

広域停電における EV による基地局への給電に関する実走行によるルート生成技術の評価 Evaluation of Route Generation Technology Through Real-world Driving for Power Supply to Base Stations by EVs During Widespread Power Outages

中野 雄介¹⁾ 菊田 大輔¹⁾ 谷本 凌²⁾ 外山 裕太²⁾ 中村 祐喜²⁾
Yuusuke Nakano Daisuke Kikuta Ryo Tanimoto Yuta Toyama Masaki Nakamura

1 はじめに

自然災害の頻度が増すにつれ [1], 災害時にインフラを維持することがより重要になっている。特に通信サービスは、今や最も重要なインフラの一つである。NTT は災害発生中でも通信サービスを提供し続けるための取り組みを進めている。取り組みの一つとして停電時の通信基地局の電力の維持がある。各基地局は短時間のバックアップ (例えば、約 3 時間) のための緊急用のバッテリーを持っているが、より長時間にわたって基地局のバッテリーを維持するためには外部からの追加の電力供給が必要となる。

電気自動車 (EV) は電力供給のための手段として有望な候補となる。EV は車両からあらゆるものへの電力を移送する V2X (Vehicle-to-Everything) 技術を活用することで、移動型の補助電源として最近注目を集めている。企業は普段は社用車として利用している EV を、非常時には緊急電源供給のために用いることができ、専用の電源車を保持するより低コストに緊急時の電源供給に備えることができる。また、EV は電源車と比較して低価格であるため、より多くの EV を広範囲に配置することができる。EV は一回に運べる電力の量は電源車よりも少ないが、多くの分散した基地局に対し、個別に電力を供給するためには、台数を確保できる EV は適していると考えられる。

近年、V2G (Vehicle-to-Grid) や V2H (Vehicle-to-Home) 技術を緊急電源供給に応用する様々なアプローチが登場している [2, 3, 4]。しかし、その高い設置コストのため、多くの既存の基地局にグリッドシステムを導入することは現実的ではない。さらに、一対一の EV の派遣は基地局への電力供給では非効率である。そこで我々は、これらの既存のアプローチとは異なる、各 EV が複数の基地局に赴き直接電力を供給し、基地局の電力を維持するためのルート生成技術を開発している。 [5]。

本技術は深層強化学習をベースに実現されており、あらかじめ膨大なランダムな基地局や充電ステーションに関する学習データ生成し、これらを用いてルート生成の方策を学習する。その後、学習済みのモデルに対して停電になった基地局やその周辺の営業している充電ステーションのデータを入力すると、学習済みの方策に従って、各 EV が複数の基地局や充電ステーションに巡回するためのルートを生成する。このとき、各基地局の蓄電池が可能な限り枯渇する前に EV が電力供給できる、かつ、EV の蓄電池が枯渇する前に充電ステーションで EV を充電できるルートを生成する (図 1)。

本技術は机上での評価で有効性を確認できているが、今後の実用のためには、実際の EV を本技術が生成する

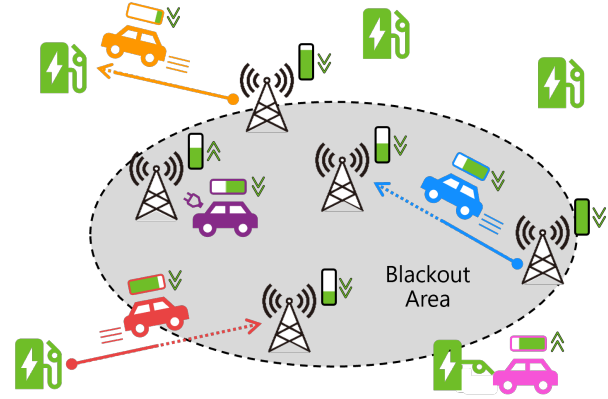


図 1 EV による基地局給電の概要 [5]

ルートに従って走行させ、評価を行う必要がある。そこで、本稿では、本技術によって生成されたルートに従って EV を実際に走行させ、本技術の実用性を評価し、実用上の課題を抽出した結果を報告する。

2 基地局給電のための EV のルート生成技術

これまで基地局への給電のための EV のルート生成技術を開発してきた。本技術の詳細は [5] に譲り、ここでは本技術について簡潔に述べる。

本技術は EVRP (Electric Vehicle Routing Problem) の変種問題を解くソルバーであり、蓄電池が枯渇する基地局の数と EV の移動距離を最小化することを目的としている。基地局へ給電する際、EV はまず (1) 基地局 (または充電ステーション) に移動する。その後、(2) 基地局に給電 (または EV に給電) するための準備を行い、(3) 基地局に給電 (または EV に給電) する。さらに、(4) 撤収作業を行い、(1) 次の基地局 (または充電ステーション) に移動する。ここで、(2)~(4) については自動的に決定され、強化学習におけるアクションスペースは (1) における次の行き先の選択のみとなる。

シミュレーション (強化学習における環境) 上で (1)~(4) を実施することで、本技術は複数の EV に対する訪問順序を生成する。なお、シミュレーションは下記のような前提で実施される。

- シミュレーションの期間 (time horizon) はあらかじめ設定さる
- 基地局の蓄電池は時間に応じて線形に減少する
- EV の蓄電池は走行距離に応じて線形に減少する
- 基地局、EV の蓄電池は最大容量の 80% まで充電される
- (2) 準備と (4) 撤収は固定の時間がかかる
- (3) 給電にかかる時間は給電量に比例して決まる

本技術はルールベースの車両選択機構と Transformer ベースの行き先選択機構とで構成される (図 2)。まず、車両選択機構は最も先に移動補開始する車両を選択す

1) 日本電信電話株式会社 NTT ネットワークサービスシステム研究所

2) 株式会社 NTT ドコモ

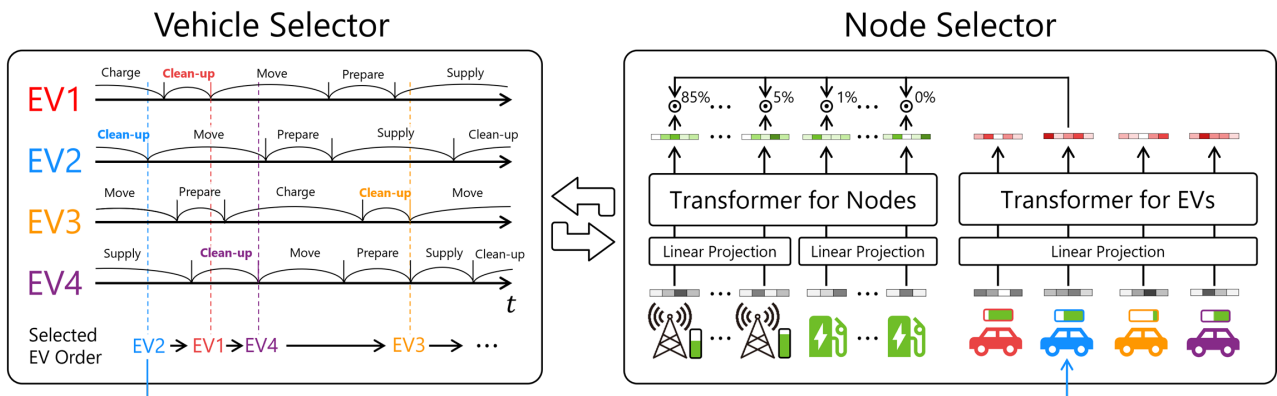


図 2 車両選択と訪問先選択による車両ごとの訪問先順序の生成 [5]

る。つまり、最も先に撤収作業を終了する車両を選択する。その後、行先選択機構は選択された車両の行き先を選択する。これら 2 つの機構による車両とその訪問先の選択を繰り返すことで、EV ごとの訪問先の訪問順序を生成する。

以上の技術について、シミュレーションベースでの評価を行った結果、本技術は既存技術と比較して基地局の蓄電池の枯渇を抑えながら、短い距離で EV を走行させるためのルートを生成できることを確認している。しかし、本技術に含まれるシミュレーションでは、訪問先間の移動時間は直線距離をベースに算出され、この移動時間を用いて各 EV の訪問順序を生成する。また、本机上評価においても直線距離をベースに移動時間を算出する、シミュレーションベースの評価を行っている。一方、実際の道のりは直線ではないため、本技術が生成するルートに従って EV を走行させた場合、想定以上に移動時間がかかり、基地局や充電ステーションへの到着が遅れることで、机上評価の結果より EV や基地局の蓄電池の枯渇が発生することが想定される。

3 EV の実走行による評価

本評価の目的は、本技術の実用時における課題を抽出することである。先に述べたように本技術はすでにシミュレーションベースで既存技術と比較してよいルートを生成できることは確認している。しかし、実際に生成されたルートに従って EV を走行させ、本技術を評価することで、机上では見いだせなかった課題が見つかる可能性がある。

一方、上述のように本技術が用いる移動時間は不正確である。このため、このまま評価を行うと、移動時間の不正確さによる課題の影響が大きいため、この課題以外の実用上の課題が抽出できない可能性がある。そこで、まずは移動時間の不正確さを補正するための対処を行い、その後、本技術の課題抽出のための走行評価を行う。これにより、すでに判明している移動時間の推定に関する課題のみではなく、それを解決したあとに見つかるであろう課題も抽出できるようにする。

移動時間の補正のために、直線距離に対して係数をかけて、実際の距離を近似する方法が考えられる。しかし、文献 [6] によると、地域によってこの係数にはばらつきがあり、特定の係数を全国的に用いることはできない。さらに、走行地域の地図データを用い、その地域での係数が判明したとしても、道路の状況によって走行速

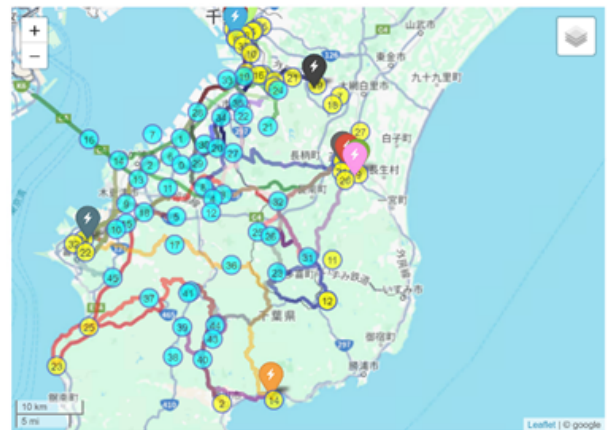


図 3 走行地域の基地局、充電ステーションの位置

度が異なるため、移動時間の補正のためには、その地域の係数と走行速度を取得する必要がある。一方、サポートベクトル回帰を用い、2 点間の移動時間を予測する手法もあるが [7]、あらかじめ交通データを用いて学習する必要があるため、本評価への適用は困難である。

そこで、下記のように 2 回走行することで、評価を進める。

1 回目の走行 本技術をもちいて、直線距離をベースとした各 EV のルートを生成し、ルートに従って EV を走行させる。その際の移動距離、移動速度を測定することで、直線距離から実際の距離を計算するための係数と、実際の走行速度を取得する。

2 回目の走行 1 回目の走行で判明した係数と速度を本技術のパラメータとして設定し、直線距離をベースとした実際の移動時間の近似値をベースにルートを生成する。このようにして生成されたルートに従って EV を走行させ、その際の課題を抽出する。

3.1 評価条件

EV による走行の条件は下記のとおりである。

対象地域 千葉県木更津市、袖ヶ浦市、市原市、君津市が停電した想定

基地局 46 局 木更津市、君津市、市原市、袖ヶ浦市の下図青○(図 3)

充電ステーション 39 か所 千葉市、茂原市、富津市、鴨川市、大多喜町、長柄町、長南町の下図黄○(図 3)

EV 12台 (初期位置は充電ステーションに分散して配置)

生成されるルートの期間 (Time horizon) 24時間

実施期間 2023年12月20日～2024年3月8日

1回目の走行 12月20日～1月24日

2回目の走行 2月15日～3月8日

なお、12台のEVの確保は困難であったため、1台のEVのみを用い、別々の日に12台分のルートを走行し、走行後に各走行時のデータを重畳させることで12台で走行した場合の評価を行った。

EVの走行によって収集したデータは下記のとおりである。

- 1秒ごとのEVの緯度経度、高度
- 5秒ごとのEVのECU (Electronic Control Unit) から取得できるログ (蓄電池残量等)
- EVの乗車人数 (常時2名)、EVの設備 (エアコン、ライト、シガーソケット、ワイパー等) の利用状況など、乗員による乗車状況の記録

評価軸は基地局の蓄電池の枯渇件数とする。これは、本技術は基地局の蓄電池の枯渇を最小化するルートの生成を目的としているためである。移動距離の不正確さがある状態では、本技術のシミュレーションにおける基地局の蓄電池の枯渇件数の想定と、実際に走行した時の蓄電池の枯渇件数との間に差が出てくると想定される。また、その他の理由によっても差が出ることも考えられる。本評価において基地局の蓄電池の枯渇件数を確認することで、実際の走行で想定以上に基地局の蓄電池枯渇が発生していないかを確認し、本技術の課題を抽出する。

一方、本技術の最適化に関する性能はすでに机上評価で確認できているため、本稿では基地局の蓄電池の枯渇件数の絶対値については議論しない。本稿では本技術が生成するルートで生成されたルートでEVを用いて基地局に給電した場合に想定される基地局の蓄電池枯渇件数 (本技術がルート生成時のシミュレーション上での件数) と、実際にEVで走行した場合の件数との乖離を見る。想定以上に蓄電池の枯渇がある場合は、本技術に実用上の課題がどこかにあることを意味する。

なお、本評価のために正常にサービス提供中の基地局を停電の状態にすることはできない。また、サービス提供中の基地局に対し、実際にEVを接続して給電することも、サービスに影響が出る可能性があるためできない。そこで本評価では、EVは本技術が生成するルートに従って基地局や充電ステーション間を走行するが、基地局への給電は行わないこととした。また、EVの給電が必要でない限り、EVへの給電も行わなかった。代わりに、収集された訪問先間の移動時間などのデータをもとに、机上で基地局の蓄電池枯渇件数を算出した。下記に基地局の蓄電池枯渇件数の算出のために用いた、実測値と推定値とをまとめる。

- 実測値：
 - 基地局/充電ステーション間の移動時間 (1)
- 推定値：
 - 基地局/充電ステーションでの準備時間 (2) (準備時間は固定時間とした)

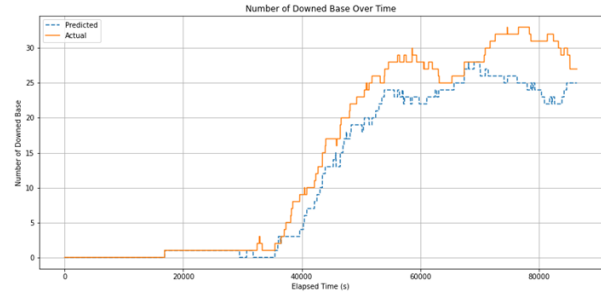


図4 1回目走行時の蓄電池枯渇基地局数の変動

- 基地局/充電ステーションでの充電時間 (3) (到着時の蓄電池の空き容量を算出し、空き容量を埋めるための供給のための時間を算出した)
- 基地局/充電ステーションでの撤収時間 (4) (撤収時間は固定時間とした)

3.2 評価結果

以上の条件でEVを走行させ、走行中のデータを収集し、本技術の評価した。

3.2.1 1回目の走行

1回目の走行時の基地局の蓄電池枯渇件数の変動を図4に示す。横軸が走行開始からの経過時間 (秒) であり、縦軸が蓄電池が枯渇した基地局の件数である。また、点線が本技術がルート生成時に想定していた基地局の蓄電池枯渇件数で、実線がEVの走行データを基にした件数を表す。図4を見ると、想定より実際の走行時の基地局の蓄電池枯渇件数が多いことがわかる。これは先で述べたように、本技術は移動時間の推定に課題があるためである。

図5に1回目走行時のEVの蓄電池残量の変動を示す。横軸は走行開始からの経過時間で、縦軸は各EVの蓄電池の残量を表す。点線は想定、実線は走行データによる見積もりである。図5を見ると、実線と点線とが横方向にずれており、点線より実線の方が遅れていることが分かる。これは、本技術による想定より、実際の移動時間がかかっていることを表す。また、このずれにより、2台のEVで蓄電池が枯渇していることが分かる (図5の枠で囲んだグラフ)。このようなEVの蓄電池の枯渇により、基地局の給電に使えるEVが減り、想定よりも多くの基地局の蓄電池が枯渇したと考えられる。

以上のように、当初想定していたとおり、本技術には移動時間の推定に課題があるため、想定よりも多くの基地局で蓄電池の枯渇が発生することが確認できた。一方、2回目の走行に向けて、移動時間の不正確さを補正する係数を算出する必要がある。そこで、直線距離とEVで走行した実際の距離との比を算出した。この結果、直線距離に対して1.42倍にすると実際の距離を近似できることが分かった。そこで、2回目のルート生成ではこの係数を用いた。また、速度は41km/hでの走行を想定していたが、EVでの走行時の平均走行速度は約33km/hであったため、速度もこれに応じて補正した。なお、このような係数や速度は、今回の千葉県の特定期域を対象とした走行のみに対して有効である。災害は任意の地域で発生し、その地域の係数や速度はすぐには取得できないため、直線距離に対してこれらの係数や速度

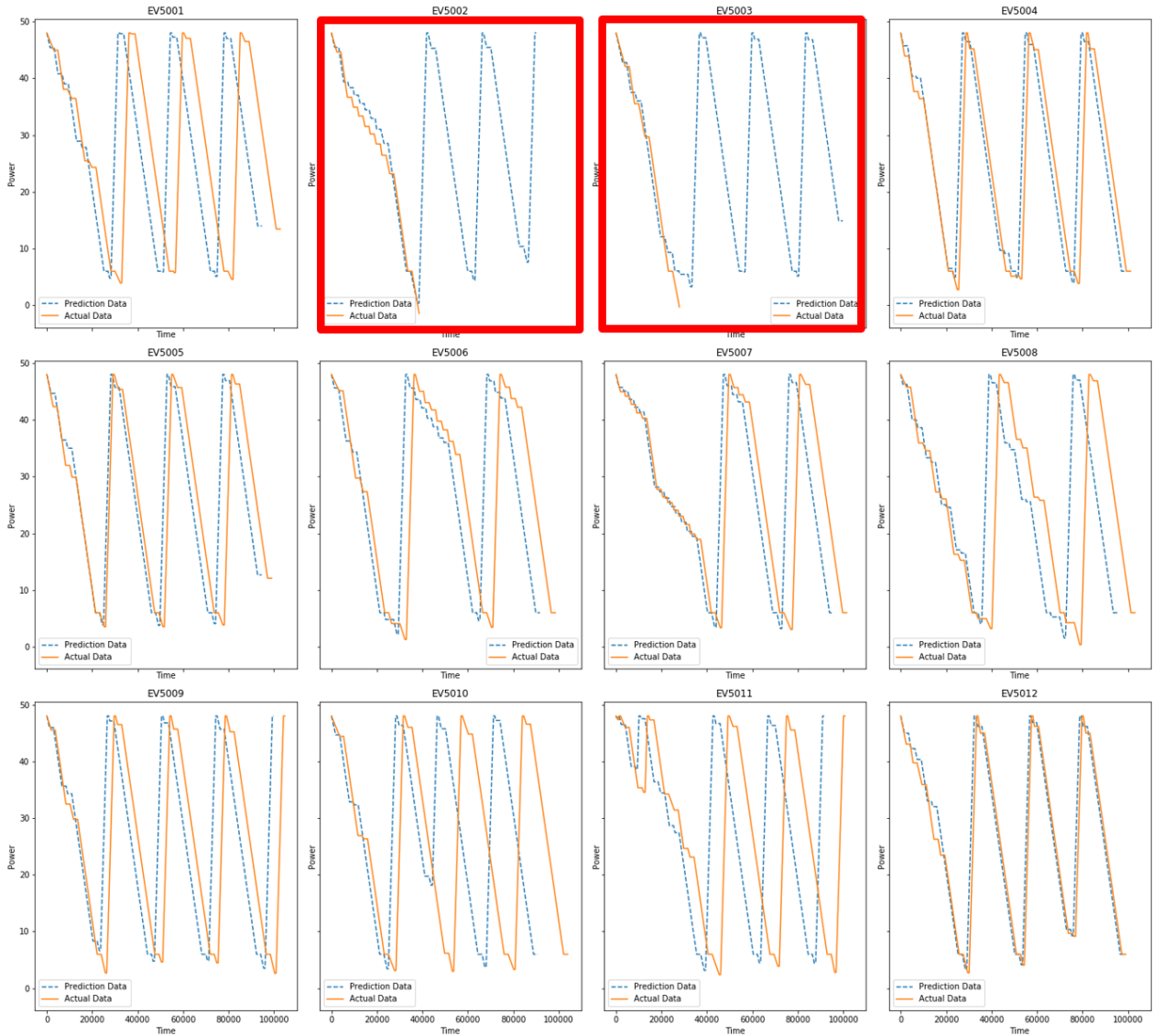


図 5 1 回目走行時の EV の蓄電池残量の変動

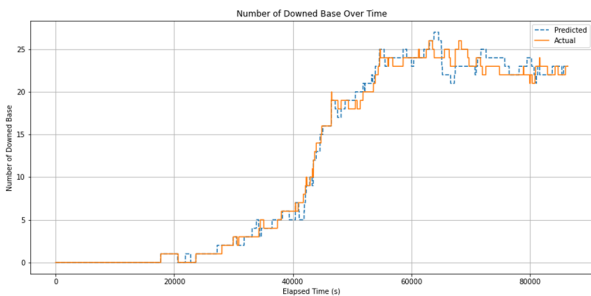


図 6 2 回目走行時の蓄電池枯渇基地局数の変動

で補正することで、本技術の移動時間に関する課題を解決できるわけではない。

3.2.2 2 回目の走行

2 回目の走行時の基地局の蓄電池枯渇件数を図 6 に示す。1 回目の走行時の図 4 で見られた想定以上の基地局の蓄電池の枯渇はなく、想定通りの基地局の蓄電池枯渇件数となっている。

また、図 7 を見ると、横方向の実線と点線のずれは解

消され、2 つの線はほぼ一致していることがわかる。この結果により、移動時間の推定が補正され、本技術は正確な移動時間をベースに EV のルートを生成できているといえる。

3.3 課題の抽出

以上のようにして、2 回目の走行で本技術の移動時間の推定が補正され、移動時間の推定に関する課題以外の課題を抽出可能となった。そこで、2 つの観点から本技術の課題の抽出を試みた。なお、本技術のソルバーとしての最適化の性能については机上評価で確認できており、最適化に関する課題は抽出せず、実際に EV を走行させ、基地局に EV から電力を供給する際の課題の抽出を試みる。

3.3.1 走行による EV の蓄電池の消費量推定の不正確さ

本技術で EV のルートを生成する際、シミュレーションにて EV の走行による蓄電池の消費も想定する。この推定には EV のカタログスペックの単位距離あたりの消費電力を用いた。しかし、実際の走行では上り坂や停車/発進の影響を受けると想定され、正確な EV の蓄電池

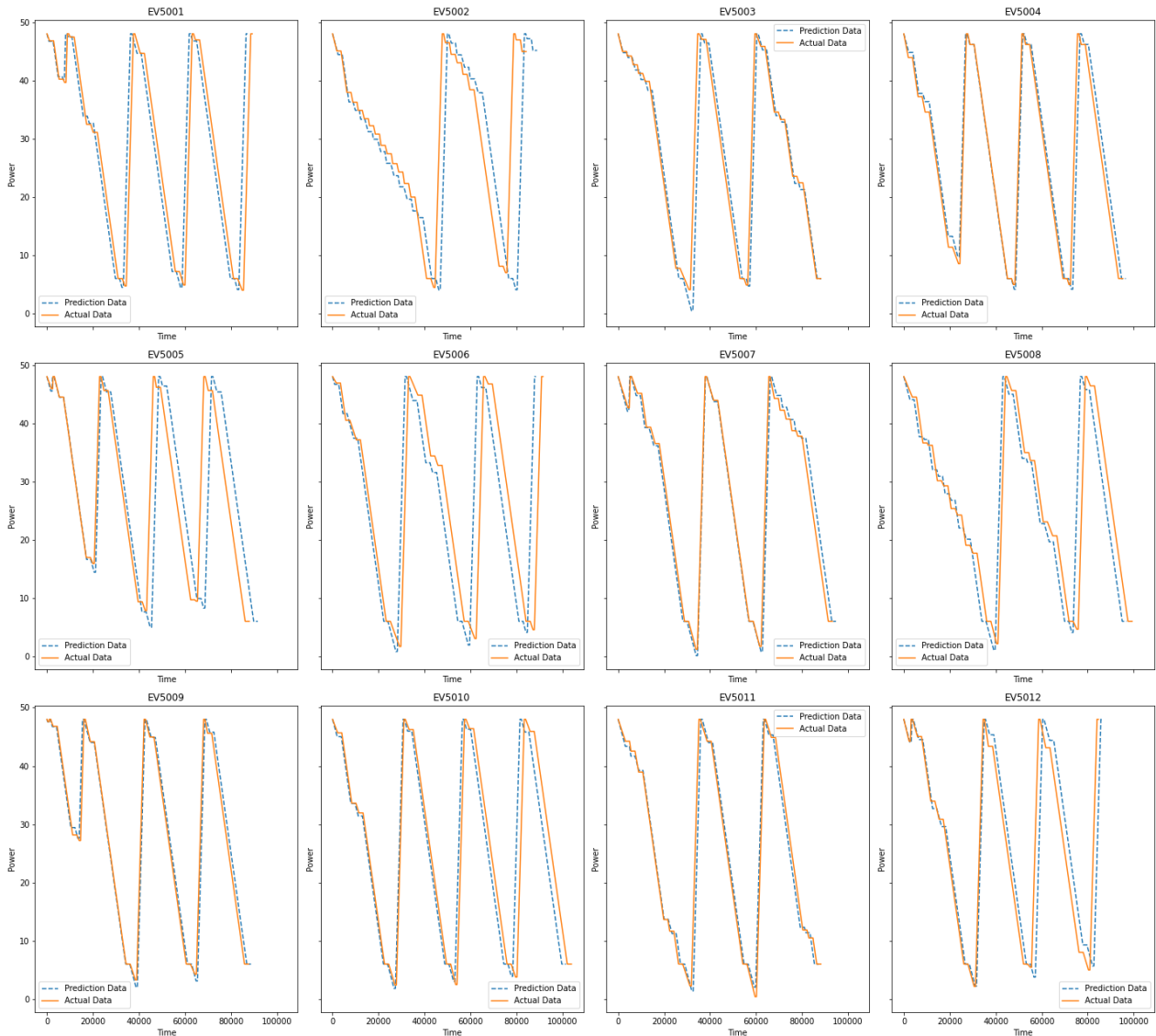


図 7 2 回目走行時の EV の蓄電池残量の変動

残量の推定は困難である。

図 7 を見ると、負の傾きの区間に EV の蓄電池が消費されている。この区間には長い区間と短い区間がある。長い区間は基地局への給電による EV の蓄電池の消費であり、短い区間が EV の走行による蓄電池の消費を表す。短い区間の実線と点線の傾きの差に注目すれば、正確に EV の走行による蓄電池の消費の推定ができていけるかがわかる。図 7 から、短い区間において傾きに大きな差はないことが分かる。また、EV から基地局への給電のための蓄電池の消費の方が、走行による消費よりも支配的であるため、相対的に走行による消費は全体的な EV の蓄電池の消費において影響は少なくなっている。このため、仮に走行による EV の蓄電池消費に多少の誤差があったとしても、全体的なルート生成には大きな影響はないと想定される。

3.3.2 その他の原因による推定と実際との乖離

図 6, 7 から、実線と点線はほぼ一致しているため、正確な移動時間が得られれば、推定と実際との乖離は防げることが分かる。しかし、準備/撤収や給電にかかる

時間は今回は推定値を用いているため、これらに関する時間の推定と実際との乖離は確認できなかった。このため、災害時での本技術の活用の前に、準備や撤収にかかる時間を実際に測定し、正確な準備/撤収時間の見積もりが必要である。また、基地局での給電時間については、EV 放電器の出力と基地局の蓄電池の残量によって推定しているが、これについても実測して誤差を確認する必要がある。さらに、充電ステーションでの EV への充電時間についても同様に、実測等によって誤差の確認が必要である。なお、充電ステーションはほかの利用者が利用している可能性もあり、待ち時間の影響についても考慮が必要である。

4 おわりに

本稿では、災害に伴う広域停電時に、基地局に給電するための EV のルート生成技術を、EV を実際に走行させることで評価した結果を報告した。

本技術は、EV の移動時間の推定に課題があるため、この課題以外の課題も評価によって抽出するため、まずは実際の走行によって、移動時間の推定を補正するため

の係数を取得した。その後、移動時間を補正した状態で生成されたルートで2回目の走行を行い、この結果を用いて本技術の課題を抽出した。この結果、本技術には移動時間の推定以外に大きな課題はないことが分かった。一方、基地局/充電ステーションでの準備/撤収時間や給電にかかる時間については、今回の評価では実際に計測ができなかったため、今後、これらの計測が必要である。

今後は本技術の唯一の課題である移動時間の推定についてアルゴリズムの改善を進めるとともに、準備/撤収時間や給電時間に関する課題の有無の確認を進める。

参考文献

- [1] Vision of Humanity. Ecological threat report 2022: Analysing ecological threats, resilience & peace. 2022.
- [2] N. Z. Xu and C. Y. Chung. Reliability evaluation of distribution systems including vehicle-to-home and vehicle-to-grid. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 31, No. 1, pp. 759–768, 2016.
- [3] Zexin Yang, Tian Gao, Yu Liu, Xueliang Huang, Shan Gao, Qi Zhao, and Hongen Ding. A two-stage pricing strategy for electric vehicles participating in emergency power supply for important loads. *Electric Power Systems Research*, Vol. 218, p. 109239, 2023.
- [4] Ning Zhou Xu, Ka Wing Chan, Chi Yung Chung, and Ming Niu. Enhancing adequacy of isolated systems with electric vehicle-based emergency strategy. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 21, No. 8, pp. 3469–3475, 2020.
- [5] Daisuke Kikuta, Hiroki Ikeuchi, Kengo Tajiri, Yuta Toyama, Masaki Nakamura, and Yuusuke Nakano. Electric vehicle routing for emergency power supply with deep reinforcement learning. In *Proceedings of the 23rd International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, AAMAS '24, p. 2336–2338, Richland, SC, 2024. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- [6] 森田匡俊, 鈴木克哉, 奥貫圭一. 日本の主要都市における直線距離と道路距離との比に関する実証的研究. *GIS-理論と応用*, Vol. 22, No. 1, pp. 1–7, 2014.
- [7] Chun-Hsin Wu, Jan-Ming Ho, and D.T. Lee. Travel-time prediction with support vector regression. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 5, No. 4, pp. 276–281, 2004.