

電気自動車の効率的な電力活用を目指した道路ネットワーク設計 Road Network Design to Enhance the Efficiency of Electricity Utilization for Electric Vehicles

情報工学専攻 16N8100015C 茗荷 魁斗

あらまし：近年、電気自動車が環境に優しい点や燃費が良い点から注目を集めている。電気自動車は走行時の消費電力が道路勾配に大きく影響を受け、下り坂において回生ブレーキ機能により充電できるという特徴をもつ。

本研究では電気自動車の特徴を活かし、走行時に無駄のない電力活用を可能にする道路ネットワークの設計手法を提案する。自動車の走行が安全で運転が快適な道路を設計するために重要視される道路勾配と道路の曲率を考慮し、電気自動車が少ない消費電力で走行できる現実的なネットワークを構築する。

キーワード：道路ネットワーク，道路勾配，電気自動車，ネットワーク設計

1. はじめに

近年、環境保護やエネルギー問題への意識の高まりを背景として、バッテリーとモーターを動力源とした電気自動車が注目を集める一方で、航続距離が短いことが電気自動車の普及に足止めをかけている。航続距離を延ばすためには、電力消費が小さい道路を走行することが重要である。電気自動車の消費電力は道路勾配に大きく影響を受ける。上り坂では勾配が大きいほど通行に必要な消費電力が増加し、下り坂では回生ブレーキ機能により充電できる特徴がある。また、走行しやすい道路という観点に立つと、交差点やカーブの曲率も考慮すべきである。

本研究では電気自動車の特徴を活かし、走行時に無駄のない電力活用を可能にする道路ネットワークの設計手法の提案を目指す。自動車の走行が安全で運転が快適な道路を設計するためには、リンクパターン、道路勾配、道路の曲率に関する条件を適切に与えることが重要である。

はじめに道路勾配と道路の曲率を考慮した道路の設置場所の候補を示す大規模なネットワークを構築する。構築したネットワークを使用して効率的な電力活用が可能な道路ネットワークを3段階に分けて求める。1段階目に幹線道路を決定し、2段階目には様々な場所に到達するために必要なリンクを追加する。1段階目と2段階目にはシュタイナー木問題を解く近似アルゴリズムを利用する。最後にショートカットを追加して自動車の移動の利便性を高め、電気自動車の効率的な電力活用が可能な道路ネットワークを構築する。

2. 電気自動車の特徴

電気自動車は減速時の熱エネルギーを回収することで充電できる回生ブレーキ機能を有しており、高いエネルギー効率を実現する(図1)。回生とは、自動車が持つ運動エネルギーをモーターが電気エネルギーに変換する現象である。自動車の運動エネルギーが減少し、ブレーキと同様の効果が得られる

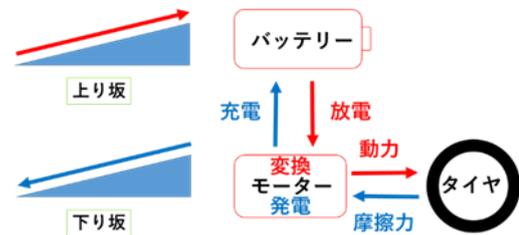


図1 回生ブレーキの仕組み

ため回生ブレーキと呼ばれる。

電気自動車が走行する際の電力量を計算する。最初に、回生ブレーキにより得られる電力を計算する。文献[2]を参考にして、回生ブレーキが作用して車両が停止するモデルを考える。本研究では、回生ブレーキにより得られる回生電力量は距離 l に比例すると仮定し、式(1)により計算する。

$$(\text{回生電力量}) = -F \times l \quad (1)$$

文献[2]の図1を参考にして $F = m \times (-g/18) + \mu mg \cos \theta$ と定める。ここで、 m は車両重量、 μ は摩擦係数、 g は重力加速度、 θ は道路勾配を表す。走行時に消費する電力量は式(2)から求められる。

$$(\text{消費電力量}) = (\text{転がり抵抗} + \text{空気抵抗} + \text{勾配抵抗} + \text{加速抵抗}) \times l \quad (2)$$

道路を走行する際に生じる電力量を道路勾配 θ の値に応じて以下のように計算する。

(走行時の電力量)

$$= \begin{cases} (\text{消費電力量}) - (\text{回生電力量}) & (\theta < 0) \\ (\text{消費電力量}) & (\theta \geq 0) \end{cases}$$

3. 道路の候補を示すネットワークの構築

3.1 山間部を対象とした既存研究

山間部に対して適用された建設コストの最適化を目的とした山道の道路設計手法を説明する。既存研究[1]では収穫装置や道路設計の制約を考慮して山間部における木材の収穫にかかるコストが最小な林業計画を見つけることを目的としている。道路設計に関しては収穫した木材を運び出すために用いるトラックが走行するための道路の設置場所を決定することに取り組んでいる。山間部に対して自動車が行くための条件を満たし木材収穫のコスト最小を目指す手法は、本研究における道路勾配と密接に関係する電気自動車の航続距離を延長することに関連があると考えられる。

既存研究では現実的な道路設計を目指すためには、以下の4点を考慮すべきであることが述べられている。

- (1)設計におけるリンクパターン
- (2)カーブの曲率制約
- (3)勾配制約
- (4)道路の建設コスト

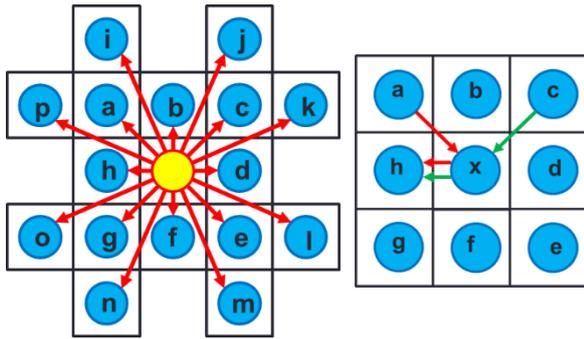


図 2 周辺の 16 グリッド (左) と移動の例 (右)

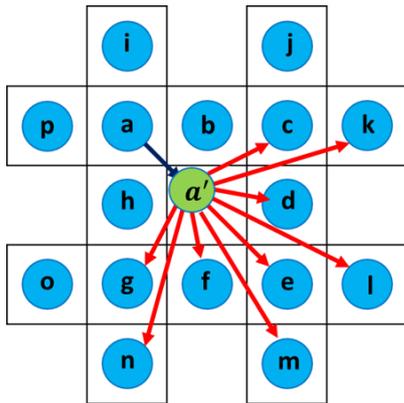


図 3 1 グリッドにおけるリンクパターン

3.2 節では(1), 3.3 節では(2), 3.4 節では(3)について説明する。

3.2 リンクパターン

構築する道路の候補を示すネットワークにおけるリンクパターンについて説明する。リンクパターンとは道路ネットワークを設計する上であらかじめ用意されている道路の形である。リンクパターンの数が多いほど、道路ネットワークを構築する際に道路の様々な形状を考慮することができる。本研究では 3.1 節で述べた既存研究を参考に、標高データにおける 5m メッシュの標高点 1 ノードに対して周囲の 16 グリッドへリンクをはる。詳細を図 2 に示す。図 2 において、中心の黄色のノードに対して周囲の a から p までの 16 グリッドへ赤い矢印で示した有向のリンクがはられている。

3.3 曲率制約

自動車の運転を快適なものとするために、道路におけるカーブの曲率は一定の大きさ以上で整備される必要がある。3.2 節のリンクパターンでは同じリンクでもノード間の移動によって二つのリンクがなす角度が異なり、不都合が生じる場合がある(図 2 右側)。図 2 には、ノード a からノード x を經由しノード h へ到達する赤い矢印が示す経路と、ノード c からノード x を經由しノード h へ到達する緑の矢印が示す経路が存在する。ここで、赤の経路は急なカーブを示している一方で緑の経路は緩やかなカーブとなっており、リンク(x, h)を経路ごとに区別する必要がある。二本のリンクがなす角度を一定の値以上にすることで曲率制約を満たす。

完成したリンクパターンについてノード a' を例に

示す(図 3)。ノード a' にはノード a から入ってくる有向リンクがはられており(青色の矢印)、このリンクに対してなす角度が 90 度以上になるようなノード a' から外へ出る有向リンクがすべてはられている(赤色の矢印)。

3.4 勾配制約

自動車の走行を安全なものとするために一定の大きさの勾配を超える坂道を制限し、通行が危険な道路を除く必要がある。そこで、構築する道路の候補を示すネットワークのリンクに対して勾配制約を適用する。本研究では構築する道路の候補を示すネットワークにおけるリンクの勾配が 40%未満になるように制約を設ける。

3.5 東京都のネットワーク

道路ネットワーク設計を行うために用いる、道路を設置する場所の候補を示すネットワークを構築する。対象地域は中央大学・明星大学駅周辺とし、対象範囲は 4km 四方である。ノード数は 9,180,000、リンク数は 84,758,670 である。

基盤地図情報ダウンロードデータ[3]の標高点を利用してネットワークを構築する。標高点の間隔は 5m であり、ネットワークの各ノードは標高値をもつ。また、ノード間を結ぶネットワーク上のリンクの勾配 θ はリンク長 l と端点の標高差 h から、 $\theta = \tan^{-1}(h/\sqrt{l^2 - h^2})$ により計算する。ネットワーク中のリンクは 3.2 節のリンクパターンに基づいて構築する。すべてのリンクには曲率制約と勾配制約を設ける。

3.6 消費電力に基づく経路探索

3.5 節で構築した道路の候補を示すネットワーク上で経路探索を行う。経路探索にはネットワーク上の 2 点間におけるコスト最小の経路を探索する方法である Dijkstra 法を用いる。始点を中央大学明星大学駅周辺、終点を豊田駅周辺とする。リンクコストには走行する際にかかる電力量とリンク長の 2 種類を使用し、比較を行う。結果を図 4 に示す。

図 4 において、赤色の経路がリンクコストに走行した際にかかる電力量を用いた経路であり、黒色の経

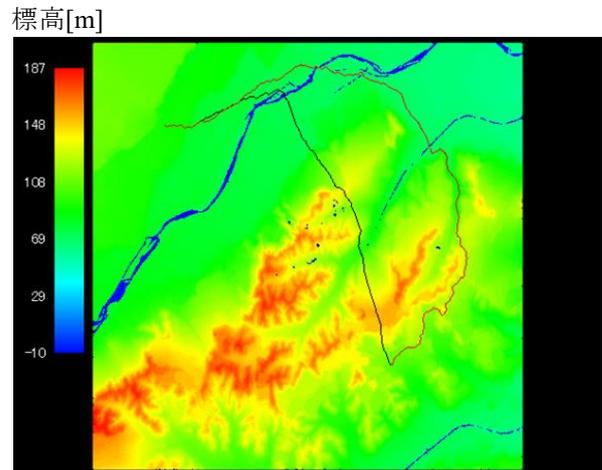


図 4 最短距離の経路(黒)と電力量最小の経路(赤)

表 1 2 種類の経路の比較

	総電力量[kW]	総距離[m]
電力量最小の経路	1,971,887	5349.91
最短距離の経路	3,083,237	3539.77

路がリンクコストにリンク長を用いた経路である。それぞれの経路における総消費電力量と総距離を表 1 に示す。

4. 効率的な電力活用が可能なネットワーク設計

4.1 道路ネットワークの設計の手順

本研究では道路ネットワークを以下の三段階に分けて構築する。

- Step1:** 対象地域において交通の基盤となる幹線道路を示すリンクからなるネットワークを構築する。
- Step2:** 対象地域において重要度が高い場所を示すノードへ到達可能となるように Step1 で構築したネットワークにノードとリンクを追加する。
- Step3:** 上記 Step2 で構築したネットワークにおけるノード間に対してショートカットを追加し、ノード間を移動する際に要する距離を縮める。

4.2 幹線道路の設計

直線的な幹線道路ネットワークを設計するために、3.5 節で構築した道路の候補を示すネットワークを再構築し、ノードの間隔を 10m として幹線道路の候補を示すネットワークを構築する。構築したネットワークに対して Kou-Markowsky-Berman により提案された 2-近似アルゴリズムを利用することでシュタイナー木問題を解く。ターミナルには対象地域の外周上のノード 6 点と駅が存在するノード 8 点の合計 14 点を選択する。

得られるネットワークは一部のターミナルにおいて曲率制約を満たさないため修正を行う。手順は以下のとおりである。

1. 各ターミナルに対して幅優先探索を行う
2. ノードの度数に応じて、隣接ノードとなすリンクのパターンを列挙する
3. 列挙した中で電力が最小の道路を採用し、修正を行う

修正を行った結果を図 5 の赤色のリンクに示し、これを幹線道路ネットワークとして採用する。

4.3 重要な場所に到達可能な道路の追加

4.2 節で求めた幹線道路にノードとリンクを追加することで道路ネットワークを構築する。幹線道路に対して対象地域内の重要度が高いノードへ到達可能な道路ネットワークの構築が目的である。

本研究では重要度が高いノードとして既存道路における度数が 3 以上のノードを採用する。デジタル道路地図データ [4] から東京都の道路ネットワークを構築し、ノードを抽出した。抽出したノード 1709 点に加えて 4.2 節で求めた幹線道路ネットワークに含まれる全てのノード 672 点の合計 2481 点

をターミナルとする。リンクコストを走行時の消費電力量として道路の候補を示すネットワーク上にてシュタイナー木問題を解く。構築される道路ネットワークには幹線道路のリンクが確実に含まれるようにする。図 5 の青色のリンクが追加された道路を示す。

4.4 ショートカットの追加

4.3 節で得られたネットワークにて任意の 2 点間で経路を求めると無駄な遠回りをする場合が存在する。そのような 2 点の組み合わせに対してリンクコストを電力とした経路探索を行い、ショートカットを追加することで利便性の高いネットワークへ改良を行う。手順は以下の通りであり、ターミナルは 4.3 節と同じものを使用する。

以下を全てのターミナルの組み合わせに対して繰り返し行う

1. 2 点間の直線距離 a を計算
2. 2 点間のネットワーク上での距離 b を計算
3. b/a が最大となる 2 点の組み合わせを見つける
4. 2 点間の電力消費最小の経路をネットワークに追加

修了条件：全点間の b/a が閾値未満

図 5 の黒色のリンクが追加されたショートカットである。

5. 道路ネットワークの評価と比較

5.1 構築したネットワークの評価

幹線道路は、対象地域を横断するような長距離の走行を可能にし、多くの車両に利用される交通の便が良い道路を想定しているため、ノード間の間隔を広くすることで Step2 以降に追加するリンクと比べて直線的な形となっている。青色のリンクは重要な場所に到達可能な道路を示している。幹線道路と比べてリンク数が格段に増加し、対象地域内全体にまんべんなく道路が広がっている。ターミナルの位置を工夫することで密な道路と疎な道路の位置をコントロールできる。黒い色のリンクは Step3 で追加したショートカットを示し、閾値を 23 に設定しているため全ノード間の距離は直線距離の 23 倍未満となっている。

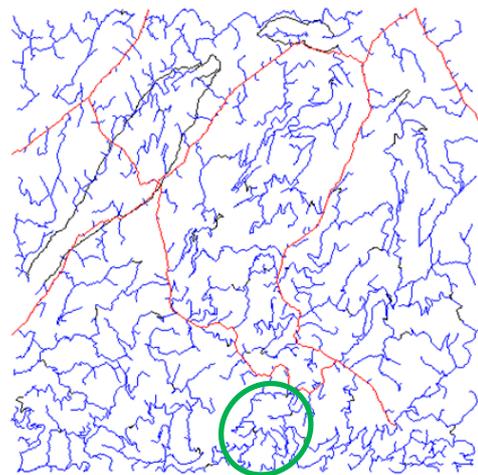


図 5 構築した道路ネットワーク

実際に道路の整備を行う際には交通の利便性を考慮することで必要に応じて土砂の切り盛りやトンネルの設置を行う。本研究の設計手法にて求まる道路ネットワークは山間部などの標高差が大きい場所において緑色の丸で示した箇所のような曲がりくねる形の道路がみられる。このような場所は単純に地形の形状に合わせて道路を設置するのではなく、土砂の切り盛りやトンネルの設置を検討する必要がある位置を見つけることができる。

5.2 リンクの使用回数に基づく評価

構築したネットワークにて4.3節で用いた全ターミナル間に対して経路探索を行い、リンクに使用された数を割り当てた結果を示す。Step3における閾値は40(図6)と23(図7)のものを使用する。どちらも幹線道路の色が赤に近く、幹線道路のリンクが多く使われている。図6に黄色で示した箇所については幹線道路ではないリンクの使用回数が多いが、周辺のノードの次数が少ないためであり、Step3の閾値を小さくした図7では使用回数が減っている。幹線道路以外の道路における使用回数の偏りが減った影響により、赤い丸で示した幹線道路などにおいては閾値を下げることで幹線道路の使用が高まる。幹線道路は車両が集まることが想定されるため、多くの交通を受け入れる対策が行われる。そのため、閾値を小さくして幹線道路に使用回数が集中する

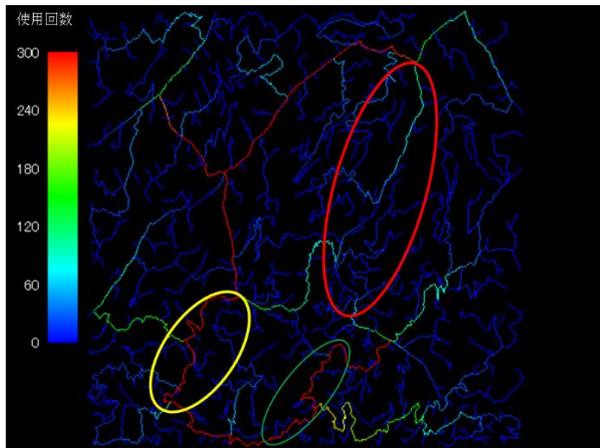


図6 各リンクの使用回数(閾値40)

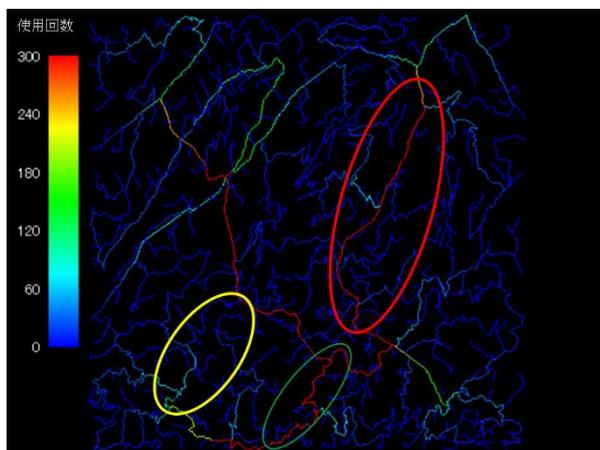


図7 各リンクの使用回数(閾値23)

までショートカットを追加することが望ましい。一方で、幹線道路以外にも交通に便利な道路が存在する。緑色の丸で示した箇所がその例であり、図6,7のどちらにおいてもリンクの色が赤く、幹線道路と同程度の舗装を行う必要のある道路を見つけることができる。

6. 結論

本研究では、電気自動車の効率的な電力活用が可能な道路ネットワークの設計手法を提案した。まず、既存研究にて道路を設計する際に重要視されていたリンクパターン、曲率制約、勾配制約を満たす道路の候補を示すネットワークを構築した。構築したネットワークを使用して効率的な電力活用が可能な道路ネットワークを3段階に分けて求めた。幹線道路と対象地域内の様々な場所に到達するために追加するリンクを求める際には、シュタイナー木問題に対する近似アルゴリズムを利用した。最後にショートカットを追加して自動車の移動の利便性を高め、電気自動車の効率的な電力活用が可能な道路ネットワークを構築した。

構築したネットワーク上で経路探索を繰り返し行い、リンクの使用回数を計算することにより、実際に道路を設計する上で幹線道路と同程度の舗装が必要な道路を見つけることができる。また、構築したネットワークの形状と対象地域の地形を比較することで実際に道路を整備する際に検討する必要がある土砂の切り盛りやトンネルの設置を行う位置を見つけることができる。

今後の発展としては道路ネットワークを構築する際に自動車の動きである停止や発進、加速を考慮し、道路の信号機や交差点の数に反映させることで交通流の面から自動車が快適に走行できる道路ネットワークを構築することが考えられる。そのためには、電力計算について本研究では一定値として与えた自動車速度や加速度の数値を精密に計算するとともに、道路の幅員や車線数などから自動車を受ける影響を反映させる必要があると考えられる。

参考文献

- [1] R. Epstein *et al.*: A combinatorial heuristic approach for solving real-size machinery location and road design problems in forestry planning, *Operations Research*, vol. 54, pp. 1017-1027, 2006.
- [2] 奥井伸宜, 新国哲也, 河合英直: 電気駆動系自動車におけるエネルギー回生制御の実態把握とその最適化について, 交通安全環境研究所フォーラム講演概要, pp. 138-141, 2010.
- [3] 住友電気工業株式会社, 住友電工製品拡張全国デジタル道路地図データベース標準(全国1:25000地図データ) Version 3.31.
- [4] 国土交通省国土地理院: 基盤地図情報ダウンロードデータ第4.0版(オンライン), 入手先<<http://fgd.gsi.go.jp/download/>>(参照2016年1月26日).