

充電設備の利用状況を考慮した電気自動車の最適経路選択

内田 英明^{1,a)} 藤井 秀樹¹ 吉村 忍¹

概要：電気自動車はその高い環境性能から注目を集めている。しかし、航続距離の短い電気自動車は長距離移動において中間地点での充電が必要であり、充電設備が限定的である現状では充電待ちが発生している。そこで本研究では、充電設備での利用状況を共有できるシステムを仮定した EV の経路選択法を提案し、マルチエージェント交通流シミュレーションによる検討を行う。また、システムの普及率を変化させることによる影響を考察する。

Optimal Route Selection of Electric Vehicle Considering Charging Station Status

UCHIDA HIDEAKI^{1,a)} FUJII HIDEKI¹ YOSHIMURA SHINOBU¹

1. はじめに

運輸セクターにおける低炭素化・省エネルギー化の要請が高まる一方、2014年時点においては自動車だけで国内の二酸化炭素排出量の14.7%・エネルギー消費量の20.5%[1]を占めている状況であり、環境負荷は依然として高い水準にあるといえる。このような現状のなか、高い環境性能を有する電気自動車 (electric vehicle, 以下 EV という) が注目を集めており、市場導入も本格化している。しかし、EV にはガソリン車と比較した際の航続距離の短さや急速充電ステーション (charging station, 以下 CS という) の未整備、充電時間の長さなど、普及に向けては複数の課題が残っており、解決に向けて多くの研究・開発がなされている。これらの問題はそれぞれが複合的に関連しあっていることや、交通現象そのものが異なる属性や目的を持つ多数の車両の相互作用の結果発生するものであることから、現実社会での検討は困難であり、マルチエージェントシミュレーションによるアプローチが妥当であると考えられる。

具体的な取り組みとしては、消費電力量を考慮した経路選択が挙げられる。交通シミュレーションにおいて自動車の経路選択は非常に重要な要素であるが、EV における要

請はガソリン車のそれとは大きく異なり、常に充電残量 (state of charge, 以下 SOC という) に留意したものとなるほか、立ち寄る CS が不特定であるという特徴を持つため、既存の手法をそのまま適用することは困難である。

また、CS への立ち寄りという観点では、EV の充電はガソリン車の給油と比較して長いことから、行楽シーズンなど交通需要の高まる時期には各地で充電待ちが発生している [2]。これは充電容量の制約から無充電で長距離移動を実現することが困難であることに加え、1箇所の CS に複数台の充電器が設置されている事例は依然として少ないことも原因である。

そこで本研究では、EV と CS の普及に関連する現実社会での実験が困難な問題について定量的な検討を行う準備として、交通シミュレーション環境において EV エージェントを定義し、CS への立ち寄りを考慮した最小消費電力経路選択アルゴリズムを提案する。著者らが開発してきた知的マルチエージェント交通流シミュレータ MATES[3][4] の EV エージェントにこのアルゴリズムを適用することにより、既存手法と比較し効率的な CS への立ち寄りを実現し、走行中に充電切れを起こすような状況を回避できることを示す。加えて、CS の利用状況を参照するサービスを仮定し、一定以上の情報共有が達成されれば CS の未整備にも対応可能であることを示す。

¹ 東京大学大学院工学系研究科
School of Engineering, The University of Tokyo

^{a)} uchida@save.sys.t.u-tokyo.ac.jp

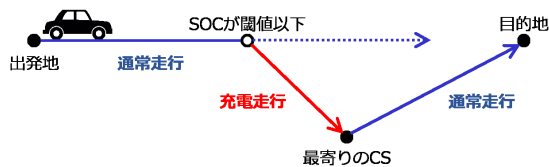


図 1 アドホック手法の概要

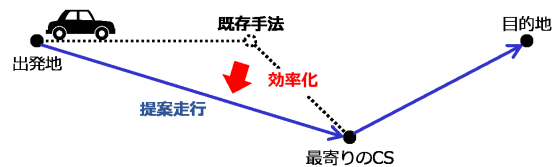


図 2 提案手法の概要

2. 既存研究

自動車の経路選択において経由地の考慮が必要になるのは、所与の地点を経由する場合と不特定の地点を経由する場合、の2通りに分類できる。前者は与えられた経由地の数・順序に応じて問題を分割して解くことができ、得られた部分経路を統合することによって容易に経路を求めることができる。一方、本研究で対象とするのは後者である。ここでの経由地は例えばCSであり、経由地候補集合の数や位置は所与である。ただし、出発地から目的地まで充電なしに移動可能であれば経由は不要であるし、移動不可能であれば必要に応じて経由を実行する。このとき経由地の数およびその順序は任意である。

上述した問題設定は主にマルチエージェント交通シミュレーションの分野において取り組まれており、離散事象モデルを用いた手法 [5] ではCSの立ち寄りを含めた旅行時間を低減した。この手法では過去の交通状況とCSの利用状況を参照することで効率的な経路選択を実現したものの、時々刻々の消費電力を考慮せずEVの航続距離を確定的に扱っていることから、市街地での移動や渋滞現象を適切に評価できない可能性がある。

一方消費電力を考慮したものとしては、メゾモデルを用いた手法 [6]、マイクロモデルを用いた手法 [7][4] などが検討されており、出発地から目的地までの移動距離の最小化が目的関数となる。このとき、SOCが任意に設定された閾値を下回ると、目的地を最近傍のCSに変更し充電を行うという、ある種のアドホックな手法となっている。このアドホック手法の概要を図1に示す。

図中の通常走行では目的地までの最短経路を選択し、充電走行では最寄りのCSへの最短経路を選択していることを表している。アドホックな手法では既存のガソリン車を対象としたモデル化を単純に拡張することによって実現可能であるものの、経路選択において消費電力をコストとして扱っていない。また目的地をCSに変更するトリガーとなるSOCの閾値は、周囲の交通量やCSの利用状況によらず固定であり、手法の性能は環境に大きく依存すると考えられる。

3. 提案手法

そこで本研究では、CSへの立ち寄りを考慮した最小消費

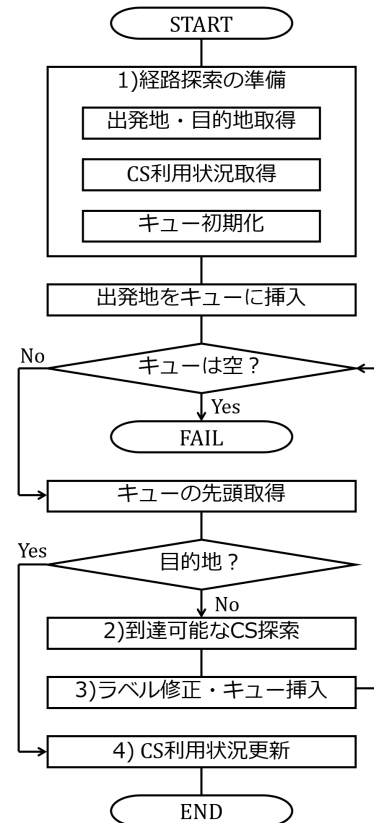


図 3 提案手法のフローチャート

電力経路選択手法を提案する。はじめに出発地・目的地・CSのみをノードとして構成されるグラフを経由地グラフと定義し、前処理としてこの経由地グラフを生成する。続いてこの経由地グラフ上で各EVエージェントに対し経由地を含めた経路を決定し、CSの利用状況を更新する。この手法では消費電力量を考慮した経路を選択できるほか、既存のアドホック手法における通常走行と充電走行がシームレスに連続するため、効率的な経路を生成できる。

提案手法の概要を図2に、フローチャートを図3に示す。次節以降、各ステップにおける詳細を述べる。

3.1 手法の概要

3.1.1 経路選択の準備

道路ネットワークとしてグラフ $G = (V, E)$ が与えられているとき、あるシミュレーションステップにおいて新たにEVエージェントが発生すると、経由地グラフ $G' = (V', E')$ を生成するための準備として出発地 s ・目的地 t を取得す

る。ここで CS の集合を $C = \{c_1, c_2, \dots\}$ とすると、経路地グラフにおけるノード集合は $V' = \{s, t, c_1, c_2, \dots\}$ となる。また現状の各 CS の利用状況を取得する。提案手法では Dijkstra 法に従って経路地グラフを探索していくため、探索の順序を決定するため優先度付きキューを用意し予め初期化しておく。

3.1.2 到達可能な CS の探索

経路探索が開始されると、キューから先頭ノードを取得し、消費電力量推定式 (1), (2) に基づいた最小消費電力経路探索により無充電で到達可能な経路地候補を検索する。このとき、右辺の各項は順に転がり摩擦抵抗・慣性抵抗・空気抵抗・勾配抵抗・電装品等の消費を表す。また、 m は質量 [kg], g は重力加速度 [m/s^2], v は速度 [m/s], a は加速度 [m/s^2], τ は転がり摩擦係数, θ は勾配, k は回転部慣性質量係数, ρ は空気密度 [kg/m^3], C_d は空気抵抗係数, A は前面投影面積 [m^2] である。

$$F = ((F_{roll} + F_{int} + F_{aer} + F_{gra}) + v + F_{acc}) \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$\begin{cases} F_{roll} = \tau mg \cos \theta \\ F_{ine} = (1 + k)ma \\ F_{aer} = \frac{1}{2}\rho C_d A v^2 \\ F_{gra} = mg \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

また、CS の利用状況を参照し、到達可能であっても充電待ちが予想される場合には候補から除外する。ただし、経路地候補が全て除外されてしまう場合には利用状況の参照を行わない。本研究では利用情報として、現在 CS に空きがあるかという満空情報と、CS 探索中の EV が当該 CS に到着予定の時刻に空きがあるかという予約情報の 2 つを仮定する。

3.1.3 CS のラベル修正とキューへの挿入

前節の探索により得られた到達可能な経路地候補に対し、出発地からのコスト（消費電力量）前の探索ステップよりも小さくなるものについてラベルを修正する。続いてラベル修正のあったノード集合をキューに追加し、探索ステップをインクリメントする。

3.1.4 CS の利用状況登録

キューの先頭ノードが目的地であった場合、探索ステップを終了する。この時点で経路地グラフ G' 上に生成された探索木は目的地まで到達しているため、得られた経路のシーケンスを EV エージェントの出力経路とする。また経路の決定した CS に対し、満空情報は充電開始時、予約情報は経路決定時に登録する。

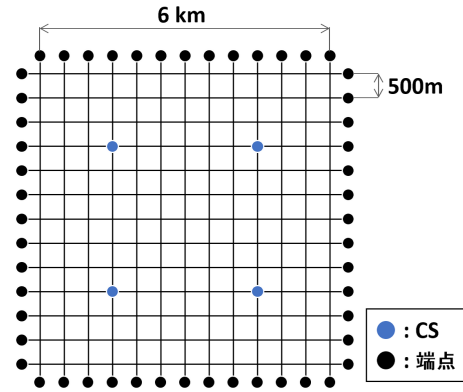


図 4 実験環境

3.2 既存手法との関係

本研究は、EV と CS の普及に関連する現実社会での実験が困難な問題について定量的な検討を行う準備として、交通シミュレーションに EV エージェントを実装するものである。提案した経路選択手法は、マルチエージェント交通シミュレーションにおいて、(i) 時々刻々の消費電力を考慮、(ii) 恣意的なパラメータ設定が不要、(iii) CS の利用状況を参照、という特徴を備える。これらは EV 特有の挙動をシミュレーションで評価する上で欠かせないものであるものの、全てを満たす既存研究は報告されていない。

4. 数値実験

本章では、前節で述べた提案手法の特徴のうち (ii) 恣意的なパラメータ設定が不要、(iii) CS の利用状況を参照という 2 点にフォーカスし数値実験を実施する。実験環境は図 4 に示す格子状の道路ネットワークとする。縦横 6km 四方、格子間隔は 500m、ノード数 233、リンク数 380、CS 数は 4 である。また、EV エージェントについては国内での燃費・電費算出のための測定方式である JC08 走行モード [8] を適用し、事前実験により現実的なパラメータセットを獲得した。

4.1 アルゴリズムの基本性能

はじめに、CS の利用状況参照の効果を排除するため、CS の最大収容台数を無制限とする状況でアドホックな手法と提案手法の比較を行う。実験設定は以下のとおりとする。

エージェントの発生台数は、ガソリン車が各端点から 45[台/h], EV が各端点から 5[台/h], エージェントの目的地は発生時にランダムに決定されるものとした。EV の電池容量は 1.05[kWh] とし、発生時の SOC は 33%~80% の一様分布に従う。シミュレーション時間は 4 時間とし、各ケース 10 試行の平均を評価する。アドホックな手法は CS への迂回を開始する SOC の閾値を 10%~30% で 5% 刻みの 5 ケースとした。図 5 には、縦軸左にシミュレーション領域内の消費電力量、縦軸右に充電切れを起こした EV の割

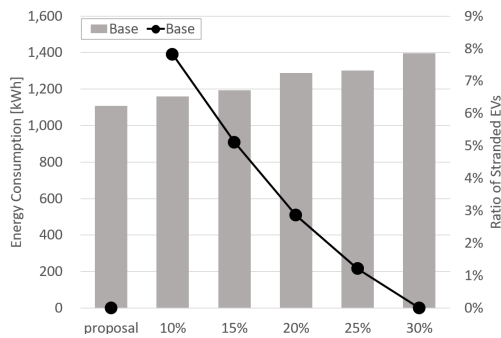


図 5 基本シナリオにおける比較

合をプロットし手法間の性能を考察するものとする。

アドホックな手法については、閾値が増加するに伴い消費電力量も増大し、一方で充電切れを起こす EV の割合は低下している。このトレードオフ関係は閾値が安全率に対応していることに起因する。閾値が大きいほど保守的な経路選択であり、CS に立ち寄るために積極的に迂回が発生する。結果として EV 全体での消費電力量は増すが、充電切れを回避できる可能性が高くなる。また、閾値を 30% としたケースでは充電切れを起こす EV の割合は 0% となっているが、これはネットワーク上のどの地点で充電走行に切り替わったとしても、SOC が 30% あればいずれかの CS に必ず到着できるためである。一方、提案手法はアドホックな手法の全てのケースよりも消費電力量が小さく、また充電切れの割合は 0% となった。消費電力量の小ささは無駄な迂回行動が発生しなくなったことによるものであり、結果として充電切れも発生しなかったものと考えられる。

4.2 CS 利用状況の共有効果

続いて、CS の利用状況の共有効果を確認するため CS の最大収容台数を 3 台とし、参照する情報を満空情報のみ、予約情報のみのシナリオに分けて実験を行う。また、それぞれの情報にアクセス可能な EV の割合を変化させることで、情報提供サービスの普及率が EV にどのような影響を与えるかを考察する。実験設定は以下のとおりとする。

エージェントの発生台数は、ガソリン車が各端点から 45[台/h]、EV が各端点から 5[台/h] を基本的な設定とし、EV の発生台数を 1.5 倍、2 倍とした 3 シナリオを考える。また、情報にアクセス可能な EV の割合を 0%~100% で 25% 刻みの 5 ケースとする。エージェントの目的地は発生時にランダムに決定されるものとし、EV の電池容量は 1.05[kWh]、発生時の SOC は 33%~80% の一様分布に従う。シミュレーション時間は 4 時間とし、各ケース 10 試行の平均を評価した。図 6 には満空情報を参照するシナリオ、図 7 には予約情報を参照するシナリオの結果を示す。ここで縦軸は EV の充電待ち時間、横軸は EV 交通量別の 3 ケースをプロットし、普及率の影響を考察するものとする。また、比較として閾値を 30% としたアドホックな手法

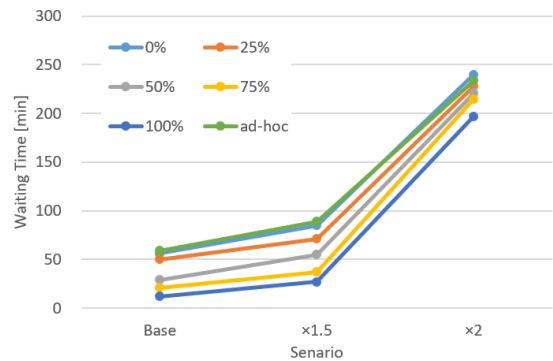


図 6 満空情報の共有効果

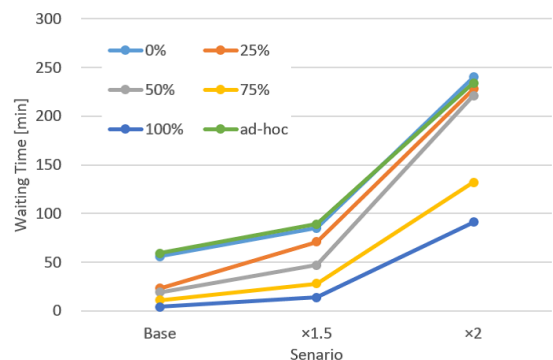


図 7 予約情報の共有効果

の結果も示す。

両実験においてアドホックな手法及び提案手法の 0% のケースは同じ値をとっており、全ての発生交通量シナリオにおいてどちらかが最大の充電待ち時間となっていることから、情報提供の効果が存在することが示されている。これは全てのシナリオにおいてサービスの普及率が増加するにつれ充電待ち時間が増加していることから明らかである。

一方、満空情報を利用した実験では交通量が増加するとともに各ケースの待ち時間は収斂したのに対し、予約情報を利用した実験では普及率の高い 75% と 100% のケースにおいて特異な挙動が見られており、共有される情報の質によって効果が異なることを示している。これは、満空情報があくまで現時点での情報であるのに対し、予約情報は未来の見込みの情報であることに起因する。今回実験で利用した格子状のネットワークでは比較的正確な旅行時間の推定が可能であったことから、予約情報の利用効果が相対的に大きくなっているものと考えられる。

また、本実験において EV の発生台数が EV の普及率を、情報にアクセス可能な EV の割合を情報提供サービスの普及率とみなした場合、EV の普及が進んでいない状況においては、実現可能性の高い満空情報によるサービスで十分な効果が得られる可能性が高く、EV の普及が進捗し CS の整備状況が圧迫されるような状況では予約情報によるサービスを検討する必要があると解釈することが可能である。

5. まとめ

本研究ではEVの普及に向けた課題解決のひとつとして、EVを仮定した交通シミュレーション環境における充電行動を考慮した経路選択アルゴリズムを提案した。

数値実験では、既存のアドホックな手法を比較対象として消費電力量と充電切れ率による評価を行った。アドホックな手法は閾値を小さくすることで効率性が向上する一方、充電切れを誘発するため確実性が低下する手法であることから、提案手法のようにパラメータを排除できる手法の優位性が示されたといえる。続いてCS利用状況の共有効果に関する検討を行った。満空情報・予約情報ともにEVの充電待ち時間を低減させることを示したが、その効果には差異がみられた。特に交通量の多いシナリオにおいては、現時点での情報である満空情報を利用しても待ち時間は低減せず、未来の情報である予約情報において非常に高いサービス普及率を仮定したケースでのみ効果が見られた。

提案した手法を交通シミュレーションに実装することで、EVやCSの普及に関連する課題についての仮想的な社会実験が可能となった。一方で、運転者に対する情報提供サービスについては更なる充実が予想されるため、CSへの分散誘導等に向けたより効果的な手法の検討が重要である。

謝辞 本研究はJSPS科研費15H01785の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- [1] 経済産業省：平成26年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2015）（2015）
- [2] 日本充電サービス：高速道路設置の急速充電器の混雑状況（2016）
- [3] Yoshimura, S.: MATES: Multi-Agent Based Traffic and Environment Simulator - Theory, Implementation and Practical Application, *CMES: Computer Modeling in Engineering and Sciences*, Vol. 11, No. 1, pp. 17–25 (2006)
- [4] 藤井 秀樹, 吉村 忍, 鈴木 将史：現実的な車両間相互作用に基づく電気自動車の交通流シミュレーション, *電気学会論文誌 C*, Vol. 133, No. 9, pp. 1687–1693 (2013)
- [5] de Weerd, M. M., Stein, S., Gerding, E. H., Robu, V., and Jennings, N. R.: Intention-aware routing of electric vehicles, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 17, No. 5, pp. 1472–1482 (2016)
- [6] 田中 伸治, 矢野 圭二郎, 大口 敬, 中村 文彦, 王 銳：交通シミュレーションを用いた電気自動車（EV）充電スタンド配置の検討, 第46回土木計画学研究・講演集（2012）
- [7] Hiwatari, R., Ikeya, T., and Okano, K.: A road traffic simulator to analyze layout and effectiveness of rapid charging infrastructure for electric vehicle, in *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pp. 1–6 (2011)
- [8] 国土交通省：道路運送車両の保安基準の細目を定める告示別添42（軽・中量車排出ガスの測定方法）（2012）