

乗り心地と位置依存の速度・加速度制約を考慮した 最小時間定ジャーク軌道による列車定位置停止パターン設計法の提案

三好 正太, 大西 亘, 古関 隆章 (東京大学)

Constant jerk oriented train trajectory generation for minimum time
considering ride confort and position dependent speed and acceleration constraints
Shota Miyoshi, Wataru Ohnishi, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

Speed profile generation and modification on the running train is an important technology for automatic train operation and executed by drivers in manual train operation. This study aims to generate the feedforward control of train operation that guarantees the ride confort by explicitly limiting the maximum jerk of the speed profile and to calculate rapidly with varying restriction parameters. This study proposes a feedforward control design method that gives a braking trajectory with minimum running time while satisfying position-dependent or ride confort constraints, and optimizes the stopping trajectory by bang-bang control of jerk, which is the most crucial part of the speed profile for the ride confort and position precision. The speed profile satisfied the ride confort limit of acceleration and jerk, as well as the position dependent speed and acceleration limits in the numerical train driving simulation. The proposed method ensured the safety by limiting speed, acceleration, and jerk explicitly and achieved rapid calculation for adaptive reconstruction of speed profiles on the train.

キーワード：自動運転, 定位置停止制御, フィードフォワード制御, 乗り心地, 位置依存制約
(Automatic train operation, Stopping control, Ride confort, Position-dependent constraints)

1. 序論

鉄道における自動運転は, 列車運行の省力化や列車運転制御の品質向上を実現する手段として近年注目されている。自動運転は, 人の応答特性では実現が困難な運転パターンの実装, ばらつきの少ない運転が実現できる⁽¹⁾ため, 省エネルギー運転手法の実車への実装と省エネルギー効果の安定した実現など, 列車運転の省力化にとどまらない付加価値を列車運転に付加できる。

自動運転において行われるモーション制御は, 速度軌道に対する軌道追従であり, フィードバック制御とフィードフォワード制御により達成される。フィードフォワード制御器は, 車両の性能の範囲で達成可能な速度軌道指令値および引張力の時間軌道を生成し, 走行中は時刻ごとの引張力指令値を順に出力する。フィードバック制御器は, 速度ないし位置の予め決められた指令値に対する誤差を修正し, 鉄道においては定位置停止や速度制限の遵守に貢献する。フィードバック制御には車両の速度, 位置検出が不可欠であるが, これらについて, しばしば位置は連続的に得られない, 速度は空転などの影響を受けて正確性が低い⁽²⁾問題を持つ。さらに, 鉄輪と鉄レールの粘着による動力伝達の普通車両において顕著であるが, モーターやブレーキ装置などのアクチュエータの出力の最大値が常用する値に対して少ない余裕であることや, 応答時間が遅い⁽³⁾ことから, フィードバック制御における位相余

裕や制御入力飽和が厳しく制限される。このため, 鉄道車両の自動運転では, フィードバック制御器の性能になるべく頼らず, 賢いフィードフォワード制御器の設計が重要となる。

自動運転におけるフィードフォワード制御器は走行時分, 消費エネルギーや乗り心地により評価される。乗り心地の評価は振動の周波数特性⁽⁴⁾による他, 速度軌道の設計については, 加速度およびジャークの最大値⁽⁵⁾が人の感覚を代表した評価指標として用いられる。速度軌道の最適化は数理最適化問題として定式化される。省エネルギーを狙いとする最適化が代表的であり, 動的計画法⁽⁶⁾, Pontryaginの最大原理⁽⁷⁾に基づく大域的最適解が得られる方法がある。乗り心地に関しては, マルコフ決定過程を用いた省エネルギーと乗り心地の多目的最適化⁽⁸⁾など, 様々な手法が提案されており, 列車運行計画を立案する段階で運転曲線を定める用途に用いられる。しかしながら, これらの手法は計算量が非常に多く, 列車が走行しながら次の駅間の走行方法を動的に計算するために用いることが困難である。

その場の走行について乗り心地を保証する車上に実装される制御手法として, 非線形フィードバック制御器⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾が複数提案されているが, その非線形特性のために性能の解析やチューニングが困難であることが問題になる。

本研究では, フィードバック制御で性能の向上が困難な鉄道車両のモーション制御について, 停止位置精度と乗り心地を保証し, かつ環境変化に適応可能な車両駆動フィードフォ

ワード制御器の設計を目的として、列車の停止制御のための、ブレーキ開始地点から停止に至る速度軌道生成を行う。制御器設計において、加速度やジャークの制約を乗り心地あるいは粘着特性の変化などをパラメータにより変更可能で環境の変化に対応する制御を実現できるような、以下のような軌道設計を提案する。

- (1) 位置に対する速度制限を与えることで、連続位置、速度検知を基にして速度制限パターンを与えられるシステムに対しても、離散的な速度制限がある従来のシステムに対しても停止制御パターンを作成可能である。
- (2) ジャーク制限を陽に考慮してブレーキを払うことが可能である。
- (3) 粘着特性の変化を最大加速度の制限として考慮できる
- (4) 実行可能かつ精密な停止軌道の計算でホームドアとの相性がよい

2. 問題設定

本研究が対象とする問題について説明する。本研究では、鉄道車両の運動制御の内、位置精度が特に重要となる停止制御を対象とする。さらに、停止制御の内、車両の実現可能な運動性能の範囲で速度、加速度の目標値軌道を与えるフィードフォワード制御を設計することを本研究の対象とする。

車両、線路のモデルについては、以下を仮定する。車両についてはブレーキ特性のみを与え、力行特性については、走行抵抗に対する定速運転が常に可能であることを仮定する。ブレーキ特性は電空協調で、速度による走行抵抗の変化や電気ブレーキ特性の変化によらず、常に一定のブレーキ力を出力可能であると仮定する。また、ブレーキの動特性は考慮から除外する。位置依存の加速度制約を勾配抵抗に基づき設定する。勾配 $s(x)$ [% e] に対し、重力のレール面に平行な方向の分力である勾配抵抗は $a_{rg}(s(x)) = 0.0098s(x)$ [m/s²] で与えられる。下り勾配において最大減速度 $-a_{max}$ のブレーキをかけるときの実効的な最大減速度は

$$a_{eff}(x) = -a_{max} + a_{rg}(s(x)) \dots\dots\dots(1)$$

であり、勾配による位置依存のブレーキ減速度制約となる。

図 1 に、ケーススタディで用いるモデル線路の仕様を示し、表 1 に、線路が定める速度制限や、乗り心地や粘着特性が要請する制約条件を示す。

3. 提案法

本研究は、速度や加速度の制約を満たしつつ計算負荷の軌道設計方法として、ジャーク一定の時刻に関する多項式として最短時間速度軌道を計算する方法を提案する。文献⁽¹⁾では、走行位置により速度や加速度の制約が変わらない場合において最短時間速度軌道を数理最適化によらず得る方法が示されている。この方法を基に、位置依存制約がある場合に最短時間軌道を計算する。

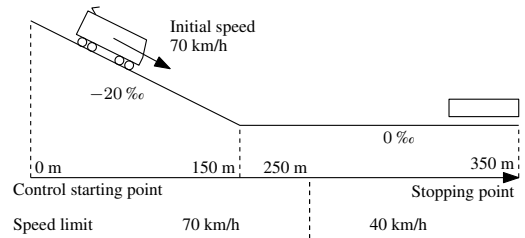


図 1 ケーススタディにおける線路形状のパラメータ
Fig. 1. Parameters of the line shape for case study.

表 1 ケーススタディにおける車両の運動特性および線路形状のパラメータ

Table 1. Assumed restriction and line parameters for the case study.

Parameter	Value
Distance to stopping position x_{stop}	350 m
Initial speed v_{start}	70 km/h
Acceleration limit by ride comfort $a_{max,c}$	3.3 km/h/s
Acceleration limit by adhesion $a_{max,a}$	2.5 to 3.5 km/h/s
Jerk limit by ride comfort $a_{max,a}$	2.16 km/h/s ²
Gradient s	-20 % e before 150 m 0 % e after 150 m
Speed limit v_{max}	70 km/h before 250 m 40 km/h after 250 m

提案法において、以下の仮定を導入する。停止ブレーキ走行において速度を上げる再加速はないものとするが、上り勾配や低い速度制限があるときには定速運転のための力行の挿入を可能とする。車両の走行抵抗や曲線抵抗は、ブレーキ制御においては最大減速度を減少させないため、軌道設計時にはこれらを考慮せず、速度軌道からブレーキ力を計算するときには走行抵抗を考慮することフィードフォワード制御出力を設計する。

ジャークに関する最短時間速度軌道は、最適化問題として(2)式のように定式化される。決定変数はジャークの時間軌道 $j(t)$ であり、目的関数は走行時間 T である。

$$\text{minimize } T \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{subject to } |a(t)| < a_{max,c}, |j(t)| < j_{max,c},$$

$$|a(t)| < a_{lim}(x), v(t) < v_{lim}(x),$$

$$x(0) = 0, x(T) = x_{stop}, v(0) = v_{start}, v(T) = 0,$$

$$a(0) = 0, a(T) = 0$$

(2) 式は以下の方法で、ジャークに関する Bang-bang 制御を設計することで解くことが可能である。車両の走行方法を(3)式に示す一定のジャークに対する多項式とする。

$$\begin{cases} a(t) = a_0 + j(t - t_0) \\ v(t) = v_0 + a_0(t - t_0) + \frac{1}{2}j(t - t_0)^2 \\ x(t) = x_0 + v_0(t - t_0) + \frac{1}{2}a_0(t - t_0)^2 + \frac{1}{6}j(t - t_0)^3 \end{cases} \dots\dots\dots(3)$$

車両の動かし方を次の 4 つに分類する。

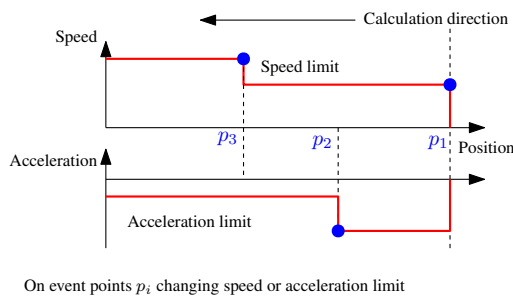


図 2 速度、加速度制限の変化位置と定義されるイベント点
Fig. 2. Definition of event points.

- 正の最大ジャーク走行, (3) 式の $j = +j_{max}$ とおく。
- 負の最大ジャーク走行, (3) 式の $j = -j_{max}$ とおく。
- 定加速度走行, (3) 式の $j = 0$ とおく。
- 定速度走行, (3) 式の $j = 0, a_0 = 0$ とおく。

図 2 のように、速度制約または加速度制約が変わる点をイベント点と呼ぶ。加速度制約は勾配により変化し、(1) 式を用いて、ブレーキの最大減速度と勾配の値から計算される。提案法では、隣接するイベント点間が定める区間ごとの区分的に、(3) 式による多項式速度軌道の計算を行う。

計算開始点を停止位置、速度 0、加速度 0 として以下の計算を繰り返し行い、停止位置から初期位置、速度を目指して逆算する。これら(1)から(4)の手順により、a, b, c, d の 4 つの走行方法の選択を初期位置、速度に到達するまで繰り返すことにより、最短時間速度軌道が生成される。(1)から(4)の走行状態の遷移規則は図 3 のように表される。

(1) 速度と加速度が現在地点での制限値未満であるとき、次のイベント点と加速度制約ちょうどになる地点の距離が短い方まで正の最大ジャーク運転を行う。

(2) 加速度が現在地点での制限値に等しいとき、次のイベント点まで制限加速度による定加速度運転を行う。

(3) 速度が現在地点での制限値に等しいとき、次のイベント点まで制限速度による定速度運転を行う。

(4) 現在地点で加速度および速度の制約違反がある場合、1 つ前の計算点に戻り、その点で選ばれた走行手法で途中位置 q まで進み、点 q から負の最大ジャーク走行を付け足す。そして、次のイベント点において加速度、速度の違反している方の制約をちょうど満たすようにするための位置 q と負の一定ジャーク走行の終了点 r を求める。次の計算を点 r から再開する。次のイベント点において速度違反の時は、速度制約が満たされるときの加速度を 0 にする。ただし、速度制約がイベント点において変化する場合は加速度を 0 にしない。点 q, r が実数として存在しない場合は 1 つ前の計算点を破棄し、制約が満たされるまでその前の計算点を遡る。

制御開始位置における速度が初期速度に達しない場合は、与えた加速度およびジャークの制限の下で実行可能な速度軌道が存在しないため、制限を緩和して解き直す必要がある。

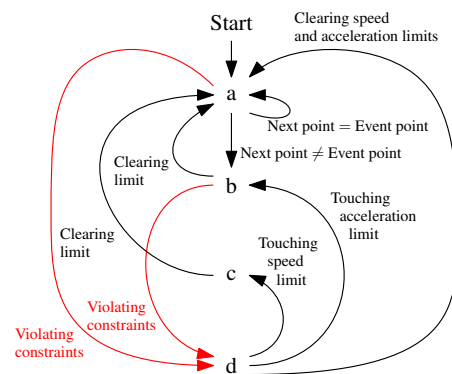


図 3 提案法における走行状態 a, b, c, d の遷移規則
Fig. 3. Transition rule of driving methods a, b, c, and d in the proposed trajectory generation method.

提案法では、設定された速度、加速度、ジャークの範囲内で最短時間の運転パターンを計算するので、加速度やジャーク制限を低くすると走行時分が延びる。通常、走行パターンの設計には余裕時分を付加するため、実務上は問題がないと考えられる。設計者が想定する最悪の加速度制限の低下を加味して、数値シミュレーションを予め行うことで、必要な走行時分の見積もりを行うことも可能である。また、提案法において、乗り心地の保証は、加速度、ジャークの最大値を設定以下に抑えることで実現する。

4. 提案制動軌道生成法の性能の数値検証

図 1 および表 1 に定めるケーススタディに対する、提案法による速度軌道生成結果を図 4 に示す。表 1 において、粘着特性が定める加速度制限は最大の 3.5 km/h/s とした。速度制限の直前と停車直前に最大減速度でブレーキをかける、できるだけ高速度で走行する省エネルギーな軌道が得られた。加えて、停止直前や減速開始、終了時にはジャーク制限を満たすために加速度が緩和されており、乗り心地に配慮した走行軌道が生成されている。

続いて、図 5 に、粘着特性が定める最大加速度 $a_{max,a}$ が変化した場合に生成される走行パターンの変化を示す。いずれの走行パターンにおいても、加速度軌道やジャーク軌道は設定した制約条件を全て満たしている。 $a_{max,a}$ が線路の全体で変化するとき、車両が出力する加速度が下がるにつれて減速開始位置が手前になる。このため、停止制御開始位置と停止位置の間に十分な距離がない場合、停止位置に止まれない問題が生じる。実用上は、想定される加速度の低下に対し、十分に余裕を持って停止制御開始位置を設定する必要がある。また、減速度が低いほど停止までに時間を要する。図 5 のケースでは、最大減速度が 3.5 km/h/s から 2.5 km/h/s に低下するとき、走行時分は 31.1 秒から 33.4 秒へ延びた。このように、環境変化に対する余裕時分の設計の指針としても速度軌道設計結果を用いることが可能である。

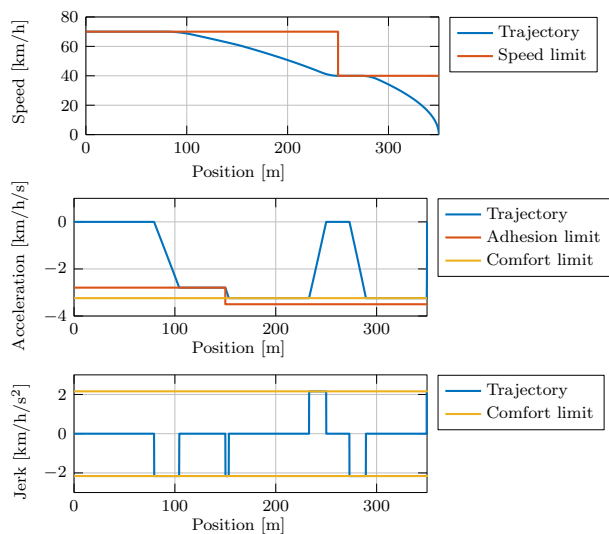


図 4 ケーススタディに対する速度軌道生成結果
Fig. 4. Speed profile generation result for the case study.

5. 結論

本研究では、鉄道車両駆動のためのフィードフォワード制御設計手法として、加速度とジャークの上限を与えて、位置依存の速度及び加速度制約を満たしつつ最小時間で走行する減速パターンを与える方法を提案した。3次以下の代数方程式を速度、加速度制限が変化するイベント点ごとに繰り返し解くのみなので計算負荷が軽い。得られる軌道が走行時分、乗り心地、エネルギーの面で最適なものとなる。提案法はこの2点で実用的である。提案手法は車両の出発から停止までの走行軌道の一部である停止に至る軌道を最適化する手法である。本手法の応用例として、他の数値最適化手法により走行軌道全体を最適化してから、乗り心地を本手法で考慮し停止制御の走行軌道を得る方法が考えられる。また、走行ごとにばらつくブレーキ開始位置、速度から停止に至る最短時間軌道を走行する車上で素早く計算することにも適用可能である。

文 献

- (1) 渡邊翔一郎, 佐藤安弘, 古関隆章, 水間毅, 田中龍治, 宮路佳浩, 磯部栄介, “自動列車運転装置を用いた省エネルギー運転制御手法の実証試験,” 電気学会論文誌 D, vol. 137, pp. 924–933, 2017.
- (2) L. Kovudhikulrungsri and T. Koseki, “Precise speed estimation from a low-resolution encoder by dual-sampling-rate observer,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 11, pp. 661–670, 2006.
- (3) 大矢純子, 高木康夫, 飯野穰, 西村致知, “自動列車運転システムのためのモデル予測型パターン追従制御アルゴリズム,” 電気学会論文誌 D, vol. 115, pp. 53–62, 1995.
- (4) 中川千鶴, “鉄道分野の振動乗り心地評価研究とその活用,” バ

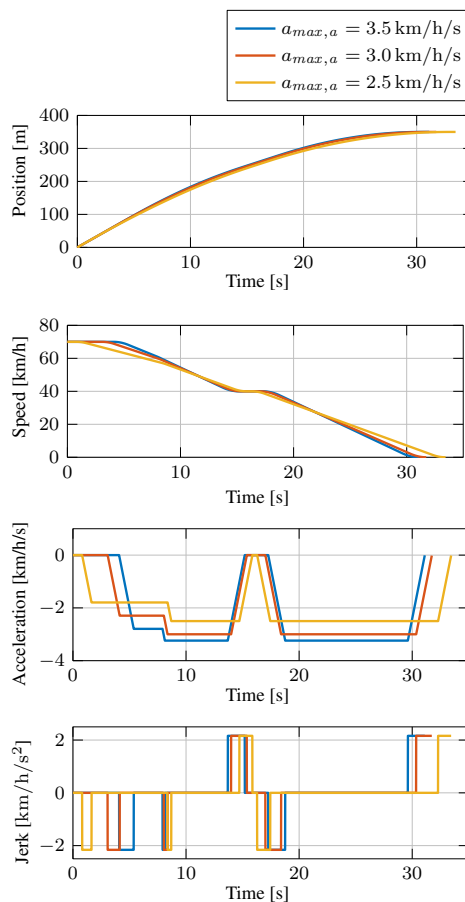


図 5 粘着特性が定める加速度制限 $a_{max,a}$ を変化した場合の速度軌道の変化
Fig. 5. Speed profile generation results for varying acceleration limits by adhesion $a_{max,a}$.

- イオメカニズム学会誌, vol. 41, pp. 15–20, 2017.
- (5) 小美濃幸司, 白戸宏明, 遠藤広晴, 清野寛, “乗り心地に配慮したブレーキパターン,” 人間工学, vol. 42, pp. 164–171, 2006.
- (6) M. Miyatake and H. Ko, “Optimization of train speed profile for minimum energy consumption,” *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 5, pp. 263–269, 2010.
- (7) G. M. Scheepmaker and R. M. Goverde, “Energy-efficient train control using nonlinear bounded regenerative braking,” *Transportation Research Part C*, vol. 121, 2020.
- (8) 木村彩恵, 吉本剛生, 上田健詞, 高橋理, D. Nikovski, “乗り心地と省エネルギーを考慮したマルコフ決定過程による列車走行曲線最適化,” 電気学会論文誌 C, vol. 134, pp. 1577–1583, 2014.
- (9) 木村彰, “電気車のための加速度変化率を制限したロバスト非線形速度制御,” 電気学会論文誌 D, vol. 122, pp. 807–815, 2002.
- (10) E. Dincel, H. Nak, Şirin Akkaya, M. Canevi, İlhan Mutlu, and M. T. Söylemez, “Robust control of railway traction system,” vol. 51. Elsevier B.V., 2018, pp. 171–177.
- (11) P. Lambrechts, M. Boerlage, and M. Steinbuch, “Trajectory planning and feedforward design for electromechanical motion systems,” *Control Engineering Practice*, vol. 13, pp. 145–157, 2005.