

交通シミュレーションによる充電設備の最適配置の提案

Efficient Placement of Charging Equipments by Multi-Agent Traffic Simulation

内田 英明 *¹
Hideaki Uchida吉塚 裕生 *¹
Yuki Yoshiduka藤井 秀樹 *¹
Hideki Fujii吉村 忍 *¹
Shinobu Yoshimura*¹ 東京大学大学院工学系研究科

School of Engineering, The University of Tokyo

In recent years, the introduction of electric vehicles has been desired from the viewpoint of the growing interest in environmental load. However, it is important to develop sufficient charging equipments to disseminate electric vehicles with shorter cruising distances than gasoline powered vehicles, and data-driven methods such as Voronoi division and k-means clustering have been proposed for the placement plan. Meanwhile, simulation-driven methods that can take account of the microscopic influence between vehicles still have been little. In this paper, we propose an efficient placement method based on multi-agent traffic simulation by introduction of sub node, ghost-EV and improvement of scoring. As a result of simulation in the center of Wakayama prefecture, it is shown that proposed method is effective in the real network and in unsteady traffic flow with changing traffic volume.

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、2030年時点における政府のEV普及目標が16%であるにも関わらず、2015年現在の保有台数ベースでの普及率は1%以下となっている[2]。この原因としては、EV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、充電料の価格や充電時間の長さなど、普及に向けて解決すべき複数の課題が残っているためである。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CSの配置計画が挙げられる。EVの充電はガソリン車の給油と比較して時間を要するため、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おり[3]、CSの配置と実際の充電需要には依然として乖離がみられる。

そこで本研究では、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、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[4][5]においてEVエージェントを定義し、この環境を利用し効率的なCS配置手法を提案する。また和歌山県中心部の現実的なネットワークの上で数値実験を実施し、提案手法が既存手法と比較しEVの総走行時間・距離をともに改善させることを示す。

2. 関連研究

2.1 データ駆動型の配置手法

CSの配置計画にあたり、十分な量のデータが利用可能な場合の先行研究としては、ネットワークボロノイ分割によるものやk-means法によるクラスタリングなどのデータ駆動型の配置手法がある。利用するデータは人口密度や自家用車数といったEV利用者の密度を仮定できる情報と、トリップデータなどEVの移動経路やその頻度を仮定できる情報に大別される。

ネットワークボロノイ分割では道路ネットワーク上で重み付きボロノイ図を定義し、ボロノイ領域内の充電需要を各母点が担当するものとする。車両の平均移動距離を最小化することでCSの配置を決定することができる。またk-means法ではネットワーク上に充電需要をマッピングしクラスタリングを行うことで、各クラスタの重心にあたる箇所にCSを配置することとなる。

2.2 シミュレーション駆動型の配置手法

前節で述べたデータ駆動型の配置手法は充電需要を大域的な配置計画策定の際には有用であるものの、車両同士の相互作用や個々のEVの消費電力状況など、微視的な指標に関して考慮することが困難であった。これに対し、交通流シミュレーションの出力結果の利用を前提とするシミュレーション駆動型の配置手法では、微視的な指標に基づくCS配置を実現することが可能である。

田中らはメゾモデルの交通流シミュレータ上でEVを走行させ、充電残量(state of charge, 以下SoCという)の低下した車両の座標を特定し、k-means++法によりCSの配置を決定した[6]。このとき、各EVのSoCを考慮することにより、クラスタの重心に辿り着けない車両が存在する場合にはクラスタを追加することで、適切なクラスタ数についても同時に検討することが可能である。またHiwatariらはミクロモデルの交通流シミュレータを開発し[7]、SoCの低下した車両が近傍のCSを目指しながら移動経路上の道路セグメントに順次スコアリングを行う手法を提案した[8]。このスコアは顕在化した充電需要に対応しており、スコアの高い地点ほど効率的なCS配置候補となる。

連絡先: 内田英明, 東京大学大学院工学系研究システム創成学専攻, 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1, 03-5841-1864, uchida@save.sys.t.u-tokyo.ac.jp

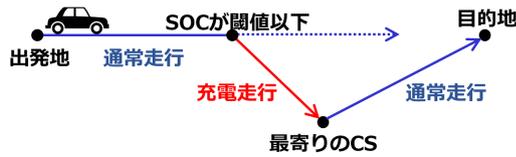


図 1: 走行モードの切り替え

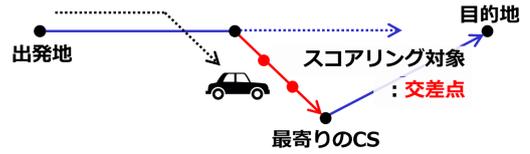


図 2: 既存手法の概要

3. 提案手法

本研究では、シミュレーション駆動型の CS 配置手法として Hiwatari らのスコアリング手法に着目する。この手法は EV の消費電力など重要な指標を評価することができる他、配置候補地点が必ず道路ネットワーク上に現れるという他の手法にはない優れた性質を持つものの、必ずしも効率の良い解が得られるとは限らないという問題があった。そこで本章では、手法の前提となる EV のモデル化についてまとめ、スコアリングアルゴリズムを改良した手法を提案する。

3.1 EV の走行モード

EV はガソリン車に比べ航続距離が短いことから、移動途中での充電行動のモデル化は重要である。EV を含む交通流シミュレーションの多くは、ガソリン車の経路選択行動の自然な拡張して、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 に変更するという、ある種のアドホックな実装を行っている。このとき、本来の目的地までの最短経路を走行することを通常走行モード、充電のために一時的に CS に向かうことを充電走行モードと定義する。これら 2 つの走行モードの切り替えに関する概要を図 1 に示す。

3.2 SoC 更新式

EV はエンジンよりも大きなトルクが得られるモーターによって走行しておりギアチェンジが不要であるため、その仕事量は式 (1), (2) に示す物理式により高精度で推計可能であることが知られている [9]。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。

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

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

ただし、実際の消費電力量には機械損失が加味されるほか、SoC による性能の劣化や回生ブレーキによる影響も知られている [10]。そこで各々の影響について式 (3) のとおり考慮することとする。ここで、 η は機械損失率、 C は変換効率、 R は回生率、 SoC は充電残量である。

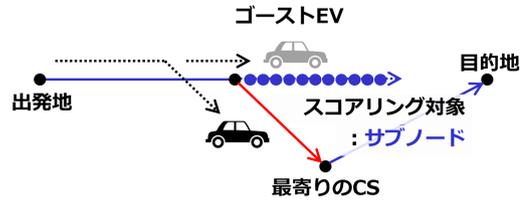


図 3: 提案手法の概要

$$E = \begin{cases} \frac{1}{\eta} F \cdot C(SoC) & F \geq 0 \\ \eta F \cdot R(v) & F < 0 \end{cases} \quad (3)$$

3.3 スコアリング

既存のスコアリングアルゴリズムは、各 EV エージェントが充電走行中の経路に対し次の式 (4) に従って次々とスコアを累積するものである。ここで S_i は充電走行開始地点から i 番目に通過する交差点 i におけるスコアであり、 d_i は交差点 i と最近傍の CS のユークリッド距離である。

$$S_i = d_i \quad (4)$$

これに対し、提案するスコアリングアルゴリズムでは、各 EV エージェントが充電走行モードに移行する際、SoC が閾値を下回らなければ本来通常走行していたはずの経路に対し式 (5) に従ってスコアを累積するものである。 S_j は充電走行開始地点から j 番目に通過するはずであったサブノード j におけるスコアであり、 p_j はサブノード j と最近傍の CS の経路長である。また w は充電残量に関する重み関数、変数 ΔSoC_j は充電走行開始地点からサブノード j までの SoC の減少量を範囲 $[0, 1]$ に正規化した値である。

$$S_j = p_j w(\Delta SoC_j) \quad (5)$$

ここで、サブノードとは 2 つの交差点を接続する道路を任意の区間に等分割する仮想的な点である。また、提案手法では通常走行していたはずの経路に対するスコアリングを実行するため、充電走行開始地点において、仮想的な EV (以降、ゴースト EV という) を生成し、EV 本体は充電走行を、ゴースト EV は通常走行を継続する。ゴースト EV は充電走行開始地点における EV 本体のステータスを全て継承するが、以降の SoC 更新等は独立に実行する。加えてゴースト EV は他の車両から認知されることなく、周辺の交通環境に影響を与えないエージェントである。

既存手法及び提案手法の概要をそれぞれ図 2, 3 に示す。

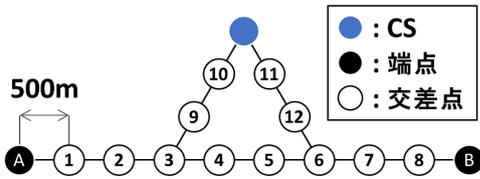


図 4: 単一 CS ネットワーク

4. 数値実験

本章では、提案手法の効果を確認するため、単一 CS の単純なネットワークにおいて既存手法を含めたいくつかのケースの実験を行う。また、現実的なネットワーク・交通量に対しての有効性を確かめるため、和歌山中心部に対して適用し EV の旅行時間・旅行距離について評価する。

4.1 実験 1：単一 CS ネットワーク

実験に使用する道路環境を図 4 に示す。ノード数 15・リンク数 15，うち車両発生端点は A・B の 2 箇所，CS はネットワーク中央上部の 1 箇所のみである。EV エージェントは両端点からポアソン分布に従って 100[台/h] 発生し，それぞれ反対側の端点へ向かう。このとき EV の車両性能及び SoC は発生時点で全て同一とし，CS にはわずかに到達できないものとして設定したため，シミュレーション中の EV の充電切れ率は 100% である。ここで表 1 に示す 4 ケースでの実験を行い，得られたスコアが最大となる地点に CS を新設することとした。ただし，式 (5) に示したスコアリングの重み関数 w は予備実験より式 (6) の設定とする。

$$S_j = p_j \cos\left(\frac{\Delta SoC_j \pi}{2}\right) \quad (6)$$

表 1: 実験ケース

	サブノード	ゴースト EV	スコアリング
(a) 既存手法	—	—	式 (4)
(b) 提案手法	○	—	式 (4)
(c) 提案手法	○	○	式 (4)
(d) 提案手法	○	○	式 (6)

実験により得られたスコアの分布を図 5 に示す。図 5 の各ケースにおいてスコアが最大値となった位置はそれぞれ (a) ノード 3，(b) リンク 2-3，(c) リンク 6-7，(d) リンク 4-5 であった。各地点に CS 新設後の EV の充電切れ率は (a)49.2%，(b)48.9%，(c)50.4%，(d)0% となった。

実験の結果より，(a)~(c) のケースで最大スコアとなった地点では，CS 新設による充電切れ率の減少が約 50% であり，片側の車両発生端点からの EV に対してのみ新設の効果が現れている。一方，(d) のケースでは全ての EV に対して効果的であり，提案手法が優位であることを示している。

提案手法の改善点はサブノード，ゴースト EV，スコアリングの 3 点である。以下，それぞれについて考察を加える。
サブノードの導入 既存手法では交差点のみを対象としていたため，スコアの分布が離散的であり (図 5a) ネットワーク全体の傾向を表現できないという問題点があったが，サブノードを導入することで連続的な表現が可能となり (図 5b)，リンク上にスコアの最大値が存在する場合にも対応可能である。

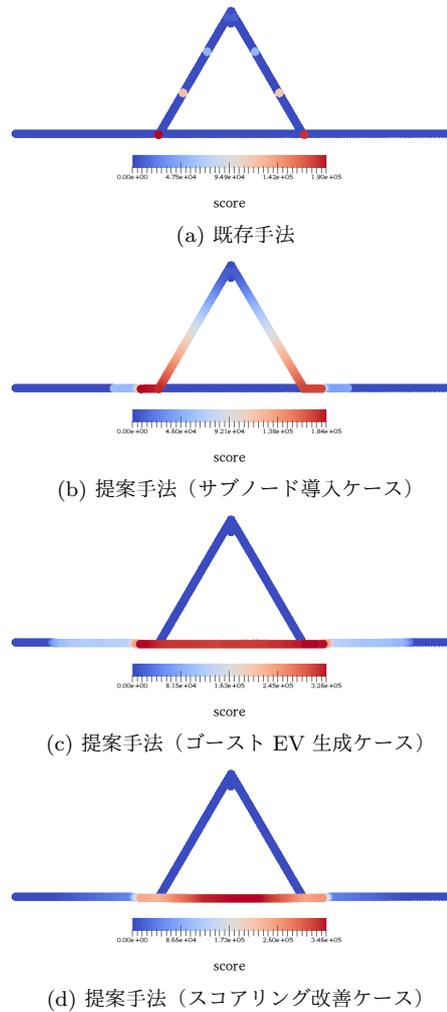


図 5: 各ケースのスコア分布

ゴースト EV の生成 図 2, 3 に示した通り，既存手法では充電走行中にスコアを与える。これは所謂迂回を行っている最中の経路に対して CS を新設する要因となりえる。本来的には当初予定していた最短経路上に新設されることが望ましく，図 5b と図 5c の比較よりゴースト EV によるスコアリングがこの問題を解決していることがわかる。

スコアリング 既存手法は最近傍 CS とのユークリッド距離という単純な指標により CS 配置の分散化を意図していた。提案手法では経路長とすることで道路ネットワークの構造を考慮している他，充電残量に関する重み関数を導入することで道路勾配や交通渋滞といった EV の充電行動に大きな影響を与える要素を表現可能である。また，今回採用した式 (6) は上に凸な関数であり，両端点から発生する EV のスコアを重ねると図 5d のように極大値が存在する点においても良い性質を有する。

4.2 実験 2：和歌山市中心部

ここでは現実的なネットワークでの効果を評価するため，図 6 に示す和歌山県中心部の道路ネットワークにおいて実験を行う。ノード数 1470・リンク数 1346，CS は 13 箇所である。CS の収容台数は全て 1 台とした。また，車両発生台数は交通量調査の結果を基に推定しており，うち 1 割を EV に置き換えることとする。EV の SoC は 30%~80% の範囲でランダムである。既存手法と提案手法 (実験 1 における (a) と (d)) の実験



図 6: 和歌山県中心部の道路ネットワーク

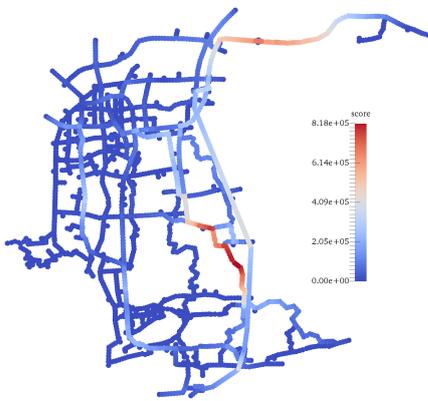


図 7: 提案手法によるスコアの分布

を行い、得られたスコアが最大となる地点に CS を新設する。

実験により得られた提案手法のスコア分布を図 7 に示す。既設 CS のないネットワーク中央部に大きなスコアが分布していることがわかる。また、新設前及び (a)(d) それぞれの結果を基準とした新設後における充電切れ率、シミュレーション中に充電を行った EV の平均移動距離、平均移動時間（充電時間を除く）を表 2 に示す。

表 2: CS 新設前後の評価指標比較

	新設前	(a) 新設後	(d) 新設後
充電切れ率 [%]	0	0	0
平均移動距離 [km]	13.53	13.30	13.06
平均移動時間 [min]	31.13	30.28	29.31

実験の結果より、使用した道路ネットワークには現状でも十分な数の CS が整備されており、少なくとも充電切れについての懸念はないことがわかる。一方、新設による平均移動距離及び平均移動時間については改善がみられ、特に提案手法による (d) のケースにおいて良い結果となっている。これは前節で行った基礎的な実験における考察の通りであり、提案手法が現実の道路ネットワークにおいても十分に適用可能であることを示している。

5. おわりに

本研究では、現実社会での実験が困難な課題の一つとして CS の配置計画に着目し、シミュレーション駆動型の配置手法を改善する手法を提案した。具体的にはサブノードの導入・ゴースト EV の生成・スコアリングの改善を行った。既存手法との比較として、はじめに基礎的な単一 CS のネットワークでの実験を行い、各改善点の基本的な性能を考察した。続いて和歌山県中心部の現実的なネットワークの上で数値実験を実施し、提案手法が既存手法と比較し EV の総走行時間・距離をともに改善させることを示した。今後の課題としては、スコアリングで採用する重み関数の更なる検討や、より長期的な視野に立った多段階での配置計画を策定するための手法の提案が挙げられる。

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] 経済産業省：自動車産業戦略 2014（2014）
- [3] 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）
- [4] 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）
- [5] 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）
- [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] 日渡 良爾, 岡野 邦彦, 池谷 知彦：充電インフラ検討用次世代自動車交通シミュレータの開発-電気自動車用急速充電ステーションの適正配置機能, *電力中央研究所報告 L 研究報告 (10011)*, pp. 1–15（2011）
- [9] Hyodo, T., Watanabe, D., and Wu, M.: Estimation of Energy Consumption Equation for Electric Vehicle and Its Implementation, in *Selected Proceedings of 13th World Conference on Transport Research*, pp. 1–12（2013）
- [10] Zhang, R. and Yao, E.: Electric vehicles' energy consumption estimation with real driving condition data, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 41, pp. 177–187（2015）