[6]。autolibはフランスにおけるEVを対象とした片道カーシェアリングサービスで、2012年9月時点の会員数は37,000人、車両数は1,800台、駐車スペースは3,900カ所、充電ステーションは670カ所まで普及している。利用者は路上に駐車された車両に乗り込み移動し、指定範囲内の駐車スペースに車両を停車させる。これらのサービスでは都市部にある多数の路上駐車スペースを利用しているが、日本国内では路上駐車が認められておらず多数の駐車スペースを確保することは困難である。

しかし、国内でも片道カーシェアリングを試みる実証実験がなされている[7]。平成25年10月から横浜都心部において、低炭素交通の推進を目的とした実証実験チョイモビが実施されている。チョイモビは小型EVを対象とした片道カーシェアリングを前提とし、貸渡返却カは45カ所、車両台数30台で開始された。

カーシェアリングに関する研究がさかんに行われている[14]。ここでは片道カーシェアリング、環境負荷低減効果の定量化、カーシェアリングと公共交通機関の連携に関する研究について説明する。

利用者に対し、車両を借りた場所に返却する往復利用を前提としたカーシェアリングは事業者にとって車両の管理が手軽であるというメリットがあるが、片道利用したい利用者にとっての利便性は低い。カーシェアリングの利便性を向上させるため、片道カーシェアリングが研究されている[17]、[18]、[19]、[20]、[21]、[22]。片道カーシェアリングでは、車両分布が偏り、利用者が車両を確保できないといった問題が予想される。この車両分布の偏りを修正するため

にステーション間で車両の再配置が必要となる。

事業者による再配置を前提とした研究では、スタッフが定期的に車両の再配置を行う [17], [18], [19]. Barth らは、ステーションに停車している車両台数に基づき再配置を実行する条件を提案している [17]. この手法を南カリフォルニアのコミュニティに適用し、タクシーなどの交通手段と競争しようと分析している. Kek らは片道カーシェアリングにおける再配置方法として車両数の多いステーションから少ないステーションへ再配置を実行する手法を提案している [18]. Smith らは、再配置に利用する車両数と運転手数を最小化する手法を検討している [19]. 出発地点に到着した利用者は、タクシーを利用するように、スタッフが運転する車両に乗車して目的地まで移動する。

利用者が再配置に参加することを前提とした研究では、利用者に対して分割乗車や乗り合い乗車を提示し目的地から出発する車両数や、目的地へ到着する車両数を制御することで車両分布を修正する. Uesugi らは、車両の分布に従って、通常乗車または分割乗車を利用者に割り当てることでステーションから出発する車両数を制御し、車両の再配置回数を削減する手法を提案している [20]. Barth らは、ステーションに停車している車両数に基づいて、利用者に対して分割乗車や乗り合い乗車を促し、再配置回数を減らす手法を提案している [21]. 利用者がカーシェアリング運営者の要求を受け入れた場合、価格の割引を受けられる. Febbraro らはステーションの代わりに任意の路上駐車スペースを利用できる環境におけるカーシェアリングを提案している [22].

環境効果 カーシェアリングでは、会員間で車両を共同利用するため、車両数や駐車スペースの削減、温室効果ガス低減などの効果が期待されており、これらの環境負荷低減の効果を定量化する研究がなされている [9], [16], [23]. 武内らは過去のカーシェアリングのデータを利用し、カーシェアリングに小型 EV を導入したときの CO₂ 削減効果をシミュレーションで評価している [23]. 評価の結果従来のガソリン車と比較して、CO₂ 排出量を 1/5 に削減できると分析している. Martin らは北米における調査で、カーシェアリングにより 1 年あたりの車両の平均移動距離を約 27%削減でき、さらに 1 年で世帯あたり 0.84t の温室効果ガス削減が期待できると分析している [9]. さらに、Martin らは、北米における調査で、カーシェアリング実施により世帯あたりの車両保有台数を 0.47 台から 0.24 台に削減できるとしている [16].

カーシェアリングと公共交通機関の連携 伊志らは、通勤車を利用したカーシェアリングと公共交通機関を連携した交通システム「通勤車利用型カーシェアリング (CSCC)」を提案し、公共交通機関へのモーダルシフト効果の検証を行っている [15]. CSCC では、通勤者の車を公共交通機関の駅周辺に配置し、昼間時に駐車場で遊休化している間近

隣住人が共同利用する. 車両提供者は、自家用車から公共交通機関へのパークアンドライドを促し、カーシェアリングによる利益で自家用車の維持費を抑えられる. 一方、共同利用者は自家用車よりも安価に車を利用することができ、公共交通機関だけでは網羅できない目的地への移動が可能となる. 沖縄県那覇市周辺においてモノレール駅をカーシェアリングステーションとして CSCC を導入した場合、昼時間帯においてモノレール利用者数の増加、自家用車利用者数の減少を確認している.

3. 提案手法

3.1 想定アプリケーション

本研究は複数のユーザが各地 (以降 EV ステーションと呼ぶ) に配置された EV を共同利用し、それぞれ希望する目的地へ移動・滞在する状況を想定する. EVTour のイメージを図 1 に示す. ユーザは各 EV ステーション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. 入力された予約申請はサーバに逐次に処理され、サーバがユーザの希望を満たす走行経路や各 EV ステーションにおける行動 (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 (図 1 サーバの役割その 1). 複数の予約申請が同時に到達した場合、サーバは最大多数のユーザに実行可能なスケジュールを算出することを目標とする. また、利用時間が長くなるにつれ、EV の分布に偏りが生じるため、サーバは EV の再配置スケジュール (図 1 サーバの役割その 2) を算出し、各 EV ステーション間で EV 車の融通を行う。

3.2 諸仮定

カーシェアリング：片道カーシェアリングが可能である。

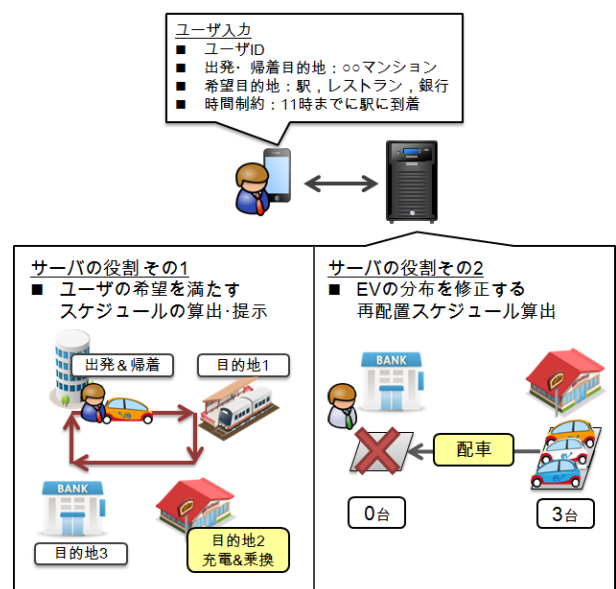


図 1 提案システムのイメージ

Fig. 1 Overview of the proposed system.

ユーザはEVステーションに配置されたEVを共同利用し、借りたEVを必ずしももとの場所に返却する必要はなく、任意のEVステーションで返却できる。また、ユーザはシステムに提示されたスケジュールに従い、EVステーションに電力量の少なくなったEVを置き、電力が充足されたEVに乗り換えて移動を継続できる。

EVステーション：EVを配置するステーションとしてコンビニ、ショッピングモール、駅などを想定する。それぞれのEVステーションにはEVを配置する駐車スペース、充電用ブース、予約用端末、管理スタッフを設置しているとする。

ユーザ：あらかじめ予約を完了する事前予約ユーザと、当日EVを利用するEVステーションを訪れ、予約を行う現地予約ユーザがいる。自身の携帯端末とEVステーションに設置された端末のどちらからも予約が可能である。予約時、ユーザは出発地、目的地（複数可）、到着時間、滞在時間を入力する。ただし、出発地、目的地いずれもEVステーションに限る。

EV：想定する環境における車両はすべて同モデルのEVである。

スタッフ：スタッフはEVステーションに待機し、サーバに指示されたEVの再配置を行う。

3.3 提案システムの使用イメージ

ユーザの視点、スタッフの視点それぞれの提案システムの使用イメージについて説明する。

3.3.1 ユーザ視点

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、図2に沿って説明する。

- **事前予約ユーザ**は携帯端末の予約アプリを使い、前日までに希望目的地などのな情報を入力し、予約申請をサーバに送信する。直後にユーザはサーバから予約の結果を返信される。予約が受理された場合、希望目的地までの走行経路および乗車するEVのIDを含むスケジュールを受け取る。サーバが演算した結果、ユーザの希望を満たせない場合、予約を却下する。
- **現地予約ユーザ**は当日にEVステーションに到着し、設置された予約用端末を利用し必要な情報入力と予約を行う。事前予約ユーザ同様、予約が受理された場合はスケジュールを受け取り、次の**共通行動**に従う。サーバがユーザの希望を満たせない場合、予約を却下する。
- **共通行動：**ユーザは目的地に到着後、サーバからのスケジュールに乗車してきたEVに充電指示があれば、現地に設置された充電ブースで充電を行う。滞在時間中に用事を済ませ、次の目的地へ出発するユーザはスケジュールで次に乗車するEVのID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

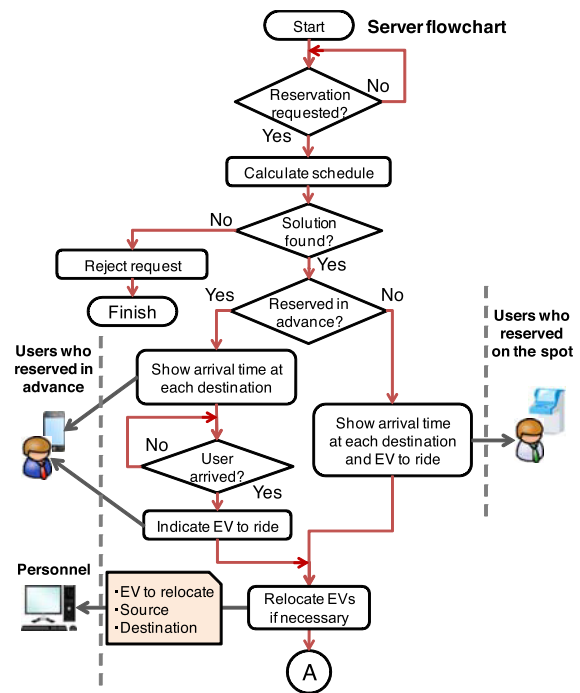


図2 ユーザの予約から出発までのサーバの動作
Fig. 2 Server flowchart for accepting reservation from a user.

を指示される場合と、別のEVへ乗り換えを指示される場合がある。しかし、何らかの原因でユーザが乗車予定のEVが使用できない場合、サーバは即座にユーザに対して新しいスケジュールを発行する。また、次に目指す目的地のないユーザはスケジュールがを終了する。

3.3.2 スタッフ視点

各EVステーションに待機しているスタッフは、もっぱらEVの再配置を行う。サーバはスタッフに対し、移動元ステーション、移動先ステーション、EVのID、出発の時刻、充電指示を含むスケジュールを提示する。スタッフはスケジュールに従いEVの再配置を行う。ただし、現段階ではスタッフが再配置後、何らかの方法で元のステーションに戻ると想定する。

3.4 サーバの動作イメージ

事業者はサーバを設置し、ユーザの情報、EVの位置と電力量、充電ブースの状態を管理する。サーバの役割は2つある。1つ目はユーザの希望を満たすスケジュールの算出と提示である。図3はフローチャートである。2つ目は、各ステーション間のEV車の再配置を行い、余裕のある（待機中のEV車）ステーションのスタッフに対し、余裕のないステーションへ移動させる。

ユーザに対するスケジュール

サーバは予約情報（事前、現地問わず）を受け取ると、ユーザの希望を満たすスケジュールの解を探索する。算出できれば、ユーザの携帯端末に予約受理の旨とスケジュー

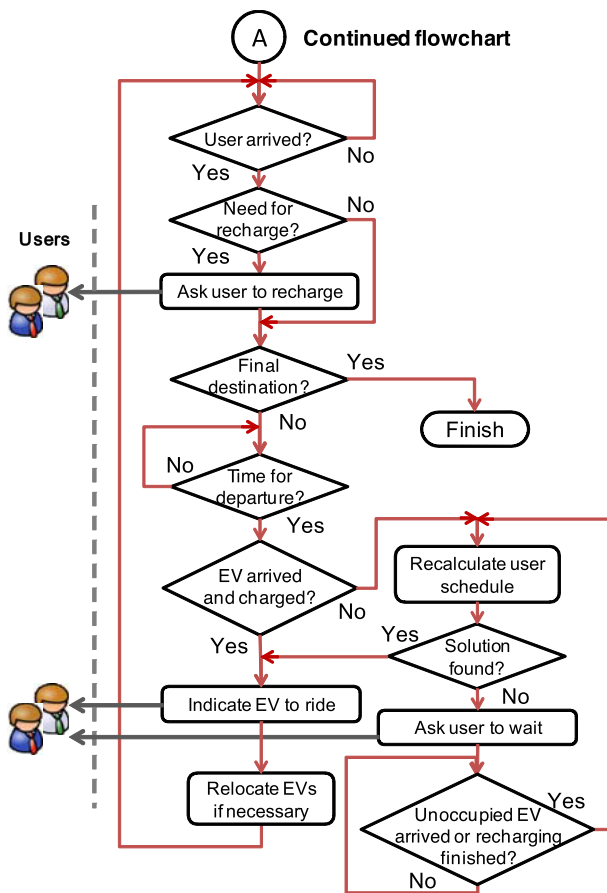


図 3 ユーザの出発から移動終了までのサーバの動作

Fig. 3 Server flowchart for guiding the user through the tour.

ルを送信する。ユーザがスケジュールに従い、EV を乗車して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。充電が必要な場合、サーバはユーザに対して充電を指示し、次の出発時刻に合わせて、次の乗車予定のEV 情報を指示する。ただし、出発時刻になっても、EV を確保できない場合、サーバは次の例外処理に移す。

スタッフに対する EV 再配置スケジュール

サーバは管理下のEV ステーションの利用状況をつねに監視している。

- 余裕度：あるEV ステーションの予約可能なEV 台数。
- 供給ステーション：余裕度が高く、他のEV ステーションへEV を提供可能なステーション。
- 需要ステーション：余裕度が低く、EV が不足するEV ステーション。

サーバが供給ステーションと需要ステーションを決定後、2段階に分けてEV の再配置を指示する。

- (1) 隣接再配置：需要ステーションの隣接ステーションを調べ、供給ステーションが隣接していれば再配置を行い、できるだけ短い時間で需要ステーションを減らす。
- (2) 全域再配置：供給ステーションと需要ステーションからEV のバラつきが小さくなるような組合せを探索

し再配置を行う。供給ステーションと需要ステーションが複数ある場合、数の増加にともない計算量が増大するため、実用的な時間で適切な組合せを探索するため焼きなまし法を用い、余裕度の最も高い供給ステーションから複数のEV を需要ステーションへ再配置することで、余裕度を平滑化する。

サーバはユーザ予約を受理後、各EV ステーションの余裕度を更新し、必要に応じて再配置スケジュールを作成し、各EV ステーションのスタッフに指示する。

例外処理：

当初ユーザに割り当てたはずのEV が渋滞に巻き込まれたり、前のユーザの充電忘れなどの原因により、定刻になっても使用できないことも考えられる。ユーザに別のEV を割り当てれば解決するため、状況的にユーザの現地予約と同じである。サーバは新しいスケジュールを算出できればユーザに通知し、できなければ当初予定のEV の到着や充電完了、または別のEV が配車可能になるまで待機を指示する。

4. 問題定義および提案手法実装

4.1 入力

入力は、あらかじめ与えられた運営側データベース情報とユーザ入力からなる。

データベース情報

- 地図：道路網を示すグラフ $G = (N, A)$ として与えられる。道路網を構成する交差点をノード $n_i \in N$ 、交差点間の道路リンクを A とする。グラフ G は以下の項目を持つ。
 - $dist(n_i, n_j)$ ：ノード $n_i, n_j \in N$ 間の距離 (km)
 - $speed(n_i, n_j)$ ：ノード $n_i, n_j \in N$ 間の法定速度 (km/h)
- EV ステーション：ユーザが経由するEV ステーションの集合は $D = \{d_1, \dots, d_n\}$ で与えられ、各EV ステーション $d_i \in D$ は、以下の項目を持つ。
 - $n_i \in N$ ：EV ステーション d_i に対応するグラフ上のノード
 - $D_{neighbor}$ ：EV ステーション $d_i \in D$ に隣接するEV ステーションの集合
 - $B_i \in B$ ：EV ステーション d_i の初期配置ブースの集合
 - $evNum_i$ ：EV ステーション d_i の初期配置EV 台数
- 充電ブース：EV の充電を行う充電ブースの集合を B とし、それぞれの充電ブース $b_i \in B$ は以下の項目を持つ。
 - $d_i \in D$ ：ブース b_i が設置されているEV ステーション
 - $chargePower$ ：単位時間の充電によって得られる電力量
- EV：全EV の集合を E とし、各EV 車 $e_i \in E$ は以下

の項目を持つ。

- $d_i \in D$: 初期配置 EV ステーション
- $initPower$: システム開始時における残り電力量 (kWh)
- $VOLUME$: バッテリ容量 (kWh)
- $COST$: 電費 (km/kWh)

ユーザ入力 全ユーザの集合を U と表記し, 各ユーザ $u_i \in U$ は以下のデータを入力する。

- t_s : 希望出発時刻
- t_g : 希望帰着時刻
- $d_s \in D$: 出発地
- $d_g \in D$: 最終目的地
- $D_u \subseteq D$: 経由 EV ステーションの集合
- $desiredTime(d_j)$: 各経由 EV ステーション $d_j \in D_u$ の到着時間
- $stayTime(d_j)$: 各経由 EV ステーション $d_j \in D_u$ の滞在時間

4.2 出力

提案手法はユーザとスタッフに対してスケジュールを出力するが, フォーマットは同じである。このほか, システム管理用のスケジュールも複数管理する必要がある。

ユーザスケジュール

ユーザスケジュールは, EV ステーションの走行順序, 出発・到着時刻, 乗車 EV など定めるスケジュールである。全ユーザのユーザスケジュールの集合を Su とし, ユーザ $u_i \in U$ のスケジュール Su^i は $Su^i = [su_1^i, su_2^i, \dots, su_j^i, \dots, su_n^i]$ と表記する。ここで, ユーザスケジュールを構成する要素をユーザスケジュールノードと呼び, su_j^i は u_i の j 番目のユーザスケジュールノードである。それぞれのユーザスケジュールノードは以下の属性項目を持つ。

- $destId$: 現在の EV ステーション ID
- $evId$: 次に乗車予定の EV の ID
- t_a : 現在 EV ステーションの到着時刻
- t_d : 現在 EV ステーションの出発時刻

EV スケジュール (管理用)

EV スケジュールは, EV の時刻ごとの所在地, 出発・到着時刻, 乗車ユーザなどを定めるスケジュールである。全 EV の EV スケジュールの集合を Se とし, $EV_{e_i} \in E$ のスケジュール $Se^i \in Se$ は, $Se^i = [se_1^i, se_2^i, \dots, se_j^i, \dots, se_n^i]$ と表記する。EV スケジュールを構成する要素を EV スケジュールノードと呼び, se_j^i は e_i の j 番目の EV スケジュールノードである。EV スケジュールノードは以下の属性項目を持つ。

- $userId$: 乗車ユーザ ID
- $destId$: 現在 EV ステーションの ID
- t_a : 現在 EV ステーションの到着時刻
- t_d : 現在 EV ステーションの出発時刻

- $energy_a$: 到着時の残り電力量
- $energy_d$: 出発時の残り電力量

充電ブーススケジュール (管理用)

充電ブーススケジュールは, どの EV をいつ充電するかを表すスケジュールである。全充電ブースの充電ブーススケジュールの集合を Sb とし, 充電ブース $b_i \in B$ のスケジュール $Sb^i \in Sb$ は, $Sb^i = [sb_1^i, sb_2^i, \dots, sb_j^i, \dots, sb_n^i]$ と表記する。ブーススケジュールを構成する要素をブーススケジュールノードと呼び, sb_j^i はブース b_i の j 番目のブーススケジュールノードである。ブーススケジュールノードは以下の属性項目を持つ。

- $evId$: 充電する EV の ID
- t_s : 充電開始時刻
- t_e : 充電終了時刻

EV ステーションスケジュール (管理用)

EV ステーションスケジュールは, 時刻ごとに出発, 到着予定の EV や, 予約可能な EV を表すスケジュールである。全 EV ステーションのスケジュールの集合を Sd とし, EV ステーション $d_i \in D$ のスケジュール $Sd^i \in Sd$ は, $Sd^i = [sd_1^i, sd_2^i, \dots, sd_j^i, \dots, sd_n^i]$ と表記する。EV ステーションスケジュールを構成する要素を EV ステーションスケジュールノードと呼び, sd_j^i は EV ステーション d_i の j 番目の EV ステーションスケジュールノードである。EV ステーションスケジュールノードは以下の属性項目を持つ。

- t : EV 台数が変化する時刻
- $E_{before} \in E$: 停車している EV の集合
- $E_{arrival} \in E$: 到着する予定の EV の集合
- $E_{departure} \in E$: 出発予定の EV の集合
- $E_{available} \in E$: 予約可能な EV の集合

4.3 制約条件

以下の各制約条件は提案手法の前提である。

- (1) 各車両は指定された目的地 (経由地) に到着するまで電力が負にならない。
- (2) 各車両は指定された時間までに目的地 (経由地) に到着しなければならない。
- (3) 同一時刻に 1 ユーザは 1 台の EV だけを指定される。
- (4) EV が充電必要になったとき, 充電ブースに空きがある場合, そのブースで充電ができる。
- (5) EV ステーションの訪問順序, 訪問時刻, 出発時刻はユーザの予約入力に従う。また, すべての経由地および目的地を訪問しなければならない。

$EV_{e_i} \in E$ が EV ステーション $d_j, d_{j+n} \in D$ 間を走行した場合に必要な消費電力量について考える。EV ステーション d_j から d_{j+n} までに通過するノードの集合を $N_{pass} = \langle n'_0, n'_1, n'_2, \dots, n'_k \rangle$ とする。 $n'_k \in N$ は EV ステーション d_j を出発してから k 番目に通過するノードを表す。したがって, n'_0, n'_k は EV ステーション d_j, d_{j+n}

に対応する。このとき EV ステーション d_j から d_{j+n} までに必要な電力量は $Cons(d_j, d_{j+n})$ は次のようになる。

$$Cons(d_j, d_{j+n}) = \frac{\sum_{n'_0 \in N_{pass}}^{n'_k-1} dist(n'_m, n'_{m+1})}{COST} \quad (1)$$

出発地 d_j における e_i の残り電力量を、 $RemPow(d_j)$ とした場合 EVe_i は次の制約式を満たさなければならない。

$$RemPow(d_j) - Cons(d_j, d_{j+1}) > 0 \quad (2)$$

この式は、ある EV 車 e_i が EV ステーション d_j から d_{j+n} まで移動する場合、途中で残り電力量が負にならないことを表している。

4.4 目的関数

一定数ある EV を可能な限り多くの利用者に利用させることが本手法の目標である。ユーザから予約申請を送信されると、サーバは配車スケジュールが実現可能かを判断し、可能な場合だけ予約申請を受理する。限られた EV 車のもとで、多数のユーザから予約申請があったとき、予約受理率の最大化を本手法の目的とする。

全ユーザのユーザスケジュールの集合 Su のうち、予約が受理されたユーザのユーザスケジュールの集合 $Su_{accepted} \in Su$ とすると、目的関数は次のようになる。

$$Maximize \frac{n(Su_{accepted})}{n(Su)} \quad (3)$$

サーバは予約申請が到着する時点で、逐次にスケジュールを計算する。複数の予約が同時に到着した場合、受理できる数が最大となる解を探索する。受理できる予約申請の数が同数の解候補が複数ある場合、総評価値の高い解を選ぶ。

4.5 提案手法の実装

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走行経路、乗車 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 EV ステーションで利用できる EV 台数を管理し、他の EV ステーションから EV の融通を必要とする場所（以下需要ステーション）と他の EV ステーションへ EV を供給可能な場所（以下供給ステーション）の中から、どの供給ステーションからどの需要ステーションへの EV をいつ再配置するか決定する。再配置スケジュール算出部のアルゴリズムには、焼きなまし法を用いて計算する。

ユーザスケジュール算出部

本問題は始点と終点が異なる特殊な巡回セールスマン問題 (TSP) 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。

染色体表現: ユーザの希望目的地と経由地を遺伝子リストとする。

評価関数: それぞれの解候補を差別化するために、ユーザ $u_m \in U$ のユーザスケジュール Su^m を以下の関数で評価する。

$$f(Su^m) = \sum_{i=1}^k Sat(d'_i) - \gamma \sum_{i=1}^{k-1} dist(d'_i, d'_{i+1}) \quad (4)$$

d'_i は Su^m に含まれる経由地、または充電か乗り換えが必要な EV ステーションであり、 $f(Su^m)$ はスケジュールの評価値である。 $Sat(d'_i)$ は経由地 d_i の評価値であり、時間どおりに到達できれば 1、到達できなければ 0 を値を与えられる。 $\sum_{i=1}^{k-1} dist(d'_i, d'_{i+1})$ は総移動距離の評価値であり、距離が長いほどスケジュールの評価値が下がる。 γ は道路状況を表すパラメータで、渋滞による影響を表現する。走行経路にユーザの希望目的地が全部含まれ、移動距離が短いほど式の評価値は高くなる。ただし、ユーザ入力された時間どおりに実行不可のスケジュールは、評価値が高くても選ばれることはない。GA によりユーザスケジュール算出後、解がある場合、ユーザにそれを提示し、解がないとき予約失敗の旨をユーザに提示する。

アルゴリズム: 遺伝的アルゴリズムによるユーザスケジュール算出の流れは以下の流れである。(2)–(5) は繰り返し実行される。

- (1) 初期化: ユーザの希望目的地 (経由地) をつなげる EV ステーションをランダムに並べた染色体を個体数分生成する。
 - (2) 一点交叉: 両親となる個体を集団からランダムに選び一点交叉を行う。このとき、交換する染色体に同じ EV ステーションが含まれていたら削除する。これによって同じ EV ステーションが複数含まれないようにする。
 - (3) 突然変異: 同一個体の染色体で遺伝子の順番をランダムに変更する。
 - (4) ルーレット選択: 集団内で最大の評価値を持った個体をエリートとして保存する。続いてルーレット選択によって選択された個体を集団に加え、新しい集団とする。
 - (5) 評価: 式 (4) で定義された評価関数に従って、個体の評価を行う。集団内で最大の評価値を持った個体をエリートとして保存する。続いてルーレット選択によって選択された個体を集団に加え新し集団とする。
- 提案手法実装の流れを図 4 に示す。まず、システムで

利用される地図, EV, ブースを初期化し, A*アルゴリズムを利用してあらかじめ任意の2地点間の最短経路を計算しておく. 初期化処理後, ユーザの入力を受け付ける. 入力情報を整えた後, GA を用いてユーザスケジュールを算出する. 解が見つかるまで一定回数探索し, ユーザ予約を受理または却下後, リソース情報を更新し, EV 再配置の必要性を確認し, 必要であれば再配置スケジュールを出力する.

一定回数以上繰り返し実行し, 最も評価値の高いスケジュールを解とし, ユーザに提示する.

再配置スケジュール算出部

再配置するために, 焼きなまし法を用いる.

- 個体表現: 供給ステーション数分の長さを持ったリスト. 各要素で再配置先となる需要ステーションまたは0(再配置しない)を選択する. たとえば個体 $R = [demand, 0]$ であれば供給ステーション数は2であり, 最初の供給ステーションから需要ステーション demand へ EV を再配置, 次の供給ステーションからは再配置しないことを表す.
- 近傍探索: 2カ所の供給ステーションを選択し, それらの再配置先の需要ステーションを入れ替える.
- 評価関数: 焼きなまし法で利用する個体 R の評価関数 $f(R)$ を式 (5) に示す. 再配置を実行する時刻を t , 供給ステーションを $D_s \in D$, 需要ステーションを $D_d \in D$ とする.

$$f(R) = \frac{1}{a \times var(t, D) + b \sum_{i=1}^k dist(sp_i, dm_i)} \quad (5)$$

ここで, $var(t, D)$ は時刻 t における全 EV ステーションの余裕度の分散を表し, $dist(t, sp_i, dm_i)$ は EV ステーション $sp_i \in D_s$ と $dm_i \in D_d$ の移動距離であり, a, b は各項に対する道路状況重み係数 (パラメータ)

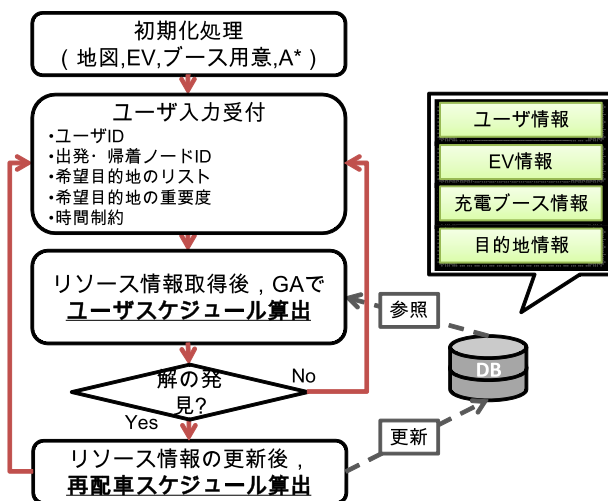


図 4 提案手法実装の流れ

Fig. 4 Implementation of the proposed system.

である. つまり, 各 EV ステーションの余裕度のバラつきが小さいほど, 再配置にとまらぬ移動距離が短いほど, 評価値は高くなる.

● アルゴリズム

- (1) 初期化処理: 各 EV ステーションの余裕度を初期化し, 供給ステーションと需要ステーションを決定する.
- (2) 供給ステーションが複数隣接している場合は最も余裕度の高い EV ステーションを選択し, 供給ステーションが隣接していない場合は再配置を実行しない.
- (3) 焼きなまし法で算出した供給ステーションと需要ステーションの組合せに従い, 再配置を実行する.

5. 評価実験

EVTour の予約受理率, EV 1台あたりの再配置回数, 予約却下率をシミュレーションにより評価する.

5.1 概要

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 EV ステーションに発生させシミュレーションを行う. 各 EV ステーションには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する [24]. 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. 実験で利用した地図データを図 5 に示す. その他実験で使用するパラメータを表 1 にまとめる.

また, 各ユーザ予約の希望滞在時間は 60-90 分, 希望到着時刻はシミュレーション開始時刻から 10 時間以内のランダム時刻である. 希望到着時間帯の指定された目的地や経由地について, n 番目の経由地の希望到着時刻は, シミュレーション開始時刻から $60 \times (n + 2)$ 分後, 希望滞在時間は 60 分である. 各スケジュールごとのパラメータの値は



図 5 JARTIC が公開している東京都心部の地図データ

Fig. 5 Map of Tokyo with congestion information.

表 1 実験のパラメータ

Table 1 Parameters for the experiments.

パラメータ	値	パラメータ	値
ノード数	68	通常時移動速度	40 km/h
リンク数	221	混雑時移動速度	20 km/h
目的地数	68	渋滞時移動速度	10 km/h
充電時間	120 分	バッテリー容量	16 kWh
電費	5 km/kWh	ユーザ目的地数	0-5
EV 台数	5/ステーション	目的地滞在時間	60-90 分
ユーザ数	500-700	事前予約	全予約の 1 割

0-1 の間で選ばれる.

以下の環境でシミュレーションのプログラムを実行した.

- CPU: Intel Core i7 920 (2.66 GHz)
- Memory: 12 GB
- OS: Windows 7 Professional x64
- Language: Java SE 1.6

5.2 評価項目

シミュレーションにより評価する項目について述べる.

- 予約受率率: 全予約に対する, 受理された予約の割合
- 再配置回数: シミュレーションで実行された EV 1 台あたりの再配置回数
- 予約却下率: 同じ道路網, 異なる渋滞状況における予約受理数の差を評価する. この値が低いほど渋滞時でも提案手法が有効といえる.

5.3 比較手法

提案手法と比較を行う手法を 2 つ用意した.

- Do-Nothing (DN): 再配置を実行しない方法
- Max-Allowance (MA): 従来手法 [18]. 供給ステーションの中から余裕度が最大の EV ステーションから, 需要ステーションの中の余裕度が最小の EV ステーションへ再配置する方法.

5.4 実験結果

5.4.1 シミュレーションの平均計算時間

ユーザ数が 500, 600, 700 人に対し, シミュレーションの平均時間はそれぞれ 2.716 s, 3.044 s, 4.106 s だったため, 実用的な時間で演算可能といえる.

5.4.2 スケジュール具体例

ここでは, ユーザによる予約, EVTour が算出したユーザスケジュール, EV スケジュールの具体例を示す. 表 2 に示すように, ユーザは出発・目的 ID, 複数の経由地 ID, 滞在時間, 到着時間帯を入力している. この予約内容に対し EVTour は, 表 3 に示すようなユーザスケジュールを算出した. このユーザは出発地 27 を EV131 で出発し, 最初の経由地 5 へ到着する. 経由地 5 の滞在時間を経て, 再び EV131 で出発し, 希望した到着時間帯に経由地 39 へ到着

表 2 ユーザによる予約の具体例

Table 2 Example of reservation.

予約項目	予約内容
ユーザ ID	12
出発時刻	08:06
出発・目的地 ID	[27, 43]
経由地 ID	[57, 5, 39]
滞在時間 (分)	[72, 78, 75]
希望到着時間帯	10:06-11:06 (目的地 39)

表 3 ユーザスケジュールの具体例

Table 3 Example of user schedule.

時刻	スケジュールの詳細
08:06	出発: EV ステーション 27 (EV131)
08:44	到着: EV ステーション 5 滞在: EV ステーション 5
10:02	出発: EV ステーション 5 (EV131)
10:34	到着: EV ステーション 39 充電開始: EV131 滞在: EV ステーション 39
11:49	出発: EV ステーション 39 (EV191)
11:58	到着: EV ステーション 57 滞在: EV ステーション 57
13:10	出発: EV ステーション 57 (EV191)
13:29	到着: EV ステーション 43

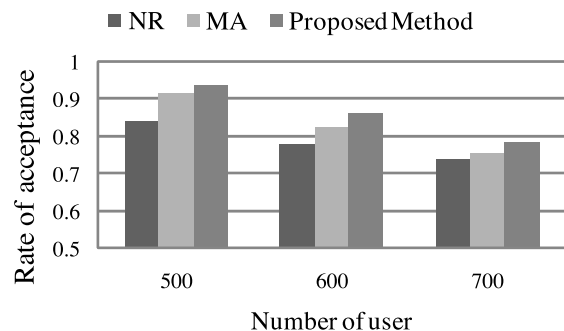


図 6 ユーザ数と予約受率率

Fig. 6 Number of user vs. Acceptance rate.

する. ここで乗車してきた EV131 の充電を行い, 経由地 39 の出発時刻になっても EV131 は充電中のため, EV191 に乗り換え, 最終の目的地まで移動しスケジュールが完了した.

5.4.3 予約受率率

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見る (図 6). 提案手法は DN 法, 従来手法と比較してつね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したことが確認できた.

5.4.4 再配置回数

最適な EV 再配置状況が予約受付率への影響を評価するために, 十分な人数の再配置スタッフがあり, 必要な場所

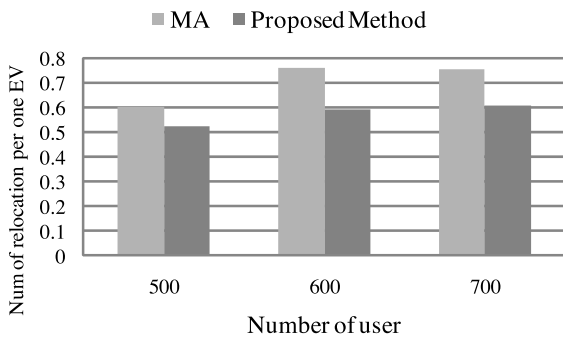


図 7 異なる利用者数における EV 1 台あたりの再配置回数
Fig. 7 Number of user vs. Relocation count.

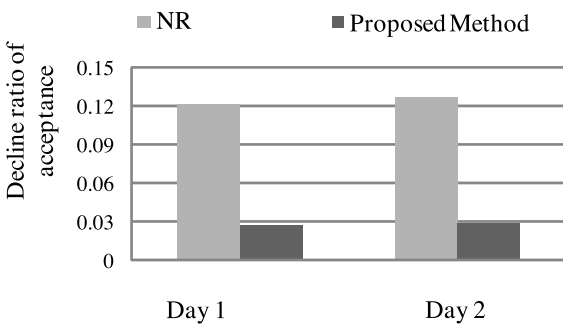


図 8 予約却下率

Fig. 8 Number of user vs. Decline of acceptance rate.

に現れると想定する。

予約受理率同様、ユーザ数を 500 人から 700 人と変化させたとき、EV 1 台あたりの再配置回数の変化を見る (図 7)。提案手法は MA 法と比較して約 15%再配置回数が少ないことが確認された。これは、MA 法がつねに余裕度の高い EV ステーションから、余裕度の低い EV ステーションへ再配置するのにに対し、提案手法は近所を優先して再配置し、遠いステーションへの EV の移動をなるべく避けるようにしていることが原因だと考えられる。

5.4.5 現実道路における予約却下率の評価

本手法は道路状況による影響がどの程度のものかを観測するため、JARTIC より取得した 2 日分の渋滞情報を利用してシミュレーション実験を行った。図 8 では、2 日目は 1 日目より、多少交通量が大きいシナリオとなっている。なお、ユーザ数は 700 人であり、同じタイミングと場所で予約申請を行う。渋滞の発生した道路に再配置しない方式 (NR: No Relocation) および再配置する提案手法 (Proposed Method) の 2 通りを比較した結果、再配置しない方式の予約却下率 12%に対し、提案手法はわずか 3%未満であった。この結果から、提案手法は現実の道路でも良い性能が発揮できると考えられる。

5.5 考察

予約受理率、再配置回数、予約却下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結果、提案手法は

高い予約受理率を達成したことを確認した。一部のステーションの EV 車の余裕度が低くなると、DN は予約申請を却下する。MA は全地域内の最も余裕度の高いステーションから最も余裕度の低いステーションへ EV の再配置を行う。提案手法は配車時間と全域の余裕度を考慮した再配置を行った結果、予約申請受理率が向上したと考えられる。

提案手法は 700 人のユーザに対し、340 台 (目的地数 68, EV 5 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 1 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いえる。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 3 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いえる。

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では用いにくく、比較的時間に余裕がある用途 (観光や買い物など) を想定したユーザに向いていると考える。

6. まとめ

本稿では、EV と片道カーシェアリングを組み合わせ、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。本手法を用いることによって、ユーザはすべての EV ステーションで EV の利用・返却ができ、残り電力量の少ない EV を乗り換えて移動を継続できる。提案システムは、ユーザの予約に対し、走行経路と各 EV ステーションにおける行動 (乗換えや充電) を含むスケジュールの算出部、および EV 台数に余裕のある EV ステーションから不足しているステーションへの EV 再配置スケジュール算出部から構成される。シミュレーションによる評価実験の結果、提案システムは他の手法より少ない配車回数で高い予約受理率を達成できることを確認した。

今後は現実環境における再配置に従事するスタッフの数や位置も考慮する必要がある。また、パークアンドライドによる公共交通機関との連携も考えられる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 16K16046 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 一般社団法人次世代自動車振興センター, 入手先 (<http://www.cev-pc.or.jp/>)
- [2] 一般財団法人自動車検査登録情報協会, 入手先 (<http://www.airia.or.jp/>)

[3] 公益財団法人交通エコロジー・モビリティ財団, 入手先 <http://www.ecomo.or.jp/>

[4] タイムズカープラス, 入手先 <http://plus.timescar.jp/>

[5] Autolib 公式サイト, 入手先 <https://www.autolib.eu/en/>

[6] car2go, available from <http://www.car2go.com/>

[7] 日産自動車株式会社: チョイモビ, 入手先 <http://www.choi-mobi.com/>

[8] Kobayashi, Y., Kiyama, N., Aoshima, H. and Kashiyama, M.: A Route Search Method for Electric Vehicles in Consideration of Range and Locations of Charging Stations, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp.920-925 (2011)

[9] Martin, E.W. and Shaheen, S.A.: Green Gas Emission Impacts of Carsharing in North America, *IEEE Trans. Intelligent Transportation System*, Vol.12, No.4, pp.1074-1086 (2011).

[10] Stilwater, T., Mokhtarian, P.L. and Shaheen, S.A.: Car-sharing and the Built Environment: Geographic Information System-Based Study of One U.S. Operator, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol.2110, pp.27-34 (2008).

[11] 三菱 i-MiEV Web カタログ, 入手先 <http://www.mitsubishi-motors.co.jp/i-miev/>

[12] 日産リーフ Web カタログ, 入手先 <http://ev.nissan.co.jp/LEAF/>.

[13] CHAdeMO, available from <http://www.chademo.com/wp/japan/>

[14] Jorge, D. and Correia, G.: Carsharing systems demand estimation and defined operations: A literature review, *European Journal of Transportation Infrastructure Research*, Vol.13, No.3, pp.201-220 (2013).

[15] 伊志嶺拓人, 赤嶺有平, 遠藤聡志: 通勤車利用型カーシェアリングシステムによるモーダルシフト効果のシミュレーション分析, 情報処理学会論文誌, Vol.51, No.10, pp.1986-1994 (2010).

[16] Martin, E., Shaheen, S. and Lidicker, J.: Impact of Carsharing on Household Vehicle Holdings. Results from North American Shared-Use Vehicle Survey, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol.2143, pp.150-158 (2010).

[17] Barth, M. and Todd, M.: Simulation model performance analysis of a multiple station shared vehicle system, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.7, No.4, pp.237-259 (1999).

[18] Kek, A.G.H., Cheu, R.L. and Chor, M.L.: Relocation simulation model for multiple-station shared-use vehicle systems, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol.1986, pp.81-88 (2006).

[19] Smith, S.L., Pavone, M., Schwager, M., Frazzoli, E. and Rus, D.: Rebalancing the rebalancers: Optimally routing vehicles and drivers in mobility-on-demand systems, *American Control Conference (ACC)*, pp.2362-2367 (2013).

[20] Uesugi, K., Mukai, N. and Watanabe, T.: Optimization of Vehicle Assignment for Car Sharing System, *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems*, pp.1105-1111 (2007).

[21] Barth, M., Todd, M. and Xue, L.: User-Based Vehicle Relocation Techniques for Multiple-Station Shared-Use Vehicle Systems, *Transportation Research Board 80th Annual Meeting* (January 2004).

[22] Febbraro, A.D., Sacco, N. and Saeednia, M.: One-Way Carsharing: Solving the Relocation Problem, *Trans-*

portation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol.2319, No.4, pp.113-120 (2012).

[23] 武内博孝, 谷内利明: カーシェアリングにおける小型 EV 導入による CO2 削減効果, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.110, No.65, pp.37-42 (2010).

[24] 日本道路交通情報センター: JARTIC, 入手先 <http://www.jartic.or.jp/>.



上田 知幸

2014 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科課博士前期課程修了。修士。EV 車のカーシェアリングに関する研究に従事。



柴田 直樹 (正会員)

1996 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。2001 年同大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。2001 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手。2004 年滋賀大学経済学部助教授。2012 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科準教授, 現在に至る。モバイルコンピューティングに関する研究に従事。IEEE 会員。



川井 明 (正会員)

2003 年, 2005 年, 2008 年にそれぞれ大阪大学基礎工学部卒業, 同大学院情報科学研究科博士前期課程修了, 同大学院情報科学研究科博士後期課程修了。2008 年より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教。2013 年より大阪大学サイバーメディアセンター特任助教。2014 年より滋賀大学経済学部准教授, 現在に至る。博士(情報科学)。モバイルアドホック, 車車間通信に関する研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会各会員。



伊藤 実 (正会員)

1977年大阪大学基礎工学部卒業, 1979年同大学院基礎工学研究科博士前期課程修了. 1979年より大阪大学基礎工学部助手. 1986年より同講師. 1989年より同助教授. 1993年より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授, 現在に至る. 工学博士. データベース理論, 効率的なアルゴリズム開発等の研究に従事. ACM, IEEE, 電子情報通信学会各会員.