

無線による連続位置情報に基づき

遅延伝搬を抑制する列車制御法の数値的評価

○坂井 桂祐 [電]大西 亘 [電]古関 隆章 (東京大学)

田中 和広 森田 隼史 徳原 克俊 葛西 光希 (日本信号)

Numerical evaluation of a train control method to mitigate delay propagation
based on communication-based continuous train position

○ Keisuke Sakai, Wataru Ohnishi, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

Kazuhiro Tanaka, Shunji Morita, Katsutoshi Tokuhara, Koki Kasai (Nippon Signal)

It is important to mitigate delay propagation due to exceeding station dwell time in frequently operated urban railways. We propose a speed control method to minimize interval time between station arrival and departure based on real-time position of the preceding train from communication-based train control (CBTC) system under the situation where the departure time of the preceding train is uncertain. We verify the advantages of the proposed control method by a case study on a numerical model of a realistic route with speed limits and gradients.

キーワード：都市鉄道，高頻度運転，遅延伝搬，軌道最適化，列車群制御，不確かさ

Key Words: Urban railway, Frequent train service, Delay propagation, Trajectory optimization, Train group control, Uncertainty

1. はじめに

日本の鉄道は高い定時性を長所としているが、遅延によって定時運行が乱されることがある。日常的な小規模遅延の主な原因は、駅での停車時間の増加である¹⁾。特に高頻度運転が行われる線区では、停車時間の増加により生じた遅延が後続列車へ遅延が波及する遅延伝搬が課題である。

今後地下鉄等に導入が進むと期待される無線式列車制御システム (Communication-Based Train Control system, CBTC) では、各列車のリアルタイム連続位置情報が中央装置へ集められる²⁾。先行列車のリアルタイム連続位置情報には、遅延伝搬を抑制する列車制御が可能になるポテンシャルを持つ。そこで、著者らはこの情報を利用する先行列車最適追従制御アルゴリズムを提案し、まず速度制限等の影響のない基本的な路線条件での走行をシミュレータで再現し、遅延伝搬の抑制効果があることを数値計算で検証した³⁾。その後、速度制限や勾配を持つ路線にも適用できるようシミュレータを改良した。本稿では同一方向に走る先行列車の出発から後続列車の到着までの発着時隔を数値計算で求め、現実に近い路線モデルを基本的な路線条件の簡易モデルと比較し短縮効果を評価する。

同様に遅延伝搬を抑制する制御として、先行列車の駅出発時刻の予測に基づいた予測制御による列車制御が提案されている⁴⁾。予測制御は次駅停車ホームへの進路開通時刻が予測できることを前提に、次駅に最も早く到着し、駅間で止まる機外停止を避けるよう速度を制御する方式である。予測を行うことで不要な加減速をせず省エネルギーな走行も可能になるが、乗客の動きに依存する停車時間を完全に予測することは困難である。そこで、本稿では先行列車の出発時刻の予測が不完全でも実用化できる手法とすべく、先行列車の出発時刻は実際に出発するまで確定しない状況を仮定する。

また、本稿では図 1 のように、駅間を移動閉塞、駅ホーム区間を 1 列車のみ進入可能とする条件を前提とする。この条件を前提とする理由は、駅ホーム区間に固定閉塞を採用する既存の無線式列車制御システムへの適用が目的であるためである。

2. 駅発着時隔を最小化する速度制御アルゴリズム

著者らが提案した制御アルゴリズムは駅発着時隔の短縮に一定の効果があることを確認できた³⁾。提案法の制御アルゴリズムをまとめると図 2 のようになる。この章で

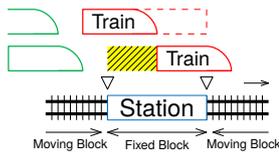


図1 駅ホーム区間の扱い

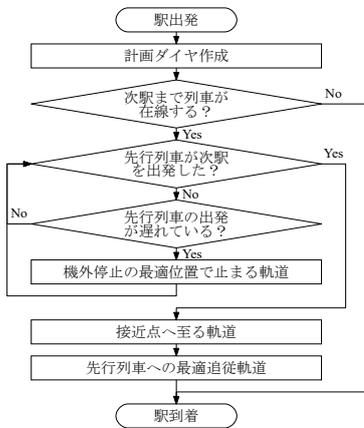


図2 提案法のフローチャート

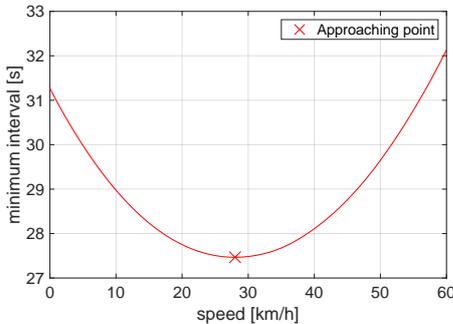


図3 進路開通時刻での速度と到着までの所要時間の関係を示す一例

は先行列車の出発前後に分けて後続列車の速度軌道の定め方の概略を述べる。

2.1 先行列車の出発後：接近点を通過

発着時隔を短縮させるためには、後続列車が駅ホーム区間へ進入可能となる進路開通時刻を過ぎてから、できるだけ高い速度で走行することが求められる。つまり進路開通時刻における後続列車の位置と速度の組が後続列車の次駅到着時刻を決定することになる。

先行研究⁴⁾の予測制御方式では、発着時隔を最小化する進路開通時刻での位置と速度の組を「接近点」と呼ぶ。これは以下のように求められる。まず、位置は次駅へ近い方が早く到着できるが、進路が開通しなければ駅ホーム区間の手前で停止する必要があるため、その制動パターン上に絞られる。制動パターン上では速度に対して位置が一意に定まるため、発着時隔の最適化は進路開通時刻における速度（1変数）のみの最適化に帰着できる。図3のように、速ければ進路開通時に次駅から遠ざかる必要があつて時間を要し、遅ければ再加速に時間を要するというトレードオフの関係がある。

提案法では、先行列車が出発した時点で進路開通時刻を予測し、その進路開通時刻に先ほど求めた接近点へ到達する軌道を引く。本稿では、先行列車の出発時刻は予測できないとする。一方で、先行列車は駅出発後に最大加速度で加速し続けることとして、先行列車が出発してから最後部分が駅ホーム区間を完全に抜けるまでの時間を高い精度で予測できると仮定する。

2.2 先行列車の出発前：機外停止の最適位置で停止

先行列車の出発遅延が長時間となる場合、後続列車は駅間で止まる機外停止を避けられない。機外停止した場合でも駅発着時隔を最小化するためには、停止状態から再加速して接近点へ到達可能な位置で機外停止する必要がある。そのような位置はある範囲に分布しているが、その中で最も次駅へ近い位置を本稿では「機外停止の最適位置」と呼ぶ。この位置は駅発着時隔を最小化した後、機外停止から接近点到達までの消費エネルギーを最小化した位置である。消費エネルギーが最小となる理由は、停止状態から最大加速のみで接近点へ到達し、加速時間が最短になることが挙げられる。

一方で、先行列車の遅延時間がわずかで発着時隔の余裕を超えていなければ、後続列車は減速をする必要なく次駅へ到着できる。そこで提案法では、先行列車の出発遅延を検知してからしばらくは計画ダイヤ通りの走行を行い、続いて最大減速で機外停止の最適位置に停止する軌道を引くこととした。

3. 実際の路線に合わせた数値計算の手法

2章で述べた制御アルゴリズムで駅発着時隔を短縮するためには、進路開通時刻にちょうど接近点を通過する精密さが求められる。そのためには自動運転が必要と考えられるが、さらに実際の車両や路線に合った速度軌道を生成することも重要である。この章では数値計算の手法について述べる。

3.1 安全バッファの考慮

安全バッファとは、移動閉塞の場合に列車位置の検出誤差や無線通信の遅延時間に応じて設ける、列車の安全を確保するための範囲である。実際の列車は走行中に安全バッファの長さが伸び縮みする。数値計算上でもこれを考慮する。

列車前後の安全バッファ長をそれぞれ l_f, l_r とすると(1)–(2)式で求められる。

$$l_f(x, v) = r(x - x_m) + v\tau + l_c \quad (1)$$

$$l_r(x) = r(x - x_m) + l_c \quad (2)$$

ここで、 x は適当な位置を原点とする1次元座標における列車の先頭位置、 v は列車の速度、 x_m は最後に通過した位置補正地上子の位置、 r ($= 0.1\%$) は相対位置検知の積算誤差に対応する誤差率、 τ ($= 0.5$ s) は無線通信の遅延時間、 l_c ($= 2$ m) は位置検知の分解能による誤差に対応する固定の安全バッファ長である。以上の要因で追加される

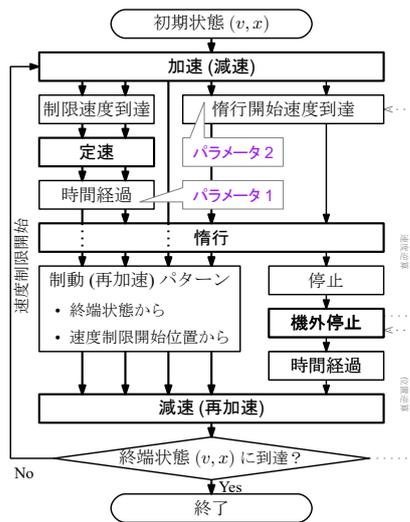


図4 運転曲線生成アルゴリズム

安全バッファの合計長は、位置と速度の組が与えられれば確定論的に決定できる。

また、実際の列車では空転や滑走が発生し、相対位置検知の正確性が低下する。そのため、無線式列車制御システムでは、空転や滑走が発生した場合も安全バッファが加算される。しかし、今回の数値計算では、空転や滑走を実装において付加的に考慮すべき外乱として捉え、発生しないと仮定した。

安全バッファは列車が存在する可能性のある区間を含むため、速度制限区間は安全バッファを含む先頭部・最後部に基いて切り替える。速度 v の速度制限区間の起点方について、速度制限を開始する先頭位置（安全バッファを含まない） x は(3)式で求められる。

$$x = \frac{x_s - (v\tau + l_c) + r x_m^i}{1 + r} \quad (3)$$

ただし、制限区間の開始位置を x_s 、 i 番目の位置補正地上子の位置を x_m^i としている。複数の位置補正地上子がある場合、 x_s よりも手前にある中で最大の x を採用する。速度制限区間の終端方についても同様である。

3.2 速度制限に対応した軌道生成

駅間に速度制限がある場合は速度制限に基づき安全バッファを考慮して区間を分割し、区間ごとに生成した軌道を連結する。各区間内では図4に示す通り、基本的に「加速→定速→惰行→減速」の順にノッチを切り替える。定速はその区間の最高速度を保つ走行である。各区間は定速継続時間と惰行開始速度の2パラメータを持つ。

最速運転曲線を求める際は、定速継続時間をできるだけ長くする。惰行開始速度は便宜上、その区間の制限速度に設定する。最速運転曲線は接近点から駅停車位置への運転曲線などで用いる。

一方で、先行列車が出発した瞬間から接近点までの速度軌道は、所要時間が定まっている運転曲線である。これは最速運転曲線を初期状態として、所要時間が一致するまで徐々に速度を下げていくことで求める。具体的には、

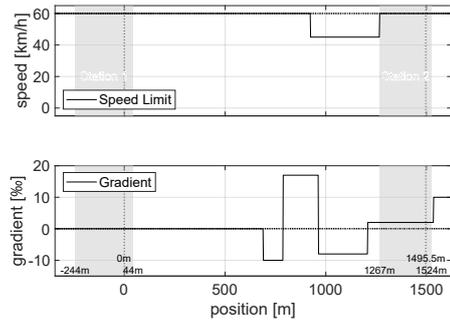


図5 路線モデルの最高速度と線形

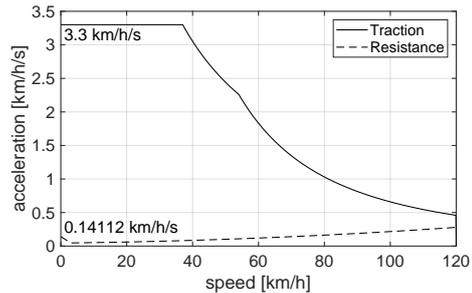


図6 モデル列車の引張り特性と列車抵抗

1. 最も高速な定速区間の継続時間を縮める。
2. 最も高速な惰行開始速度を下げる。定速を含む他の区間の制限速度以上の範囲で探索する。

の操作を繰り返す。これらの操作によって惰行が連続する区間ができれば、2区間を結合する。所要時間を一致させる値を求める際は、定速継続時間か惰行開始速度のどちらか1変数の探索を行うことになる。

4. 遅延伝搬の抑制効果を検証するためのモデル設定

2章で述べた制御アルゴリズムの性能を評価するため、以下のモデルに基づく数値計算を行った。

4.1 都市鉄道の路線モデル

路線の範囲は「駅1」から「駅2」へ向かう一方向で、距離と最高速度、勾配は図5に示す通りである。速度制限・勾配なしをケース1、速度制限あり・勾配なしをケース2、速度制限なし・勾配ありをケース3として比較する。位置補正地上子は0m地点のみにある。

ダイヤについて、全列車が両駅に停車し、100s間隔で走行、計画ダイヤでの駅2停車時間は40sとする。先行列車が駅1を出発する瞬間を0sとし、ここから300s間分を0.02s刻みで計算する。回復運転の影響を除いて考察するため計画ダイヤは余裕時分のない最速運転曲線とし、遅延を発生させる列車とその直後の制御を行う列車の2列車の走行を模擬する。制御を行わない比較対象のケースでは、進入可能な位置まで最高速度で進む「前詰め運転」を行う。

表 1 列車諸元

常用最大減速度 β	3.5 km/h/s (0.972 m/s ²)
電動車質量 M_M	170 t
付随車質量 M_T	125 t
編成両数 n	10
列車長 L	200 m

表 2 各ケースの発着時隔の短縮効果

	制限	勾配	最短発着時隔	最大短縮効果
1	なし	なし	51.1 s	4.1 s
2	あり	なし	52.2 s	3.3 s
3	なし	あり	51.3 s	3.8 s

4.2 通勤電車の車両モデル

引張力特性、走行抵抗と出発抵抗を総合した列車抵抗 $R(v)$ は図 6 のように設定した。走行抵抗と勾配抵抗の近似式は文献⁵⁾に基づいた。その他の具体値は表 1 に示す通りである。簡単のため空走時間はないものとする。

車両の速度 v および位置 x は、計算周期の間は一定で階段状に変化する加速度 $a(t)$ を入力として、(4) 式によって求める。 M は総質量である。安全バッファの長さは 3.1 節の条件で計算する。

$$\frac{dv}{dt} = a(t) - \frac{R(v)}{M}, \quad \frac{dx}{dt} = v(t) \quad (4)$$

制限速度 v_{max} は、純移動閉塞の先行列車の速度によらず衝突しない条件により定める。平坦区間では $v_{max} = \sqrt{2d\beta}$ と表せる。ただし、 d は前方安全バッファを含む自列車の先頭位置と、後方安全バッファを含む後続列車の後尾位置との距離、 β は速度に依存しない減速度である。

5. 数値計算結果に基づく遅延伝搬の評価

速度制限または勾配を持つ路線モデル（ケース 2, 3）で数値計算を行い、簡易モデル（ケース 1）と比較する。列車間の駅発着時隔の最小値と、同じ遅延時間同士で比較した発着時隔の短縮効果の最大値を表 2 に示す。駅手前に速度制限がある場合、後続列車の駅進入速度が下がるため発着時隔が伸びた。また、前詰め運転の場合と駅構内の最高速度に差がつかなくなるため、制御による短縮効果も小さくなったと考えられる。一方で勾配がある場合は発着時隔がほとんど変わらず、発着時隔に対する影響は速度制限ほど大きくなかった。

初期遅延時間を 0 から 30 秒まで変化させた際の発着時隔の変化を図 7 に示す。実線が提案法の制御を行った場合、破線が制御を行わない前詰め運転の場合であり、実線と破線の上下方向の差が発着時隔の短縮効果を表す。制御を行う場合、可能であれば必ず接近点を通過するため発着時隔を最小化できる。このことは実線が水平になる領域に現れている。一方制御を行わない前詰め運転の場合、遅延時間が長く駅の直前で機外停止をしてしまうと発着時隔を

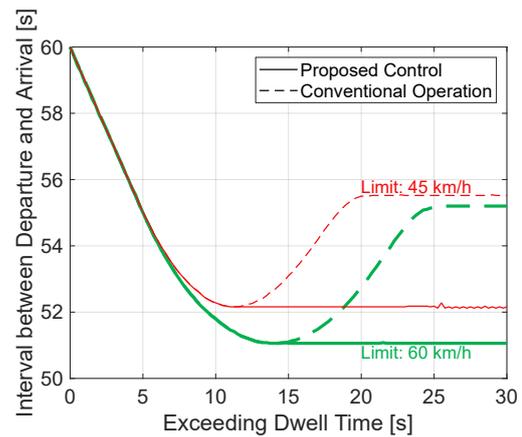


図 7 発着時隔の変化（勾配なし路線モデル）

最小化できない。なお、時隔余裕は約 5 秒であった。

6. まとめ

本稿では CBTC で用いられる連続位置検知の利用を前提として、駅で長時間停車する先行列車からの遅延伝搬を抑制する列車制御を検討した。次駅到着が最も早くなる「接近点」を通過し、停止状態から最大加速のみで接近点へ至る「機外停止の最適位置」に最大減速で止まる速度軌道を引くアルゴリズムを提唱した。この方法は先行列車の動きをリアルタイムに把握できれば遅延の予測を必要とせず、後続列車の運転を確定論的に決められるため CBTC 時代における実用的な特長を持つ。実際の列車間制御に導入する安全バッファや速度制限等を考慮したケーススタディーで、提案法が先行列車の出発時刻を予測せず発着時隔を短縮できることと、その短縮効果は制限速度の影響を強く受けることを定量的に確認した。今後は先行列車の出発時刻に関して限定的な予測情報を採用するなど、さらに先進的な制御技術の可能性も追究したい。

参考文献

- 1) 電気学会・鉄道における運行計画・運行管理業務高度化に関する調査専門委員会：鉄道ダイヤ回復の技術，オーム社，2010。
- 2) 三枝秀隆：無線列車制御システム (SPARCS) 概要，鉄道と電気技術，Vol. 17, No. 7, pp. 19-23, 2006。
- 3) 坂井桂祐，大西亘，古関隆章，田中和広，森田隼史，徳原克俊：高頻度運転時の遅延伝搬を抑制する先行列車最適追従制御，電気学会研究会資料，TER-20-26, pp. 7-12, 2020。
- 4) 平栗滋人，富井規雄，長谷伸一：予測制御による列車制御方式，鉄道総研報告，Vol. 17, No. 6, pp. 29-34, 2003。
- 5) 電気鉄道ハンドブック編集委員会：電気鉄道ハンドブック，コロナ社，2007。