

2 種類の忠実度をもつ数値モデルを併用した 高速な近傍探索に基づく省エネルギー列車運転の設計法

孟 軒朗* 大西 亘 古関 隆章 (東京大学)

Design method for energy-efficient train operation based on the fast neighborhood search using numerical models
with low and high fidelity

Xuanlang Meng*, Wataru Ohnishi, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

With new technologies like Automatic Train Operation introduced, many advanced optimization methods have been proposed to search for energy-saving operation methods. However, it has often been difficult to obtain practically satisfactory results while keeping the computation time within an acceptable range. In this paper, we propose an operation design method that uses two numerical train operation simulation models with different fidelity and computation cost, and uses a good operation method based on experience as the initial condition, and performs neighborhood search efficiently to improve energy-saving performance.

キーワード：電気鉄道、省エネルギー運転、数値最適化、近傍探索、微調整、ジャーク制御

(Electric railway, energy-saving operation, numerical optimization, neighborhood search, fine tuning, jerk control)

1. はじめに

電気鉄道は、輸送量当たりのエネルギー消費量が比較的
低く^①、公共交通機関の持続可能な発展において重要な役
割を担っている。エネルギー不足や環境問題への関心が高
まる中、エネルギー消費の削減は重要な課題となっている。
鉄道の省エネルギーを実現するために、蓄電装置や高効率
電動機の導入というハードウェア面での対策がある一方、
運転方法の改善はより有効性が高いと考えられる。運転方
法の改善による省エネルギーは、新しい設備を実装する必
要がなく、コストが低いという利点がある。近年、列車自
動運転技術の導入によりさらに省エネルギー運転ができる
ことが期待されている。

自動運転導入で鉄道消費電力量を削減することをめざし、
省エネルギー運転方法を探索する高度な最適化法の提案が
多くなされてきた。先行研究では、列車の省エネルギー運
転問題に対して解析的な手法が適用され、最大出力加速-巡
航-惰行-最大制動の運転方法が省エネルギーであることが
検証されている^②。近年、動的計画法が省エネ最適化問題
の代表的な解法として、複雑な路線や制約条件に対しても
エネルギー削減させることができる^③。しかし、計算時間
を許容範囲にしつつ実用的に満足な結果を得ることは、多
くの場合困難である。本稿では、忠実度と計算コストの異
なる 2 つの列車運転数値計算モデルを併用し、経験に基づ
く良い運転方法を初期条件とし、近傍探索を効率的に行い
省エネルギー性能を高める運転設計法を提案する。

2. 最適化問題の定義

本研究では、エネルギー効率の高い列車運転の設計を最
適化問題として扱う。本章では、決定変数、目的関数、制
約条件を数学的に定義する。

〈2・1〉 決定変数 本研究では、決定変数である列車
運転を、2 駅間をいくつかの区間に分割し、各区間で一定
の運行指令を入力することで定義する。 N 個の区間を持つ
運転、すなわち、運転指令入力が行走中に N 回変化する場
合、各区間の終了位置 $x_i, i = 1, 2, \dots, N$ と各区間の運転指令
 $u_i, i = 1, 2, \dots, N$ で構成される $2N$ 次元のベクトル \mathbf{p} で唯一
の運転を定義することができる。図 1 は $N = 3$ の場合の例
を示している。

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_{N-1} & x_N \\ u_1 & u_2 & \dots & u_{N-1} & u_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

しかし、この定義では乗り心地は考慮されておらず、区間
切替時のジャーク、すなわち加速度の時間微分が無限大で
あることを意味する。そこで筆者らはさらに決定変数を (2)
のように拡張し、加速度を変化させる空間境界では図 2 の
200m および 800m 付近に見られるように、一定のジャーク
で加速度を切り替えることにした。そこで、最適化問題の
決定変数の次元も増える (ことを意味する)。

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_{N-1} & x_N \\ u_1 & u_2 & \dots & u_{N-1} & u_N \\ j_1 & j_2 & \dots & j_{N-1} & j_N \end{bmatrix} \quad (2)$$

〈2・2〉 目的関数と制約条件 列車運行方法の調整に
よる省エネルギーを目標とし、速度制限、到着時間、停止位
置など、列車運行における現実的な制約条件を考慮し、本

研究では拡張目的関数を用いることにした。現実的な制約条件をペナルティの形に変換し、エネルギー消費量に加算することで、以下の式で記述する。

$$f(\mathbf{P}) = E + a_p f_p(e_p) + a_t f_t(e_t) + a_v f_v(e_v) \quad (3)$$

ここで、 a_p, a_t, a_v は停止位置誤差、到着時間誤差、速度超過誤差のペナルティ係数である。これらの係数の調整は、制約違反の許容度の調整を意味し、これらのペナルティ係数が異なれば、計算結果も異なる。

3. 数値モデル

運転の性能評価には、消費エネルギー、列車が駅に到着する時間、列車が停止する位置などの関連情報が必要である。本章では、列車運転の性能を評価するための列車運行シミュレータを紹介する。

〈3・1〉 高忠実度モデル 設計した高忠実度シミュレーションモデルの全体構成を図3に示す。運転のエネルギー消費量や制約条件への抵触を評価するためには、走行中列車力学を計算するだけでなく、電源回路を解く必要がある。これは、速度変化に伴う抵抗力の変化や、電源の架線電圧に影響されるモータの出力など、走行中に変化する要素が

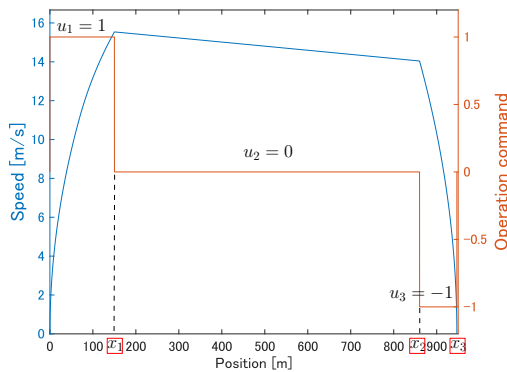


図1 三区間に分割した列車運転のランカーブ例

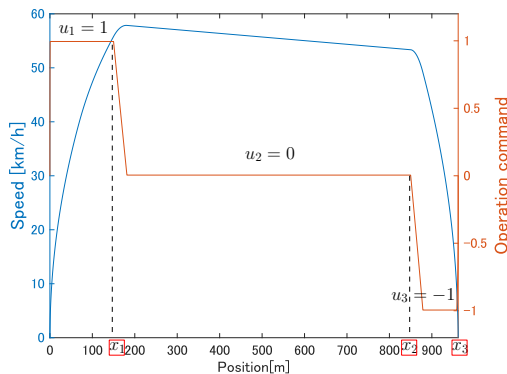


図2 三区間に分割したジャック付きの列車運転のランカーブ例

多く、単純に複数の式で計算することができないことに起因している。本研究では、走行時間を微小の時間間隔 Δt に分割し、列車の状態、列車の位置と速度、饋電回路の状態を一時間ステップ前の状態に基づいて時間ステップごとに更新することにより、列車の運動の時間的推移と電気回路を同時に解析する高忠実度シミュレーションモデルを構成した。

〈3・2〉 低忠実度モデル 低忠実度モデルは、走行抵抗力は一定、モータは速度に関係なく一定出力、架線電圧は走行中一定、送電損失を無視すると仮定して目的関数値およびペナルティ値を計算するものである。決定変数ベクトル \mathbf{p} を用い、列車のダイナミクスを計算する。図4は高忠実度モデルと低忠実度モデルが描いたランカーブを比較したものである。低忠実度シミュレーションモデルの結果は、高忠実度モデルの結果と比べて、誤差が大きくなるが、大まかな走行曲線や消費電力量を得ることは可能である。

4. 近傍探索

本研究では、高忠実度と低忠実度シミュレーションモデルを用いて、妥当な初期解の近傍で様々な運転を評価し、エネルギー効率の良い運転の効率的な探索を実現する。本章

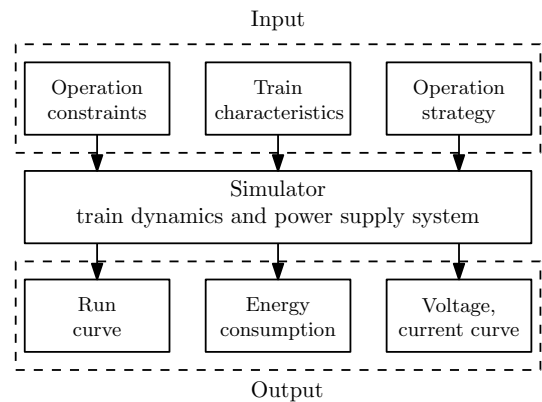


図3 高忠実度モデルの構成

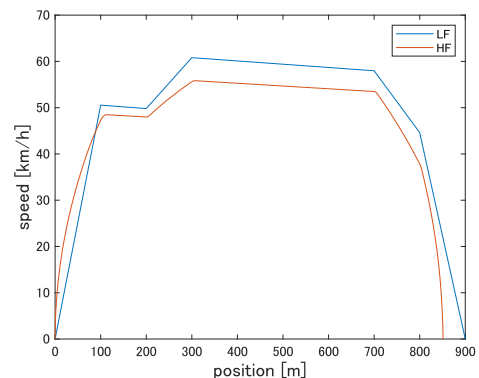


図4 低忠実度 (LF) と高忠実度 (HF) のランカーブの比較

表 1 ケーススタディ 1 動的計画法との比較

	Energy [kWh]	Stop Position Error [m]	Stop Time Error [s]	Computational Time [s]
DP (initial)	5.4214	-0.70	0	30
DP (fine)	5.2378	-0.32	1.00	278
Final	5.2333	-0.01	0.58	105

では、提案手法の基本的な考え方と、反復探索のルールについて説明する。

まず、経験に基づいてよく使われるランカーブや他の数値計算方法で生成されたランカーブを初期解とする。次に、すでに評価されている初期解からさらに良い解を探すための近傍探索を行う。そして、現在の最適解を中心にして各区間の長さや操作入力大きさを調整しサンプルを作り、すべてのサンプルの目的関数値を低忠実度モデルを用いて推定し、最も評価がいいサンプルを選ぶ。最後に、高忠実度モデルが選ばれたサンプルを評価し、低忠実度モデルの結果を検証する。その結果に基づいて、より良い解が見つかった場合、次では、新しい最適解を中心と同様の近傍探索が行われる。より良い解が見つからない場合、次では近傍探索の領域を小さくする。領域が小さすぎると、この領域にはより良い解がないと判断し、現在の中心は局所最適解であると判断する。

5. 数値ケーススタディ

本章では、加速度制御のみ、固定ジャーク付きの加速度制御、可変ジャーク付きの加速度制御の3つのケーススタディを行い、結果を解説する。

〈5・1〉 加速度制御 このケーススタディでは、加速度指令はある区間では一定値で、次の区間に入る瞬間に加速度が切り替わると考え、その時のジャークはインパルスとなる。動的計画法と比較するために、粗く分割した動的計画法により初期解を設計し、そこから近傍探索を行い、細かく分割された動的計画法と比較した。表1に示すように、提案法では動的計画法と近い結果を得つつも、計算時間を半分に削減した。

〈5・2〉 固定ジャーク付き加速度制御 このケースでは、列車が次の区間に入ると、加速度が直線的な傾きをもって変化することになる。ジャークが省エネルギー効果に与える影響を明らかにするために、異なるジャークの値を設定し、それぞれの計算結果を図5のように比較した。図6はジャークが $0.6m/s^3$ の時の詳細な計算結果を示している。ジャークが小さい場合に省エネルギー効果が悪いという自然な結果が得られた。主な理由は、加速度の切り替えに時間がかかり惰行時間が短くなってしまふことと、低忠実度モデルで正確に目的関数の値を予測することが困難なためと考えられる。

〈5・3〉 可変ジャーク付き加速度制御 このケースで

は、ジャーク値は与えられた範囲内で調整できるように設定した。理論的には、ジャークの調整範囲が広がると、より良い性能を持つ新しい最適解、あるいは少なくとも小さい範囲内で見つかった最適解と同等の性能を持つ最適解が見つかるはずである。しかし、表2に示すように、ジャークの調整範囲だけを変えて同じ初期値から探索を行っても、それだけでは結果が向上するとは限らない。提案法は最適性の保証のない近傍探索であるため、同じ初期値の周りの領域内で最適解が得られる保証はない。加速度とジャークを組み合わせるとより良い解がありうる一方、悪い解の数も増えるからである。また、サンプル変数の評価に用いる低忠実度モデルは、計算時間短縮のためにジャーク制御を考慮していないため、探索回数が同じ場合、最適解が得られる確率が低下する。加速度制御のみの場合と異なり、適切なジャーク値を持つ初期解を得ることは難しい。そこで、

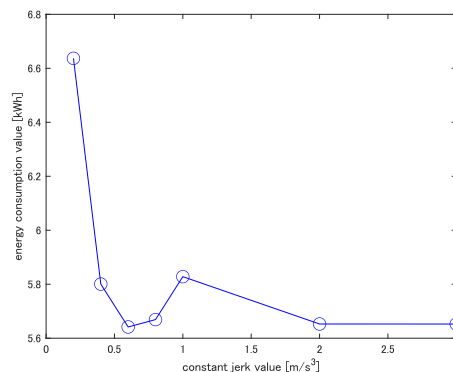


図5 ジャーク値と近傍探索の結果

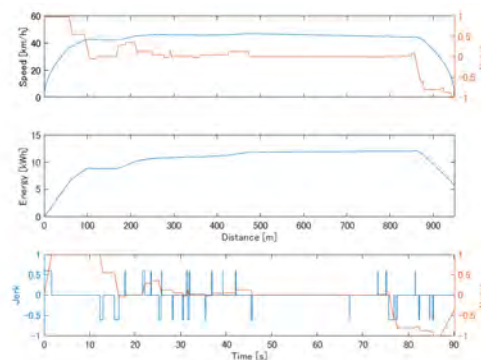


図6 固定ジャークのランカーブ

表 2 ケーススタディ 3 異なるジャーク範囲の一度探索の結果比較

Range of adjustable jerk [m/s^3]	Objective function value	Computational time [s]
0.4-0.6	5.7549	70.2
0.2-0.8	5.6281	75.9
0.1-0.9	5.7071	77.4

Objective function value は、エネルギー消費量と制約条件違反のペナルティの合計値である。

表 3 ケーススタディ 3 小さな範囲での探索の結果とそれに基づいての広い範囲での探索の結果の比較

Range of adjustable jerk [m/s^3]	Objective function value	Computational time [s]
0.4-0.6	5.7549	70.2
0.2-0.8	5.5821	141.4
0.1-0.9	5.5494	212.5

Objective function value は、エネルギー消費量と制約条件違反のペナルティの合計値である。

ジャークを考慮して適切な初期解を得るために、ケース 2 の結果に基づき、まず $0.4\sim 0.6m/s^3$ の小さな範囲を設定し、最小の範囲で得られた最適解を中程度の範囲での探索のための初期解とし、さらに得られた最適解を最大の範囲 $0.1\sim 0.9m/s^3$ で探索をするための初期解とする。その計算結果と計算時間を表 3 に示す。ジャークの調整範囲を徐々に大きくすることで、期待通り近傍探索の結果も徐々に改善されていることが分かる。しかし、広い範囲の計算には狭い範囲の計算結果が必要なため、必要な計算時間コストはそれらの合計となり、総計算時間が長くなる。広い範囲で見つけた最適解を図 7 に示す。図 5 に示すケース 2 の結果と比べ、ジャークの調整と加速度の調整を合わせてより良い省エネルギー効果を得た。

6. おわりに

本研究では、電気鉄道におけるエネルギー効率の良い列車運転を検討した。高忠実度と低忠実度の 2 種類の数値計算モデルを用いた近傍探索で列車運転を効率的に設計する新しい方法を提案した。ケーススタディの結果より、加速度制御のみで設計する場合、動的計画法で作った初期値から近傍探索を行う提案法は、従来の細かな状態空間分割に基づく動的計画法に比べ計算時間を半分に削減することを

確認した。

さらに、乗り心地を改善するために、操作入力の切り替えにジャーク制御を入れたケーススタディを行った。まず、調整不可能な固定ジャークを用い、ジャーク値がある値より大きい場合、最終的な省エネ効果にあまり影響しないことを確認した。その結果に基づき、ジャークを調整可能な値として決定変数に追加し、ジャークが調整可能な範囲を少しずつ大きくしていくことで、近傍探索のための適切な初期解を決定した。その結果、広い範囲の探索が受容可能な計算負荷増大の範囲で可能となり、高性能な省エネ運転を設計することができた。

また、提案手法はグローバル最適解を求める能力が弱く、さらに低忠実度モデルの精度が低いいため、ジャークを含めて複雑な状況下で良い解を求める能力を欠くことが、ケーススタディの結果からも確認した。すなわちジャークを最適化する対象として扱えば、より良い運転が見つかるはずだが、本論文の低忠実度モデルがジャーク制御に対応できないため、現時点で一度にジャークまで最適化することは不可能であった。

文 献

- (1) Web page of the ministry of land, infrastructure, transport and tourism, japan. <http://www.mlit.go.jp/maritime/index.html>.
- (2) Phil Howlett. The optimal control of a train. *Annals of Operations Research*, 98(1):65–87, 2000.
- (3) Hideyoshi Ko, T Koseki, and Masafumi Miyatake. Application of dynamic programming to the optimization of the running profile of a train. *WIT Transactions on The Built Environment*, 74, 2004.

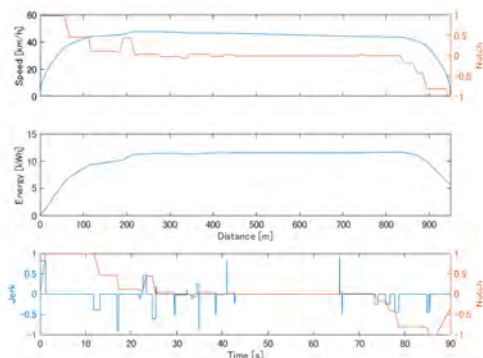


図 7 可変ジャークのランカーブ