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

坂井　桂祐*，大西　亘，古関　隆章（東京大学）
田中　和広，森田　隼史，徳原　克俊（日本信号）

Optimal tracking control to the preceding train
to suppress delay propagation in a highly frequent service

Keisuke Sakai*, Wataru Ohnishi, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)
Kazuhiro Tanaka, Shunji Morita, Katsutoshi Tokuhara (Nippon Signal)

In a highly frequent urban train service, suppression of delay propagation due to excessive dwell time is significant. The authors propose a speed control method to minimize the interval between departure and arrival at a station under uncertainty of the preceding train's departure, and evaluate the performance by assuming communication-based continuous real-time train position acquisition and moving block system except for station sections.

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
(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課題が存在する。特に高頻度運転が行われている線区では，遅延の回復等のため列車ダイヤに含まれている余裕時間が少なく，先行列車の遅延がわずかであっても後続列車は減速や停止を余儀なくされ次駅への到着が遅れる。このように後続列車へ遅延が波及することを遅延伝搬といい [1]，伝搬した遅延を 2 次遅延 (knock-on delay) という [2]。

数分程度以下の小規模な遅延に対する運転整理手法として，遅延列車の前の列車を意図して遅らせる間隔調整が存在する [3] が，後続列車に対しては，遅延伝搬を抑制し最大の輸送密度を実現することで輸送力を確保することが重要である。

小遅延の原因として，急病人の救護・ドアへの荷物挟まり・駆け込み乗車などにより駅での停車時間が延びることがある [3]。そこで，本稿では駅停車時間の超過から始まる遅延伝搬を最小限に抑制する対策として，棒線駅での発着時隔，つまり先行列車の出発から後続列車の到着までの時間を最小化することに着目し，駅の手前で待たされる後続列車がホームが空き次第すぐに到着する状態を目標とする。

同様の目的で，先行列車の駅出発時刻の予測に基づいた予測制御という方式が提案されている [4][5]。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，かつ駅間での停止である機外停止を避けるよう動的に運転曲線を変更する方式である。類似の研究として，地上・車上間の通信容量が比較的大きな Communication-Based Train Control system(CBTC) の利用を前提とし，遅延列車によって生じる競合を防ぐ目的で各列車へ最適速度を助言する研究がある。例えば，山岳トンネルの単線区間に差し掛かる区間では，対向列車の遅延時間の予測に基づいて求めた省エネルギーの速度軌道を運転士に示すことで消費エネルギーが削減された [6]。他には，先行列車の遅延時間の予測に基づき棒線駅において後続列車が最早到着する軌道を車両の加速特性を単純化する条件下で解析的に求めた研究がある [7]。

これらの先行研究から，予測を行うことで不要な減速をせず省エネルギーな走行が可能になると分かるが，鉄道において停車時間を精度よく予測する手法は未だ確立していない。そこで，本研究では先行列車の出発時刻が不確かな状況でも利用可能なアルゴリズムを検討することにした。

2. 駅発着時隔を最小化する速度制御アルゴリズム

本稿では先行列車最適追従制御と称し，先行列車の出発時刻が未確定の状況下で，先行列車の遅延時間がいかなる値であっても駅発着時隔を最小化できる速度制御アルゴリズムを提案する。ここで最適追従とは，駅発着時隔を最小化することを指す。

〈2･1〉 閉塞設定　駅での発着時隔を短縮する方法は，線区の閉塞システムによって異なる。閉塞とは線路を数十メートル～数キロメートルごとに区切り，1 区間に 1 列車しか進入を許さないことにより，列車同士の衝突を防ぎ安全を確保する仕組みである [8]。従来から存在する固定閉塞システムは，閉塞に列車が在線しているかどうかを検知するものであるため，他列車の位置情報は閉塞単位でしか分からない。

一方，移動閉塞では先行列車が移動するに従い，後続列車

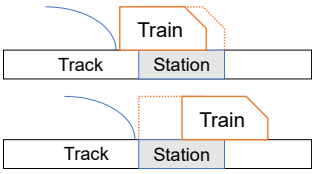

図 1　駅ホーム区間の扱い
Fig. 1.　Block section at a station

が進入可能な限界位置も移動する点が異なる [8]。これには他の列車の位置を連続的に把握することが必要である。移動閉塞を実現する方法の 1 つに CBTC がある。CBTC では地上・車上間の双方向の無線通信により，車両の速度発電機で算出した相対位置や無線測距により取得した絶対位置 [9] を他列車へ伝えることによって移動閉塞が実現できる。

本稿では図 1 のような基本的に移動閉塞であるものの，駅ホーム区間は 1 列車のみ進入可能という条件を考える。これは，駅ホーム区間に固定閉塞を採用している既存の CBTC システムをモデルとしているためである。

全域が移動閉塞であれば，先行列車の速度情報を条件に加えて後続列車の加速度を調整し，列車間隔を最短に保って走行する「同期制御」を用いると発着時隔が最短となる [10]。しかし同期制御では機外停止が必要となるため，機外停止をせず省エネルギーな軌道を求める研究として，予測制御を移動閉塞に対応させたもの [11] や，動的計画法を用いたもの [12] がある。

〈2･2〉　接近点の概念　先行列車の出発時刻の予測は難しいが，駅を発車してから最後部が駅ホーム区間を完全に抜けるまでの時間は比較的高い精度で予測できる。すると，先行列車が出発した時点で次駅停車ホームへの進路開通時刻が予測可能であるため，進路開通時刻から次駅到着時刻までの速度軌道は固定閉塞での予測制御と同様に求められる。この節では予測制御の論文 (5) にて導入された接近点の概念を述べる。

駅発着時隔を最小化するために，後続列車の速度軌道は進路開通時刻 (t_1 とする) から駅停車時刻 (t_2 とする) までの所要時間を最小化するように定めなければならない。この間，最高速度以外の条件が特になければ，最大加速→（定速→）最大減速の運転方法となる。時刻の予測が外れた場合に備え，進路開通時刻では駅ホーム区間の手前で停止できる位置と速度で走行しなければならない制約が存在する。駅手前の停止限界位置を x_1，ホーム上の停止位置を x_2，この区間の最高速度を v_{max}，最大加速度を $\alpha(v)$，常用最大減速度を $\beta(>0)$，列車抵抗を $R(v)(>0)$ とすると (1)–(5) 式のように定式化される。

$$\text{minimize} \qquad t_2 - t_1 \tag{1}$$

$$\text{subject to} \qquad x(t_1) \leq x_1 - \frac{v(t_1)^2}{2\beta} \tag{2}$$

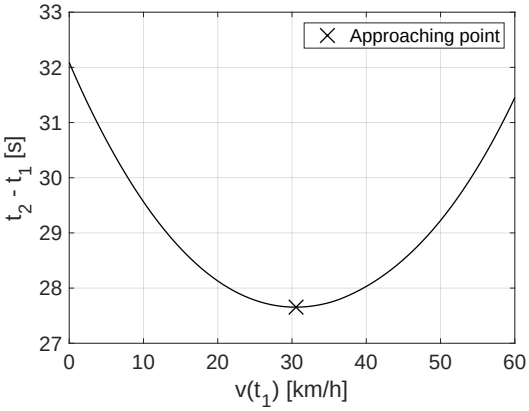

図 2　進路開通時の速度と停車までの所要時間の一例
Fig. 2.　An example of time from being permitted to enter a station to halt depending on entry speed

$$x(t_2) = x_2, v(t_2) = 0 \tag{3}$$

$$0 \leq v(t) \leq v_{max} \tag{4}$$

$$-\beta \leq \frac{dv}{dt} \leq \alpha(v) - R(v) \tag{5}$$

進路開通時刻での速度 $v(t_1)$ が同じならば，進路開通時刻での位置 $x(t_1)$ が停止位置へ近いと早く到着できるため，最適解は (2) 式が等号の場合である。すなわち進路開通時刻に駅手前の場内信号で停止するパターン上に当たる場合が最適解となる。この最適化は進路開通時の速度 $v(t_1)$ のみを自由変数とする 1 変数の最適化に帰着できる。進路開通時の速度が速ければ停止位置から遠ざかる必要があり，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り，次駅到着までの所要時間は図 2 のような下に凸のグラフとして表せる。所要時間が最小化される進路開通時刻における速度，位置の組を接近点と呼ぶ。路線の条件や車両の性能が時不変と考えれば，接近点および接近点以降の速度軌道は，先行列車の遅延時間にかかわらず同じである。

「前詰め運転」は信号現示上の進入可能な位置まで最速で進み，先行列車に最接近する運転方法であり，進路開通時の速度 0 km/h の場合に対応する。固定閉塞の区間で何も制御を行わない場合，前詰め運転となることが想定されるため，図 2 から発着時隔の短縮余地が読み取れる。

〈2･3〉　機外停止の最適位置　先行列車の出発遅延が長時間となる場合，後続列車の機外停止は避けられない。このような場合でも駅発着時隔を最小化するためには，機外停止の箇所は停止状態から再加速して接近点へ到達可能な位置でなければならない。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。エネルギーが最小となる理

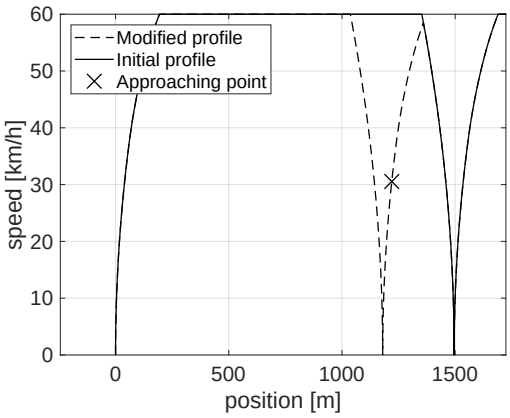

図 3　変更された運転曲線
Fig. 3.　Modified speed profile

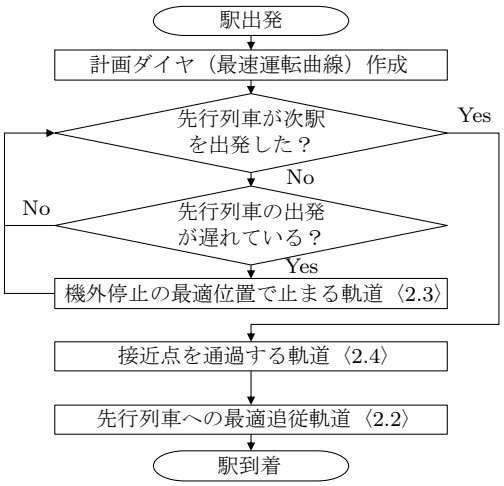

図 4　提案法のフローチャート
Fig. 4.　Flowchart of the proposal method

由として，停止状態から最大加速のみで接近点へ到達できるため，加速時間が最短となることがある。

一方で先行列車の出発遅延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することができる。そこで，先行列車の出発時刻が不確かな状況下での先行列車最適追従制御では図 3 のように，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，続いて最大減速度で機外停止の最適位置で停止する停止パターンを引き減速を行うこととした。

この制御法のアルゴリズムをまとめると図 4 のようになる。

〈2･4〉 接近点へ至る速度軌道の作成　駅発着時隔を最小化するためには進路開通時刻に接近点を通過していなければならない。そこで，先行列車の出発を検知し進路開通時刻が予測できたと同時に，進路開通時刻に接近点を通過するための速度軌道を作成する。

初期条件は先行列車の出発を検知したときの位置・速度，終端条件は接近点の位置・速度となることから，数理的には 2 点境界値問題に分類される。また，電気鉄道の走行をモデル化する際，引張力特性や列車抵抗による非線形性が避けられない。そのため，この最適制御問題は非線形最適化が必要となり，厳密解を求めるのは困難である。今回は文献 (11) にならい，ノッチの使用順を手動で決めておくことで探索空間を狭め，近似解を求める手法を採った。

基準となる運転曲線を引き，それぞれの走行時間と先行列車の出発から進路開通までの所要時間 T とを比較し，4 パターンに分けてパラメータ最適化を行う。「加速→定速→惰行→減速」という運転方法が省エネルギー運転となることが古くから知られており [13]，基準となる運転曲線は惰行を多用する以下の 3 パターンを用いる。それぞれの走行時間を T_1, T_2, T_3 とする。

（1）最大加速→（最高速度→定速→）最大減速パターン
　　（最速運転曲線）

（2）最大加速→最高速度→惰行→最大減速パターン
　　（定速なし運転曲線）

（3）最大加速 or 減速→惰行→停止→再加速パターン
　　（機外停止あり運転曲線）

なお，減速開始時刻はその時刻から減速軌道を引いて終端速度になったときの位置と終端位置の誤差を最小化する最適化問題として，インナーループで決定する。パラメータ調整の方法は以下の通りである。

（1）$T < T_1$ のとき
　　接近点に到達することができない。最速運転曲線を途中の時刻で打ち切る軌道となる。

（2）$T_1 < T < T_2$ のとき
　　定速なし運転曲線をもとにして，最高速度に達した後に惰行よりも速い走行である定速運転時間を挿入することにより，所要時間が一致する値を探す。

（3）$T_2 < T < T_3$ のとき
　　最大加速 or 減速→惰行→最大加速 or 最大減速パターンとなる。機外停止あり運転曲線での惰行開始速度と最高速度の間で惰行開始速度を変え，所要時間が一致する値を探す。

（4）$T_3 < T$ のとき
　　機外停止をするため，機外停止の時間によって所要時間を一致させる。

〈2･5〉 実現可能性　この制御では先行列車の出発が遅れているか，出発したかどうかがリアルタイムに分かっていなければならない。出発時刻を過ぎても列車の位置が変化しない場合は，出発が遅れていると判断できるため，CBTC の仕組みを通して列車位置を連続的に取得することで，遅延秒数を精度よく求めることができると考えられる。

また，先行列車が出発してから後続列車が駅へ進入可能

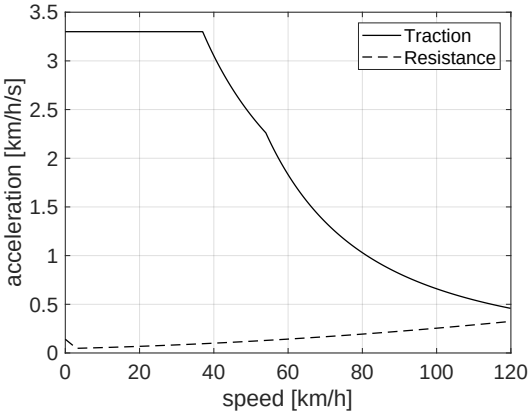

図 5　青線：引張力特性，橙線：列車抵抗
Fig. 5.　Traction curve and train resistance

になるまでの時間を予測できなければならない。これは基準運転時分の算出時に比較的高い精度で見積もることができると考えられる。低速度の定トルク領域では架線電圧にかかわらず一定の加速度が得られ，高頻度運転時の乗車率は満車に近いことが予想されるためである。こうしたデータは車種・駅ごとに CBTC の地上装置のデータベースで管理することが考えられる。

よって，本稿の先行列車最適追従制御は CBTC の利用を前提とすることで実現可能であると考えられる。

3. 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。

〈3･1〉 路線の条件　高頻度運転が行われている都市鉄道を想定した路線モデルを考える。路線の範囲は「駅 1」から「駅 2」へと向かう 2 駅間の片方向のみとするが，駅 2 を出発したのち無限遠に駅があるものとして走行を続ける。駅 1, 2 間の走行距離は 1500 m であり，簡単のため勾配・曲線・分岐はないものとする。

ダイヤについて，全列車が両駅に停車し，100 秒間隔で走行，駅 2 の予定停車時間は 40 秒とする。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，最大加速度で最高速度 60 km/h まで加速したのち定速を保ち，常用最大ブレーキで減速して駅に停車する。

発着時隔の短縮効果を検証するため，遅延列車とその直後を走行する制御対象列車の 2 列車の走行を模擬する。遅延のシミュレーションは先行列車の駅 2 での停車超過時間を 0 秒から 90 秒の間で変化させることによって行う。プログラムの実行時に停車超過時間は確定しているが，後続列車にはその情報を与えない。

〈3･2〉 車両の条件　起動加速度は 3.3 km/h/s，常用最大減速度は 3.5 km/h/s とした。走行抵抗 R[kN] は，速度を v[km/h]，電動車重量を W_M[t]，付随車重量を W_T[t]，編成両数を n とすると，文献 (8) の記載に基づき，

$$R(v) = (1.65 + 0.0247v)W_M + (0.78 + 0.028v)W_T + (0.028 + 0.0078(n-1))v^2$$

と表せる。出発抵抗は停止時に 0.141 12 km/h/s であり，3 km/h での走行抵抗値との間で線形補間する。引張力特性，走行抵抗と出発抵抗を総合した列車抵抗は図 5 のようになる。簡単のため空走時間はない，すなわちジャークの上限が無限大であるものとする。

編成重量 $W(= W_M + W_T)$ は 295 t，10 両編成で編成長は 200 m とする。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，安全を含んだ仮想列車長である安全バッファの長さは，簡単のため車両の前方に 10 m，後方に 2 m という一定値としている。

〈3･3〉 速度の条件　移動閉塞のシミュレーションでは，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制限速度を定める。d を先行列車との距離，β を自列車の減速度，v を自列車の制限速度とすると，$v = \sqrt{2d\beta}$ となる。なお，例外的に固定閉塞として扱う駅ホーム区間について，列車が駅ホーム区間に進入している間は駅ホーム区間全体を含むよう仮想的に列車長を延長させると，部分的な固定閉塞を移動閉塞の枠組みで統一的に扱うことができる。

〈3･4〉 計算の方法　先行列車が駅 1 に出現し駅 1 を出発する瞬間を 0 秒とし，ここから 400 秒間分を 0.02 秒刻みで計算する。車両の速度 v および位置 x は，計算周期 (0.02 秒) の間は一定であり階段状に変化する加速度 $a(t)$ を入力として，(6) 式によって求める。

$$\begin{cases} \dfrac{dv}{dt} = a(t) - \dfrac{R(v)}{W} \\ \dfrac{dx}{dt} = v(t) \end{cases} \tag{6}$$

消費エネルギー E は (7) 式のように加速に要する力学的なパワー P を時間で積分して求める。

$$\begin{cases} P(t) = (W\,a_{\mathrm{p}}(t) + R(v))v(t) \\ \dfrac{dE}{dt} = P(t) \end{cases} \tag{7}$$

$$a_{\mathrm{p}}(t) = \max(0, a(t))$$

消費エネルギーの計算において，き電回路や回生ブレーキは考慮しない。

4. 数値計算結果に基づく遅延伝搬の評価

2 章で述べたアルゴリズムについて，3 章の条件によって遅延伝搬の抑制効果の評価を行った。

初期遅延時間を 0 から 30 秒まで変化させたとき，各列車の出発遅延時間がどのように変化したかを表すのが図 6 である。実線が先行列車最適追従制御，破線が制御を行わな

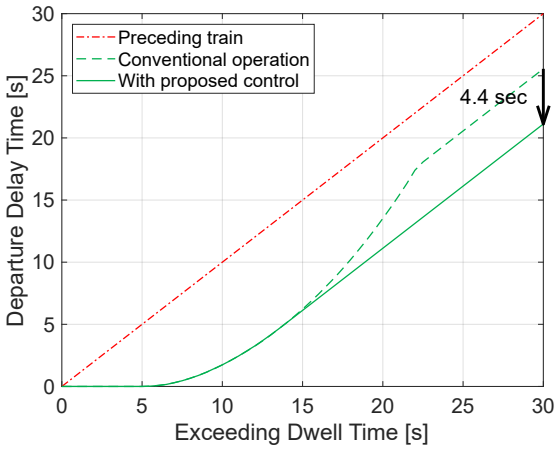

図 6　初期遅延時間に対する出発遅延時間の変化
Fig. 6.　Departure delay time depending on exceeding dwell time

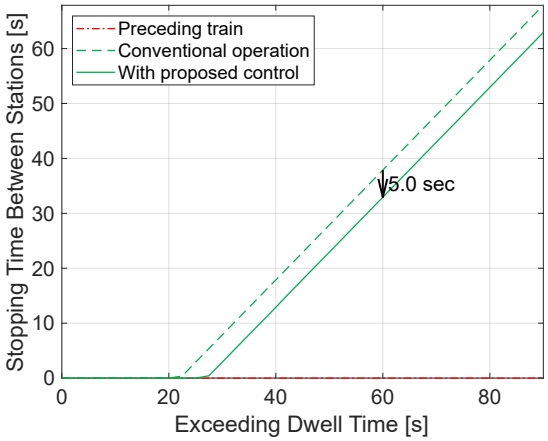

図 7　初期遅延時間に対する機外停止時間の変化
Fig. 7.　Stopping time between stations depending on exceeding dwell time

い前詰め運転である。実線と破線の差が発着時隔の短縮効果であり，最大で 4.4 秒短縮することができた。なお，前詰め運転で機外停止の発生する約 22 秒以降は，このまま線形で延長されるだけとなる。

4.4 秒という値は図 2 の進路開通時刻から次駅到着までの所要時間において，所要時間の最小値と進路開通時の速度が 0（前詰め運転）の場合との差に等しい。図 2 は 3 章と同じ条件で算出した図であり，図 2 から読み取れる駅発着時隔の理論的な短縮余地を先行列車の出発時刻の予測なしで実現できた。

初期遅延時間を 0 から 90 秒まで変化させたとき，各列車の機外停止時間がどのように変化したかを表すのが図 7 である。この図も同様に，実線と破線の差が機外停止時間の短縮効果であり，最大 5.0 秒短縮することができた。提案法では機外停止の位置が駅 2 から離れている分だけ機外停止が早く始まるが，先行列車が駅ホーム区間を完全に抜ける前に再加速を始めることができる。そのため前詰め運転の場合よりも機外停止が短くなったと考えられる。

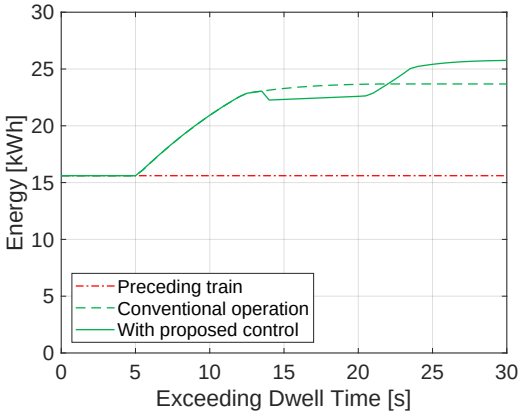

図 8　初期遅延時間に対する走行エネルギーの変化
Fig. 8.　Driving energy depending on exceeding dwell time

初期遅延時間を 0 から 30 秒まで変化させたとき，駅 1, 2 間の走行に要するエネルギーがどのように変化したかを表すのが図 8 である。先行列車の遅延時間が 30 秒になると後続列車は機外停止をする。この場合前詰め運転では 23.7 kWh であった消費電力量が提案法では 25.8 kWh と増加してしまう。駅 2 のホーム区間でより高い速度まで再加速が可能となるためである。すなわち所要時間の短縮効果の代償として消費エネルギーの増大は避けられない。

運転曲線の一例として図 9 に初期遅延時間が 60 秒の場合の軌跡を示す。提案法の場合，機外停止の位置が駅 2 から離れ，先行列車出発後の再加速で高速域まで達し，発着時隔が短縮していることが分かる。

5.　まとめ

高頻度運転時の都市鉄道には，主に駅停車時間の超過による遅延が先行列車から伝搬しやすいという課題がある。そこで本稿では CBTC で用いられる連続位置検知の利用を前提として，遅延伝搬を抑制する列車制御を検討した。具体的には先行列車の駅出発が遅れた場合に駅発着時隔の最小化により遅延伝搬を抑制することを目的として，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案し詳述した。この方法には先行列車の動きが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点に CBTC 時代における実用的な特長がある。この制御アルゴリズムを「先行列車最適追従制御」と命名し，ケーススタディーにより遅延伝搬の抑制効果を評価した。

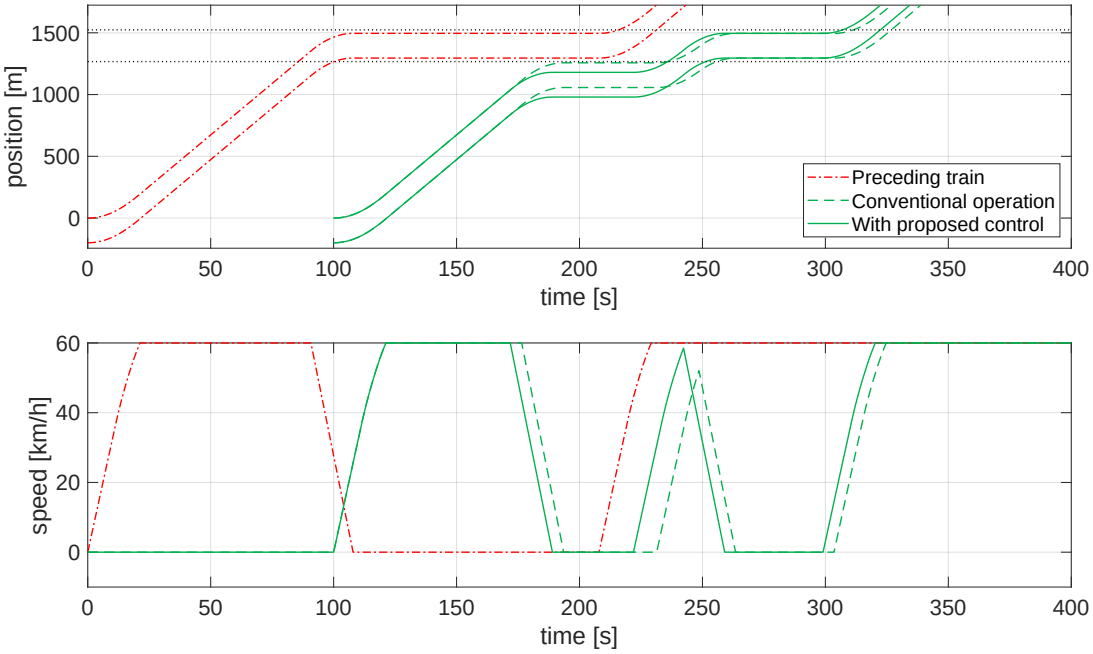

図 9　提案法の長所を示す一例：先行列車の出発遅延が 60 秒のときの軌跡

Fig. 9.　Graphical presentation of the advantage of the proposed train control: trajectories of two trains when the exceeding dwell time of the preceding train is 60 seconds

提案法では先行列車の出発時刻に関して予測情報を利用していないにもかかわらず，発着時隔の短縮効果は理論的な最高値を実現することができた。制御を行わない前詰め運転と比較し機外停止時間を短縮することもできた。ただし，消費エネルギーは増加してしまう。しかし，より後方の列車は前もって遅延を知ることができるため，予測制御の方法によって消費エネルギーを削減できる余地があると考えられる。今後は限定的な予測情報に基づく列車制御について検討を行う。

文　　献

（1） Y. Hirao, S. Sone: “Allocation of Marginal Time in Railway Block Signalling and Propagation of Train Delays”, The transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan.C, Vol. 103, No. 10, pp. 241–247 (1983) (in Japanese)
平尾裕司・曽根悟：「閉そくの余裕時間の配分問題と列車の遅延伝搬」，電気学会論文誌 C，Vol. 103，No. 10，pp. 241–247 (1983)

（2） 富井規雄：「鉄道ダイヤのつくりかた」，オーム社 (2012)

（3） 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)

（4） 藤原正弘・曽根悟：「先行列車出発時刻の予測に基づく短時隔運転の検討」，電気学会研究会資料，TER-93-6 (1993)

（5） S. Hiraguri, N. Tomii and S. Hase: “Train Control Method Based on Prediction Control”, RTRI Report, Vol. 17, No. 6 (2003) (in Japanese)
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)

（6） F. Mehta, C. Rößiger and M. Montigel: “Latent energy savings due to the innovative use of advisory speeds to avoid occupation conflicts”, WIT Transactions on The Built Environment, Vol. 114, pp. 99–108 (2010)

（7） J. Xun, T. Tang and B. Ning: “Optimization of speed profile for delayed train entering station”, Proc. of IEEE International Conference on Service Operations, Logistics and Informatics, pp. 428–433, Beijing, China (2011)

（8） 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)

（9） 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)

（10） R. Takagi: “Synchronisation control of trains on the railway track controlled by the moving block signalling system”, IET Electrical Systems in Transportation, Vol. 2, No. 3, pp. 130–138 (2012)

（11） T. Kunimatsu, T. Terasawa and Y. Takeuchi: “Development of Train Operation Simulator under Moving Block and Prediction Control”, IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol. 138, No. 4, pp. 313–322 (2018) (in Japanese)
國松武俊・寺澤孝彦・武内陽子：「移動閉そく・予測制御に対応した列車運行シミュレータの構築」，電気学会論文誌 D，Vol. 138，No. 4，pp. 313–322 (2018)

（12） S. Ichikawa and M. Miyatake: “Energy Efficient Train Trajectory in the Railway System with Moving Block Signaling Scheme”, IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 8, No. 4, pp. 586–591 (2019)

（13） Y. Kimura and S. Koga: “Energy Saving Operation of a Frequently Stopped Commuters’ Train”, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 20, No. 4, pp. 357–360 (1984) (in Japanese)
木村幸男・古賀澄夫：「短区間を比較的高速で走行する通勤形電車の省エネルギー運転方法」，計測自動制御学会論文集，Vol. 20，No. 4，pp. 357–360 (1984)