

鉄道システムの自動運転技術における
定点停止制御に関する研究

2019年 3月

小田 篤史

鉄道システムの自動運転技術における
定点停止制御に関する研究

小田 篤史

システム情報工学研究科
筑波大学

2019年 3月

概要

環境問題への取り組みに社会全体の関心が高まりつつある中、鉄道システムにおいても更なる消費エネルギーの低減が求められている。鉄道システムにおいて車両の駆動に関わるエネルギーがエネルギー消費の大部分を占めており、この駆動エネルギーの削減が鉄道システムの省エネに有効である。駆動に関わるエネルギーを削減する方法として、駅間の消費エネルギーが最小となる走り方を数理最適化技術で算出し、その走り方に従って列車を自動で運転する取り組みが期待されている。しかしながら現時点で省エネのために自動運転が導入される例は少なく、その理由として自動運転技術の導入コストの高さがある。自動運転技術の導入コストの高さは主に自動運転に必要な技術である定点停止制御の導入コストの高さに起因し、その要因として、(1)高精度自己位置推定のための装置が高価、(2)システム導入時に実使用環境下における専門作業員による調整作業が必要で人件費がかかる、がある。本研究では低コストな自動運転技術を確立し、鉄道システムの更なる省エネを実現すること目的とする。そのために高コストの原因となっている定点停止制御について低コスト化を図るために、画像処理を用いた自己位置推定技術や調整作業を自動化する自動調整技術を提案し、計算機シミュレーションや実験を通じて提案手法の実現可能性を検討する。検討の結果、(1)画像処理の活用により低コストで自己位置が推定可能であり、定点停止に適用可能であること、(2)近似関数を用いて計算負荷を低減した自動調整技術で停止位置精度を満たしつつ調整日数の低減が図られること、を明らかにする。本研究の成果を組み合わせることで自動運転技術を安価に実現できる見込みを得た。その結果、自動運転技術を用いて省エネな走行パターンで列車を走行させることが可能となり、運転士ごとの運転操作のばらつきに起因する消費エネルギーのばらつきが抑制され、消費エネルギーが 20%程度削減できると考えられる。

目次

第1章	序論	1
1.1	鉄道システムにおける省エネへの取り組み.....	1
1.2	鉄道システムにおける自動運転技術の現状と問題点.....	6
1.3	研究の目的.....	6
1.4	本論文の構成.....	7
第2章	定点停止制御	9
2.1	構成要素技術.....	9
2.2	自己位置推定技術.....	13
2.3	自動調整技術.....	15
2.4	まとめ.....	15
第3章	画像処理による自己位置推定技術	17
3.1	動作原理.....	17
3.2	計算機シミュレーションによる実現性の検討.....	21
3.2.1	想定位置誤差	22
3.2.2	基礎実験.....	23
3.2.3	シミュレーション条件.....	27
3.2.4	シミュレーション結果.....	32
3.3	1/10 試験線による停止位置精度の評価	33
3.3.1	1/10 試験線の構成	33
3.3.2	1/10 試験線車両および試験構成	34
3.3.3	試験手順.....	35
3.3.4	試験結果.....	39
3.4	まとめ.....	41
第4章	車両特性を考慮した自動調整技術	43
4.1	自動調整技術.....	43
4.1.1	動作原理.....	43
4.1.2	停止位置精度と計算負荷評価.....	47
4.2	近似関数を用いた計算負荷低減.....	49
4.2.1	計算負荷低減方法.....	49

4.2.2	近似関数法の評価.....	52
4.3	まとめ.....	54
第5章	結論	55
5.1	研究成果の概要.....	55
5.2	残された課題と今後の展望.....	56
	謝辞	57
	参考文献	59
	著者論文	65

目次

図 1	鉄道システムの消費エネルギーの内訳	1
図 2	電動機高効率点制御の動作概念図	3
図 3	電動機の動作点変化	4
図 4	運転士ごとのエネルギーばらつきを表す概念図	5
図 5	本論文における各章の位置づけ	8
図 6	定点停止制御の構成要素	11
図 7	定点停止制御の概念図	12
図 8	提案手法による定点停止制御の構成要素	19
図 9	提案手法による定点停止制御の概念図	20
図 10	自己位置推定処理フロー	21
図 11	停止位置目標認識処理の流れ	24
図 12	オドメーター+マーカー方式の位置誤差モデル	29
図 13	停止位置目標が一つの場合の位置誤差モデル	29
図 14	停止位置目標が二つの場合の位置誤差モデル	30
図 15	シミュレーション構成	31
図 16	1/10 スケール試験線概観	33
図 17	1/10 試験線システム構成	34
図 18	1/10 試験車両	35
図 19	停止位置目標色の決定試験	37
図 20	目標停止位置からの相対距離と	38
図 21	停止目標の検出結果例	38
図 22	定点停止制御結果の例	40
図 23	停止位置精度結果	40
図 24	設計減速度と発生減速度のズレを示す概念図	44
図 25	自動調整技術のシステム構成	46
図 26	評価関数の応答曲面例	47
図 27	停止位置精度	48
図 28	車両特性分布比較	53

表目次

表 1	自己位置推定技術の特徴.....	14
表 2	基礎実験における重心位置測定結果.....	26
表 3	画像処理のばらつきに起因する位置誤差.....	27
表 4	提案手法の停止位置誤差[m].....	32

第1章 序論

1.1 鉄道システムにおける省エネへの取り組み

環境問題への取り組みに社会全体の関心が高まりつつある中，国内外の鉄道事業者において，省エネへの取組みが活発化している．駅の空調やエレベータも含めた鉄道システム全体の消費エネルギーの内訳を図 1に示す．鉄道システムで消費されるエネルギーの内，列車を駆動させるために消費される駆動エネルギーや列車の空調で消費されるエネルギーといった列車で消費されるエネル

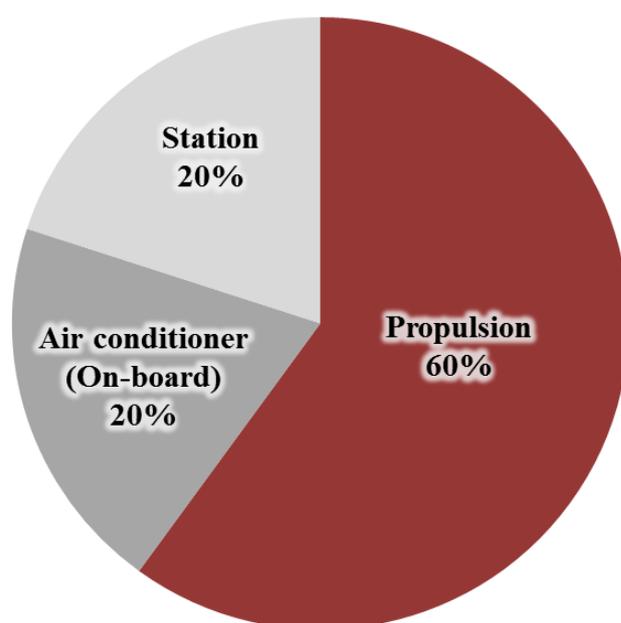


図 1 鉄道システムの消費エネルギーの内訳

Fig. 1 Breakdown of energy consumption by railway system.

ギーが約80%を占める[1]。列車で消費されるエネルギーのうち大部分を駆動エネルギーが占めており、鉄道システム全体の消費エネルギーの内、60%を占める。そのため鉄道システムの更なる省エネのためには駆動エネルギーの低減が重要となる。

駆動エネルギーの低減に関して主に二つの取り組みが行われている。一つは電動機やインバータ制御装置といった駆動に関わる装置のエネルギー効率向上であり、二つ目はシステム全体での省エネの取り組みである。装置のエネルギー効率向上に関しては小型軽量化や損失低減のための設計最適化などさまざまな研究・開発が行われてきており、大きな成果を挙げている。

近年は装置のエネルギー効率向上に加えシステム全体での省エネの取り組みが注目されている。システム全体での省エネとは、複数の装置を最適に制御したり、列車の走り方（走行パターン）を工夫したりして列車運行のエネルギーを削減する取り組みである。例えば、(1)電動機高効率点制御、(2)走行パターン省エネ最適化などがある。この2つの取り組みについて簡単に説明する。

●電動機高効率点制御

鉄道車両の制御状態には大きくわけて力行、定速、惰行、ブレーキがある。力行とは自動車の加速に相当する。定速とは自動車と言うクルーズコントロールであり一定の速度を維持して走行する状態である。惰行は自動車と言うコーストであり、加速力は発生させておらず走行抵抗によって列車速度が低下している状態である。ブレーキは自動車のブレーキと同じ状態である。一般的に電動機の効率は最大の加速状態にあるときに最高効率となるように設計される。言い換えれば、電動機が出しうる最大の力を発生させていない状態では電動機として効率が悪い状態である。鉄道車両の制御状態として多いのは定速や惰行であり、快速運転や特急運転といった駅間の距離が長い場合、ほとんどの制御状態が定速となる。定速では走行抵抗に打ち勝つだけの加速力を出しているだけであり、力行に比べて出力している力が小さく電動機の効率が低い。そのため快速運転や特急運転では走行中の多くの時間で電動機を効率の低い動作点で動作させていた。この課題に対し、定速中の電動機効率を改善し省エネを実現するために電動機高効率点制御が提案されている[2][3]。電動機高効率点制御と

は、列車内の複数の電動機のうち走行抵抗に打ち勝つのに必要な最低限の電動機数をリアルタイムに算出し、算出された電動機数のみを稼働させる制御である(図 2)。本制御により定速中の一電動機あたりの出力が大きくなり、電動機を効率が高い領域で動作させることが可能となり(図 3)、車両運行エネルギー低減が実現される。

Conventional method



Proposed method controls motor at high-efficiency operating point

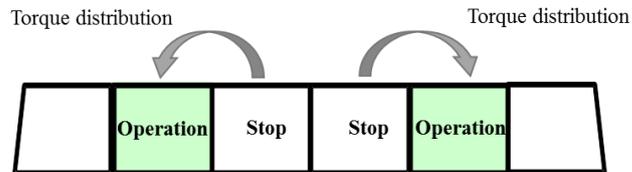


図 2 電動機高効率点制御の動作概念図

Fig. 2 Conceptual diagram of motor control at high-efficiency operating point.

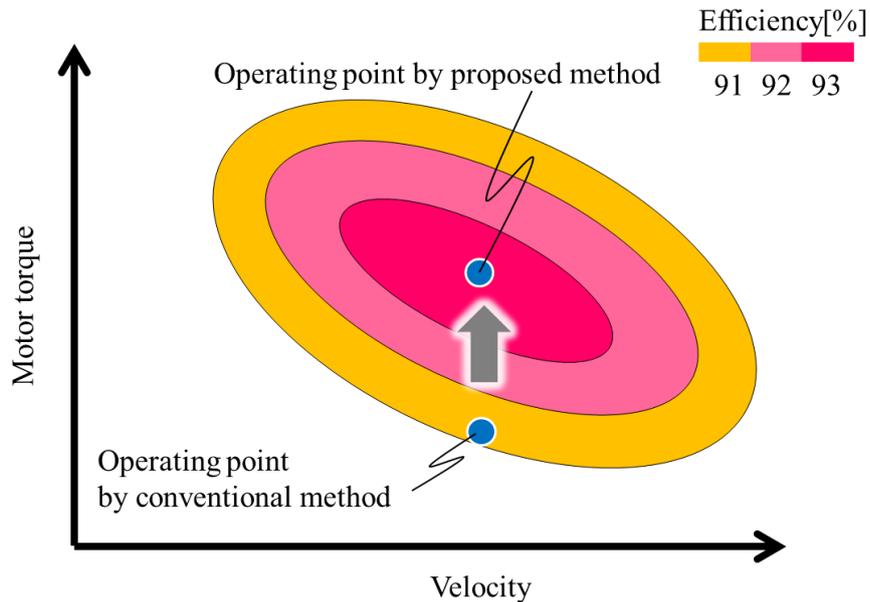


図 3 電動機の動作点変化

Fig. 3 Motor operating point comparison between conventional method and proposed method.

● 走行パターンの省エネ最適化

鉄道も自動車と同じく運転士ごとに運転の仕方が異なり、図 4に示すように同一駅間を同一走行時間で走行したときでも車両運行のエネルギーが大きく異なることが分かっている。この運転士ごとのエネルギーのばらつきは井関らによると±20%程度[4]あると報告されており、横田らのデータでも[5]20%存在することが確認できる。このばらつきは路線や駅間によって変化しうるが、すべての運転士が省エネな走行パターンで走行するだけでエネルギーを20%程度削減できることを示唆している。そこで省エネとなる走行パターンを算出し、その省エネ走行パターン通りに走行することで省エネ化を図る取り組みが走行パターンの省エネ最適化である。省エネな走行パターンは時々の条件（列車質量や加速性能、走行抵抗、勾配）によって異なるため、それらの条件を制約条件

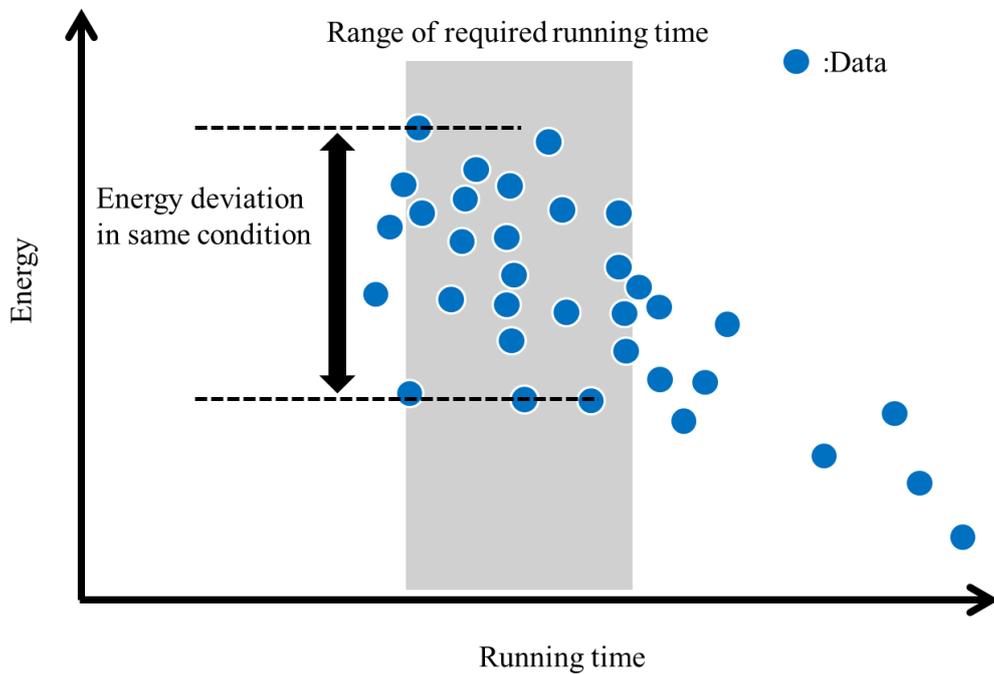


図 4 運転士ごとのエネルギーばらつきを表す概念図
 Fig. 4 Conceptual diagram of energy consumption variation
 caused by operation difference.

として数理最適化技術を用いて省エネ走行パターンを算出する研究が多くなされている[6][7][8][9][10]。これらの研究成果を活用すると省エネな走行パターンを得ることが出来る。

前述のように走行パターンの最適化による省エネ効果は非常に大きいことが知られているが人間が常に省エネな走行パターン通りに列車を正確に制御することは難しい。そのため走行パターンの省エネ最適化にはあらかじめ規定された省エネ走行パターンに列車を正確に追従させる自動運転技術が重要となる。

1.2 鉄道システムにおける自動運転技術の現状と問題点

あらかじめ規定された走行パターンに列車が追従するように列車を加速させたり減速させたりする自動運転技術は1981年のポートライナーをはじめとしてゆりかもめやつくばエクスプレスといった路線に導入されている。自動運転技術の一部に列車のドアとホームにおける乗客の待ち位置を正確に合わせるように列車を制御する定点停止制御と呼ばれるものがある。この定点停止制御は導入時のコストが高いことが知られており、その導入コストの高さが省エネのために自動運転技術を活用する際の課題となる。定点停止制御の導入コストが高くなる要因として、(1)高精度自己位置推定のための装置が高価、(2)システム導入時に実使用環境下における専門作業員による調整作業が必要で人件費がかかる、が挙げられる。

現在実用化されている定点停止制御は経路上に専用のマーカーを設置し、マーカー上を列車が通過するときマーカーからマーカーの位置情報を受信することで自己位置を補正し高精度な自己位置推定を実現している。しかしながらマーカーを用いた自己位置推定はマーカーそのものが高価であることや線路上へのマーカー設置に起因する高い土木工事費用や維持管理費用によって導入コストが高くなる。

また、定点停止制御は列車を規定の停止位置に高精度に停止させる必要がある。減速度といった車両特性は列車ごとに異なることから、すべての列車で要求される停止位置精度を満たすように定点停止制御のパラメータを調整する必要がある。この調整は専門作業員が試行錯誤を繰り返して行うため、調整日数がかかる傾向にあり、高い導入コストの一因となっている。

このように自動運転技術は多くの実用例があり、技術が確立されているが、導入コストが高いという課題を抱えている。

1.3 研究の目的

前述のように鉄道システムの更なる省エネのためには列車を省エネな走行パターンに従って走行させることが有用である。自動運転技術を用いた列車の省

エネ走行をより多くの列車や路線に導入するためには、定点停止制御を安価に実現することが重要である。そこで本研究では、従来と比較して安価に定点停止制御を実現することで自動運転技術の普及を図り、自動運転技術により列車を省エネな走行パターンで走行させることにより鉄道システムの省エネルギー化を図ることを目的とする。

1.4 本論文の構成

本論文における各章の位置づけを図 5に示す。第2章では鉄道システムの自動運転技術で鍵となる定点停止制御に関して、その構成要素技術について述べる。

定点停止制御技術の(1)高精度自己位置推定のための装置が高価、(2)システム導入時に実使用環境下における専門作業員による調整作業が必要で人件費がかかる、という二つの課題に対して(1)の課題を解決するための研究を第3章で、(2)の課題を解決するための研究を第4章で述べる。

第3章では従来手法である高価なマーカーを用いた自己位置推定に代えて低コストで自己位置推定が可能な技術の実現を目指した研究を行う。まず、既存の自己位置推定技術と課題を述べた後、画像処理を用いて自己位置を推定する新たな手法を提案し、提案手法について計算機シミュレータを用いた実現性について検討する。また、1/10スケールの試験車両を用いて提案手法による定点停止制御の停止位置精度を評価する。

第4章では、もう一つの課題であるシステム導入時の調整作業コストを低減するための研究を行う。まず、調整作業の大部分を占める車両特性の把握について減速度波形から自動調整を行う技術を提案し、提案手法の実機試験結果や計算負荷の観点から有用性を評価する。

第5章では本論文を総括して研究の結論と今後の展望について述べる。

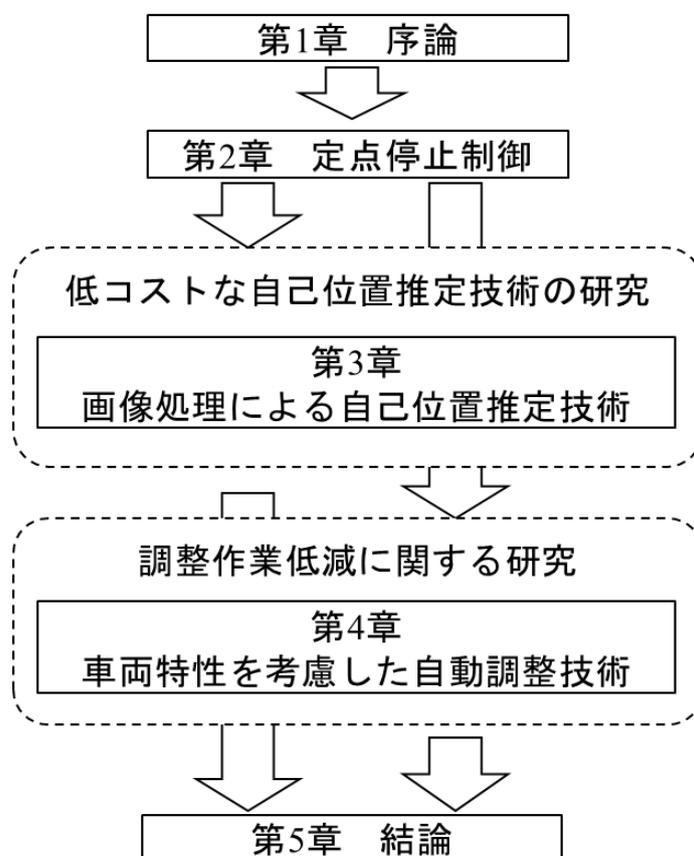


図 5 本論文における各章の位置づけ

Fig. 5 Architecture of this paper.

第2章 定点停止制御

本章では本論文で対象とする定点停止制御について、技術概要について述べたあと定点停止制御の重要な技術である自己位置推定技術と自動調整技術の課題を説明する。

2.1 構成要素技術

自動運転技術はあらかじめ規定された走行パターンに追従するように列車を加速させたり減速させたりする。自動運転技術の一部に列車のドアと乗客の待ち位置を正確に合わせるように列車を制御する定点停止制御がある。現在一般的なマーカーを用いて推定した自己位置に基づく定点停止制御について説明する。定点停止制御では、目標速度に沿って列車が減速するように速度調整し、列車を所定の位置に停止させる。上記の動作を実現するためのシステム構成を図6に示す。定点停止制御は位置推定部、目標速度算出部、追従制御部、ブレーキ制御部の四つの機能ブロックから構成され、以下の手順で自動的に列車を予め決められた目標停止位置に停止させる。

(1)位置推定部：

位置推定部は速度センサからの列車速度とマーカーからの位置情報に基づいて列車の自己位置を推定する。車軸の端に取り付けられ車軸の回転数を計測する速度発電機から車軸回転数を取得し、車軸回転数と車輪円周長との積から算出される列車速度を積分することで自己位置を推定する。列車速度の積分による自己位置推定は積分誤差や計算に使用した車輪円周長と実際の車輪円周長の差に起因する誤差などが生じる。そこで定期的に地上のマーカー

一からの位置情報をもとに誤差を補正する。マーカーには列車の安全を担保する保安装置向けにおよそ1000 m間隔で設置されているものと、定点停止制御向けに目標停止位置の付近に3, 4箇所設置されている2種類が存在する。本論文では定点停止制御向けのマーカーについて議論する。

(2)目標速度算出部：

目標停止位置に停止するために追従すべき速度パターンを目標速度パターンとして予め保持しておく。位置推定部が推定した自己位置に対応する目標速度パターンの速度を目標速度とする。

(3)追従制御部：

現在の列車速度と、現在の自己位置における目標速度とを比較し、偏差が小さくなるように制御量(ブレーキ指令)を比例制御もしくはPID制御で決定する。

(4)ブレーキ制御部：

追従制御部からの制御量に基づいてブレーキ装置を制御する。ブレーキ制御部は乗客の多寡によらず同一の制御量に対して同一の減速度を発生させるようにブレーキ制御を補正する機能を有している。

次に定点停止制御の概念図を図 7に示す。前述の通りこの方式は列車に設置された受信機が地上に設置されたマーカー上を通過した際に地上のマーカーから位置情報を受信し自己位置を更新する。マーカーは経路上に間欠的に設置されており、マーカーとマーカーの間の自己位置は列車速度の積分で推定する。定点停止制御向けのマーカーは一般的に目標停止位置(駅における列車先頭位置)から400 m手前付近に一つ目のマーカーが設定され、100~200 m手前付近、10~20 m手前の合計3個設置される場合が多い[11][12][13]。マーカー上を通過すると自己位置が補正され、列車が追従すべき目標速度が補正される。

追従制御部では比例制御もしくはPID制御を用いて列車を目標速度に追従させる。目標速度に列車をスムーズに追従させるためには車両特性(減速度特性や無駄時間)を考慮して比例制御もしくはPID制御の制御パラメータを設定することが重要となる。しかしながら列車ごとに車両特性が異なることからすべての列車に適用できる制御パラメータを決定することは難しい。現在は専門作業

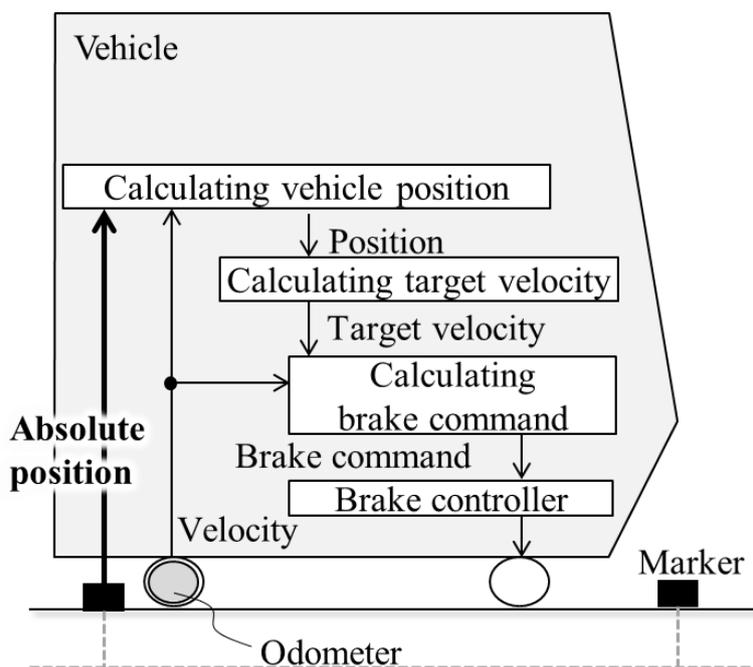


図 6 定点停止制御の構成要素

Fig. 6 System configuration of conventional stopping control.

員が経験から制御パラメータを決定しており，時間がかかる上に属人的になるという課題がある．これらの課題を解決するために列車がスムーズに目標速度パターンに追従できる制御のパラメータの調整を自動で行う技術が自動調整技術と呼ばれる．

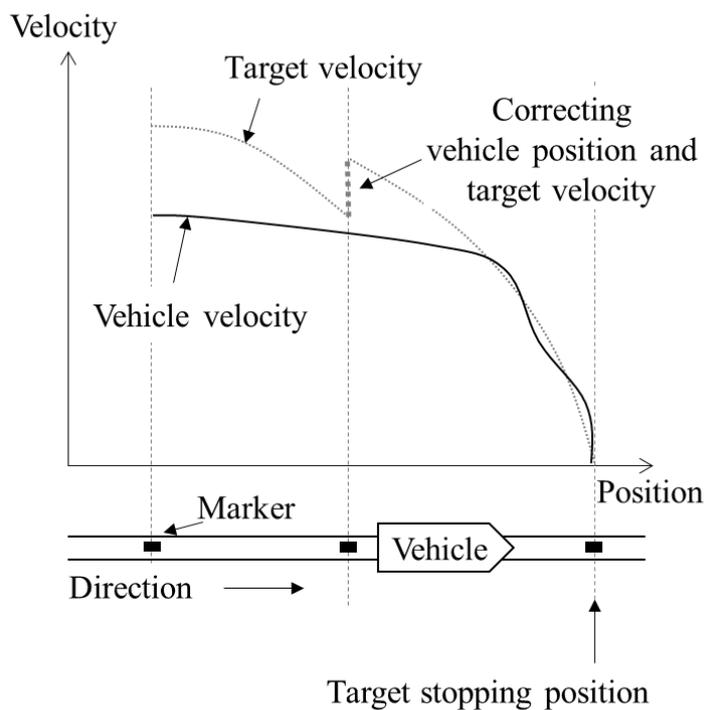


図 7 定点停止制御の概念図

Fig. 7 Conceptual diagram of conventional stopping control.

2.2 自己位置推定技術

はじめに定点停止制御の自己位置推定について要求される精度を説明する。一般的に定点停止制御に要求される停止位置精度は1 mである。停止位置精度は自己位置推定精度と追従制御部で用いられるPID制御の影響を受けるが、さまざまな車両条件においてPID制御による定点停止制御を行った場合の停止位置誤差をシミュレーションで評価した結果[14]や、実際の列車を用いた定点停止制御の停止位置誤差結果[15]から追従制御に起因する位置誤差はおよそ0.2mである。そこで停止位置精度1 mのうち0.2 mを追従制御部で発生しうる誤差と考え、自己位置推定に要求する位置精度は0.8 mとする。

次に既存の様々な自己位置推定技術の特徴を表 1に示す。まずはじめにGNSS(Global Navigation Satellite System)を用いた方法を説明する。鉄道システム向けにGNSSを用いて自己位置を推定する研究は多くなされている[16][17][18][19][20]。GNSSを用いた自己位置推定はマルチパスによる位置精度低下や地下区間などGNSSが使用できない条件があるといった課題が存在する。(表 1 No.1)。

次にLIDAR (Light Detection and Ranging)を用いた技術について述べる(表 1 No.2)。自動車の自動運転やロボット向けの自己位置決定において多数の研究成果が報告されている[21][22][23][24]。また、鉄道システムの自己位置推定に使用される例も見られる[25][26]。LIDARの自己位置推定精度は0.01~0.1 mと定点停止制御に適用可能な精度を有しているが、現時点でLIDARは非常に高価でありそのコストの高さが課題である。

次に速度積分により自己位置を推定する手法について説明する。この手法には速度をミリ波で推定するもの、画像処理で推定するものなどがある。

速度をミリ波で推定する方法(表 1 No.3)は車輪の回転数を使用しないため空転や滑走の影響や車輪径誤差の影響を受けにくい利点がある。先行研究[27]によると推定速度と真値との誤差の累積誤差は走行箇所や速度によって異なるが最大で走行距離の0.6 %である。定点停止制御に必要な位置推定精度0.8mを満足するためには133mごとに位置補正のためのマーカーを設置する必要があり低コスト化には寄与しない。

画像処理を用いて速度を推定する方法について説明する[28](表 1 No.4)。一定

表 1 自己位置推定技術の特徴

Table 1 Comparison of localization methods.

No.	Type of sensor	Position measurement accuracy[m]	Cumulative error for travel distance [%]	Advantage	Disadvantage
1	GNSS	~50	-	<ul style="list-style-type: none"> • Low cost • Abundant knowledge in automotive field 	<ul style="list-style-type: none"> • Unavailable in tunnel
2	LIDAR	0.01~0.1	-	<ul style="list-style-type: none"> • Very high accuracy • Abundant knowledge in automotive field 	<ul style="list-style-type: none"> • Very expensive
3	Millimeter wave radar	-	0.6	<ul style="list-style-type: none"> • Low cost • Abundant knowledge in automotive field 	<ul style="list-style-type: none"> • Low accuracy for stopping control
4	Camera (speed integration)	-	3.7	<ul style="list-style-type: none"> • Low cost 	<ul style="list-style-type: none"> • Low accuracy for stopping control
5	Odometry + Marker	~0.1	1	<ul style="list-style-type: none"> • High accuracy • High-performance for severe condition 	<ul style="list-style-type: none"> • Very expensive

時間間隔で撮影した画像の同一地点の移動量を画像処理で推定し、移動量と撮影間隔から速度を推定する。この方法では走行距離の3.7%の位置誤差が発生することが報告されている[29]。定点停止制御に必要な位置推定精度0.8mを満足するためには21mごとに位置補正のためのマーカを設置する必要があり低コスト化には寄与しない。

鉄道システムの自己位置推定手法として主流なものとしてオドメーター+マーカー方式(表 1 No. 5)がある。本方式はオドメーターからの列車速度の積分により得られる自己位置をベースとし、定期的にマーカーを使用してオドメーターからの速度と真値との誤差の累積誤差を補正する手法である。マーカー通過時の地点検出精度は0.1 mと非常に高精度であり、夜間や霧、雪といった悪天候でも位置精度が低下せず高い耐環境性を有するという利点がある。しかしながら先述のとおりコストが課題であり、また停止位置精度を向上させるために累積誤差を小さくするためには多くのマーカーを設置する必要がある。

以上のように既存の自己位置推定技術にはセンサーが高価であるか、定点停止制御に使用するためには自己位置推定精度が低く、自己位置を定期的に補正

するために多数のマーカールを経路上に敷設する必要があるといった課題がある。

2.3 自動調整技術

定点停止制御の追従制御は比例制御を用いて目標速度パターンに列車を追従させるための制御量を算出するのが一般的である。多少の車両特性の変動は比例制御で吸収可能であるが、実際の車両特性が想定した車両特性と大きく異なる場合は停止位置精度が悪化する可能性がある。そこで現状は熟練の専門作業者が複数回列車を走行させて車両特性を把握し、制御パラメータを調整している。このように定点停止制御の調整作業は属人的で試行錯誤に基づいた追従制御のパラメータ調整を行っていることや、同型式の列車でも、編成ごとに車両特性が異なり得、車両特性の把握に時間がかかるという課題を抱えている。これらの課題を解決するために自動で車両特性を把握し、制御パラメータを自動で調整する自動調整技術が研究されている[15][30][31][32]。

2.4 まとめ

定点停止制御について既存の自己位置推定技術にはセンサーが高価であるか、定点停止制御に使用するためには自己位置推定精度が低く、自己位置を定期的に補正するためにマーカールを経路上に敷設する必要があるといった課題がある。また、追従制御の制御パラメータの調整に時間がかかるという理由から導入コストが高くなっている。以上から定点停止制御の導入コスト低減のためには低コストで自己位置推定を行う技術や、自動調整技術の確立が必要となる。

第3章

画像処理による自己位置推定技術

本章では定点停止制御向けの低コストな自己位置推定技術として画像処理により算出した地上目標物と列車との相対距離情報と，地上目標物の位置情報から自己位置を推定する方法を提案する．まずはじめに提案手法の動作原理を述べる．その後，計算機シミュレーションで提案手法の信頼性や実現性について基本的な検討を加え，さらに 1/10 スケールの試験車両を用いて検証試験を行う．

3.1 動作原理

定点停止制御向けの低コストな自己位置推定技術として画像処理による地上目標物との相対距離情報を用いた方法を提案する．これは定点停止制御の目標停止位置が固定であることを利用し目標停止位置に設置された停止位置目標と列車の相対距離から自己位置を推定する方法である．停止位置目標と列車の相対距離は単眼カメラ，ステレオカメラを問わず自動車の分野で豊富な研究事例 [33][34][35][36][37][38]がある画像処理による測距技術を用いることとした．なお，提案手法を用いた定点停止制御導入に当たって以下の前提条件を設定した．

- (1)外界環境の影響を受けにくい地下路線を対象とする．
- (2)自己位置推定技術以外の構成は現状の定点停止制御装置と同様とする．
- (3)本手法用の停止位置目標を新たに設置する．
- (4)列車がどの駅間を走行しているのかは既知であり，次の停止位置目標の位置も既知である．
- (5)列車の安全を担保する保安装置向けにおよそ1000 m間隔でマーカーが設置

されている。

(6)各駅にはホーム上の利用者の監視や乗降整理のための係員が常駐し、本手法用の停止位置目標の状態の監視も行う。

画像処理による定点停止制御の構成要素を図 8に示す。提案手法と従来手法(図 6)の違いは位置情報をマーカーから取得するか画像処理による相対距離情報から得るかである。相対距離算出部はカメラから取得した画像から相対距離を算出する。位置推定部は相対距離算出部から取得した相対距離と停止位置目標の位置情報と組み合わせて自己位置を推定する。図 9は提案手法の概念図である。停止位置目標が認識されるまでは列車速度の積分から推定された自己位置に基づき目標速度を算出する。列車速度の積分から自己位置を推定する方法は従来手法と同様である。停止位置目標を認識した後は相対距離に基づいた自己位置から目標速度を算出し、目標速度に沿うように列車を制御する。

次に画像処理による自己位置推定処理フローを図 10に示す。はじめに列車が走行している駅間を特定する(図 10 (a))。駅間の情報は保安装置や車両情報制御システムから取得する。提案手法では各駅における停止位置目標の絶対位置と設置位置の情報を記録したデータベースを有しており、手順(a)で特定した駅間情報でデータベースを参照することにより次に認識されると予想される停止位置目標の停止位置目標情報(絶対位置)を取得する(図 10 (b))。列車の先頭に設置したカメラを用いて目標停止位置に設置した停止位置目標を探索し(図 10 (c))、目標を検出すると停止位置目標までの相対距離を推定する(図 10 (d))。停止位置目標の絶対位置と停止位置目標と列車の相対距離から自己位置を推定する(図 10 (e))。一般的に鉄道システムでは所定の起点からの距離(キロ程)で自己位置を定義することが多い。キロ程の値が増加する方向に列車が走行している場合は、停止位置目標の絶対位置から相対距離を減算することで自己位置を推定する。一方、キロ程の値が減少する方向に列車が走行している場合は、停止位置目標の絶対位置から相対距離を加算することで自己位置を推定する。画像処理による自己位置推定が実施されるまでは従来手法と同様に列車の位置を車輪の回転速度と、車輪円周の長さとの積で推定する(図 10 (f))。

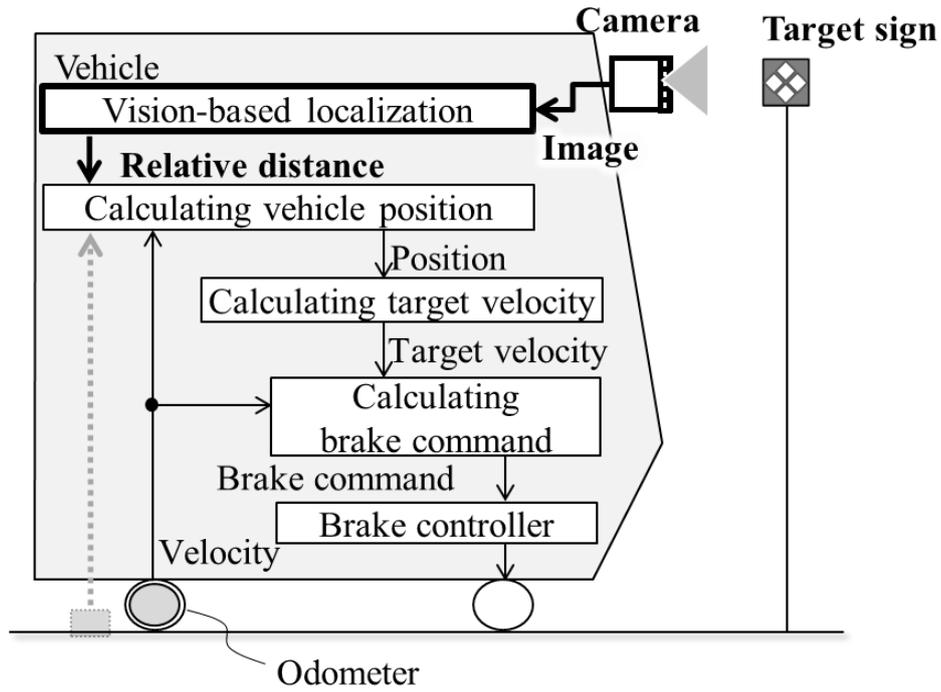


図 8 提案手法による定点停止制御の構成要素

Fig. 8 System configuration of proposed stopping control.

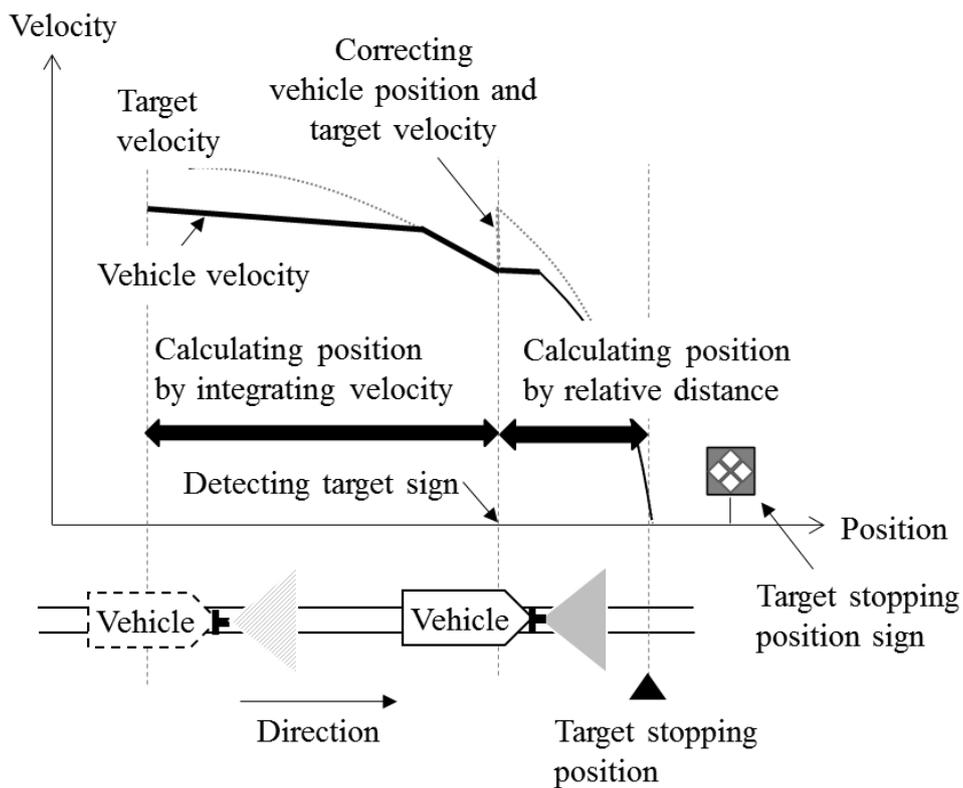


図 9 提案手法による定点停止制御の概念図

Fig. 9 Conceptual diagram of proposed stopping control.

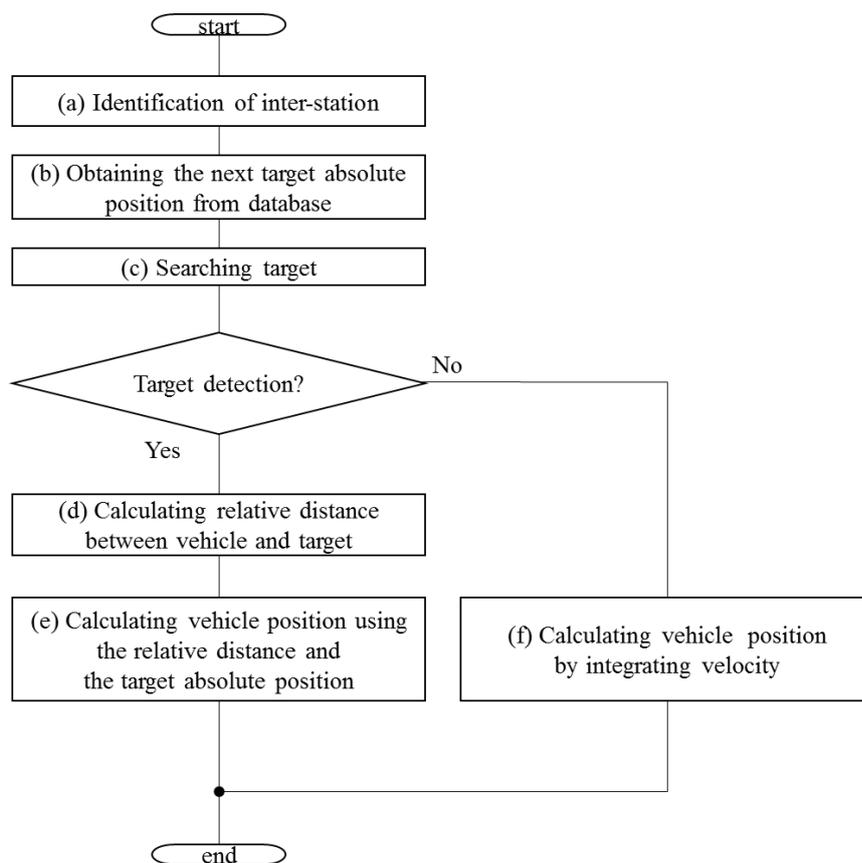


図 10 自己位置推定処理フロー

Fig. 10 Flow chart of self-localization using proposed method.

3.2 計算機シミュレーションによる実現性の検討

本節では提案手法による定点停止制御の実現性を計算機シミュレーションで検討する。従来手法は自己位置の補正位置が固定されており，目標速度の修正位置が不変であるが提案手法では自己位置の補正位置が画像処理結果によって変動し，その結果目標速度の修正位置も変化する。すなわち提案手法では目標速度の修正位置がばらつくことにより追従制御の安定性が損なわれ，停止位置精度が悪化する可能性が考えられる。そこで本節では計算機シミュレーションにより提案手法の実現性を検証する。具体的には提案手法で想定されるさまざまな位置誤差条件を設定し，その位置誤差条件下において提案手法による定点停止制御が要求停止位置精度 $\pm 1\text{m}$ を満足するかについて評価を行う。

3.2.1 想定位置誤差

本シミュレーションでは以下の位置誤差を検討する.

- (1)累積誤差
- (2)フレームレートに起因する誤差
- (3)画像処理に起因する誤差

(1)の累積誤差はオドメーターからの速度と真値との誤差が積分されることによって発生する誤差である. 鉄道システムの保安装置向けの規格[39]によると自己位置精度は±10 m以内に収めることが要求されており, この要求を満たすために実在の鉄道システムでは1000 m間隔でマーカーが設置されることが多い. すなわち累積誤差としては走行距離の±1%が想定されているとし, 本論文では累積誤差は走行距離の±1%とする.

次に, フレームレートに起因する誤差について説明する. 画像処理では推定に使用した画像がフレームレート間に列車が走行した距離のうち, どの位置で撮像されたものかを特定する難しい. これは一般的なカメラのローリングシャッター方式ではカメラの全画素を同時に露光し, 一括で読み出すのではなく, 所定の画素ごとに露光し順次読み出して映像を取得するため, 移動体で撮像を実施した場合, 同じ画像でも画素ごとに撮像された位置が異なるためである. 本論文ではこの位置誤差 E [m]をフレームレート間に列車が走行した距離と定義し, 式(1)で推定する.

$$E = V \times \frac{1}{f} \tag{1}$$

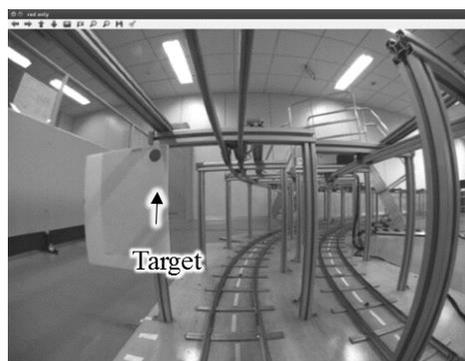
ここで V は列車速度[m/s], f はフレームレート[fps]である. 画像処理による相対距離は撮像を開始した位置での相対距離として扱い, カメラのフレームレートに起因する位置誤差は自己位置が目標停止位置側に進む方向のみを考える.

次に画像処理に起因する誤差について検討する. 画像処理を用いる場合, 外界環境の影響による算出誤差を考慮する必要がある. そこで本提案で対象としている地下空間かつ蛍光灯照明環境下という条件に近い条件で画像処理による相対距離算出実験を行い, 画像処理による相対距離誤差がどの程度発生しうるかを次の基礎実験で確認する.

3.2.2 基礎実験

基礎実験の条件について説明する。基礎実験は実際の鉄道環境の1/10スケールとなるように座標系を設定して実施し、停止位置目標の大きさは一般的な日本の鉄道の停止位置目標の大きさである0.18 m×0.18 mを基準としてその1/10スケールの直径0.018 mの円とする。カメラの解像度は1280×960 pixel、ピクセルサイズは3.75 μm、焦点距離は3.4 mm、フレームレートは52 fps、画角は35°、カメラの設置高さは地面より359mmとし、画像処理装置は2.5 GHzのCPUを使用する。

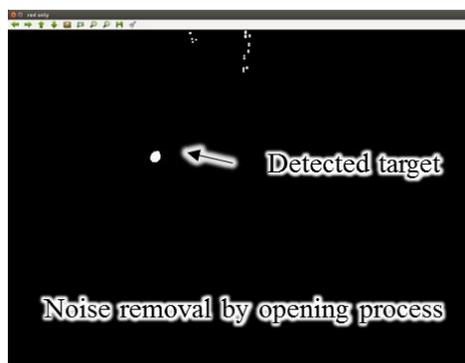
次に停止位置目標の画像処理の流れを図 11に示す。はじめにRGB形式で記録された画像(図 11 (a))をHSV形式(H: Hue, S: Saturation, V: Value)に変換する。停止位置目標の色は停止位置目標付近の背景画像のHSVのヒストグラムを作成し、出現頻度が低いHSV値であるH:180, S:100, V:100とした。HSV形式に変換された画像から停止位置目標の色相(H)に着目して対応するHSVの領域を抽出した二値画像を作成する(図 11 (b))。二値画像作成に使用したHSVの閾値は、H:90~224, S:14~100, V:27~79である。次に任意の注目する画素の周辺に黒い画素があれば黒に置き換える収縮という処理を2回実施し、その後周辺に白い画素があれば白に置き換える膨張という処理を2回実施してノイズを除去するオープニング処理を行い(図 11 (c))、その後ノイズ除去後の二値画像の中で白い画素をクラスタリングし、クラスタリングされた領域のうちもっとも大きな領域の白い画素の集まりを停止位置目標として認識する。停止位置目標を認識したあと、停止位置目標の重心の像素子上の位置を算出する。



(a)



(b)



(c)

図 11 停止位置目標認識処理の流れ

- (a)カメラで取得した画像
- (b)注目領域を抽出した二値画像
- (c)ノイズ除去後の二値画像

Fig. 11 Image processing flow.

- (a) Original image (RGB).
- (b) Binary image extracted by target HSV value.
- (c) Binary image after noise removal process.

停止位置目標と列車の先頭位置までの相対距離を L とし、画像センサ上の停止位置目標の写像の重心位置とレンズ中心線までのピクセル数を dy とする。相対距離 L が250, 300, 350, 400, 450, 500 mmの地点で画像処理による重心位置 dy の算出を時間を置いて4回実施し、重心位置のばらつきを測定する。結果を表 2に示す。 dy_{ave} は各 L における4回の試行結果 $dy1\sim dy4$ の平均値であり、 SD は各 L における4回の試行結果 $dy1\sim dy4$ の 3σ である。相対距離と重心位置関係は本来非線形であるが、ここでは相対距離が微小変化(100 mm)する間では線形近似が成り立つと仮定する。また重心位置のばらつきは正規分布と仮定し、 3σ までをばらつきの範囲とすると、画像処理に伴う重心位置のばらつきによる相対距離誤差 $X_{div}[mm]$ は式(2)で定義できる。

$$X_{divL} = SD_L \cdot \frac{100}{dy_{ave_{L-50}} - dy_{ave_{L+50}}},$$

$$L=300, 350, 400, 450$$

(2)

表 2 基礎実験における重心位置測定結果

Table 2 Measurement result of dy at each L .

		Relative distance L [mm]					
		250	300	350	400	450	500
Examination Results	$dy1$ [pixel]	346	315.0	288.0	266.0	247.5	230.0
	$dy2$ [pixel]	347.5	315.5	288.0	266.5	247.5	230.0
	$dy3$ [pixel]	346.5	315.0	289.0	266.0	247.5	230.0
	$dy4$ [pixel]	347.5	315.0	289.0	266.0	247.5	230.0
Average value ($dy1 - dy4$)	dy_{ave} [pixel]	346.9	315.1	288.5	266.1	247.5	230.0
3σ ($dy1 - dy4$)	SD [pixel]	2.0	0.6	1.5	0.6	0.0	0.0

ここで、各変数の添え字は各変数の相対距離を表し、 $L=300$ のときの $dy_{ave_{L=50}}$ は $L=250$ のときの dy_{ave} 、 $dy_{ave_{L+50}}$ は $L=350$ のときの dy_{ave} を意味する。次に $L=300, 350, 400, 450$ mmの地点における相対距離誤差 X_{div} を算出した結果を表 3 に示す。蛍光灯環境下における基礎実験では画像処理による相対距離誤差は最大3.1 mmであった。基礎実験は1/10スケールを想定しており、実スケールにおける画像処理に起因する誤差はその10倍の31 mm程度と推定される。

基礎実験の結果から照明環境下において画像処理による相対距離算出のばらつきは数十 mmのオーダーであり、メートル単位の誤差が発生する累積誤差やフレームレートに起因する位置誤差と比較して十分小さいことが確認された。そのため、本節のシミュレーションでは画像処理に伴う位置誤差は考慮しないこととする。

表 3 画像処理のばらつきに起因する位置誤差

Table 3 Estimated position error derived from examination result of the 1/10 scaled test track.

Relative distance L [mm]	Estimated position error X_{div} [mm]
300	1.1
350	3.1
400	1.6
450	0.0

3.2.3 シミュレーション条件

提案手法による自己位置を用いた定点停止制御の実現性検証を 1/1 スケールを対象としたシミュレーションで実施する. シミュレーションで考慮する位置誤差は基礎実験の結果より(1)累積誤差, (2) フレームレートに起因する誤差とした. シミュレーションは従来方式(オドメーター+マーカー方式), 提案手法(停止位置目標 1 個), 提案手法(停止位置目標 2 個)について実施し, 定点停止制御の停止位置精度を評価する.

シミュレーション条件を以下に示す.

(1)従来手法

位置補正方法: マーカー

位置補正地点: 停止目標の手前 10, 100, 400m

位置誤差: 累積誤差(走行距離の $\pm 1\%$),

マーカーによる位置補正時の位置誤差なし

(2)提案手法(停止位置目標 1 個)

位置補正方法: 画像処理

停止位置目標設置位置: 目標停止位置のみ

停止位置目標検知距離: 20, 40, 60, 80, 100m

位置誤差: 停止位置目標を認識するまでは累積誤差(走行距離の $\pm 1\%$),

停止位置目標認識後はフレームレートに起因する誤差

(3)提案手法(停止位置目標 2 個)

位置補正方法：画像処理

停止位置目標設置位置：目標停止位置と目標停止位置手前 100m

停止位置目標検知距離：20, 40, 60, 80, 100m

位置誤差：停止位置目標を認識するまでは累積誤差(走行距離の±1%),
停止位置目標認識後はフレームレートに起因する誤差

図 12 に従来手法, 図 13 に提案手法(停止位置目標 1 個), 図 14 に提案手法(停止位置目標 2 個)の誤差モデルを示す. 自動車の自動運転に用いられている画像処理技術の対象物検知距離は最長 100 m 程度[40]であるため, 提案手法の停止位置目標検知距離は最長 100m とする. また, 画像処理による停止位置目標検知距離は外界条件により変動することが想定されるため, 検知距離を 20, 40, 60, 80, 100m の 5 通り設定する. シミュレーションは従来手法については累積誤差条件の 2 通り, 提案手法については累積誤差条件 2 通り×停止位置目標検知距離 5 通りの 10 通りについて停止位置目標 1 個の場合と 2 個の場合について各 1 回ずつ, 計 22 回行う.

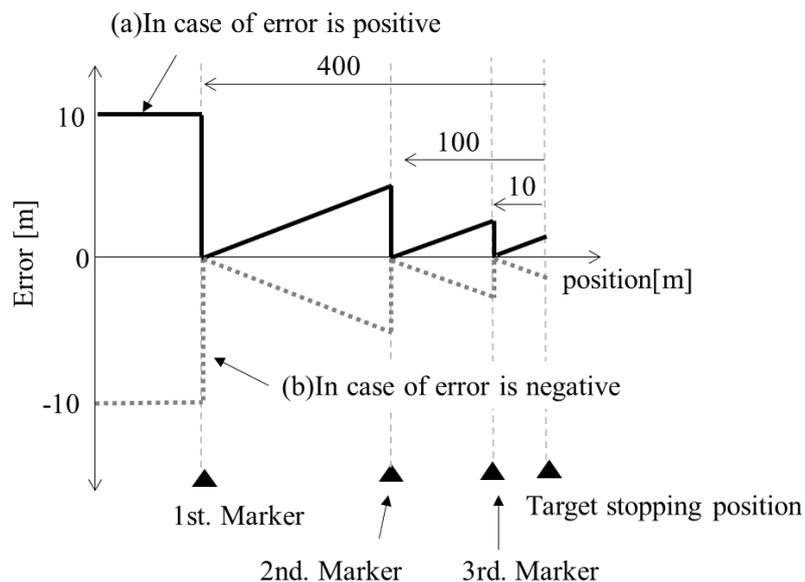


図 12 オドメーター+マーカー方式の位置誤差モデル

Fig. 12 Position error model in conventional localization (Odometry + Marker).

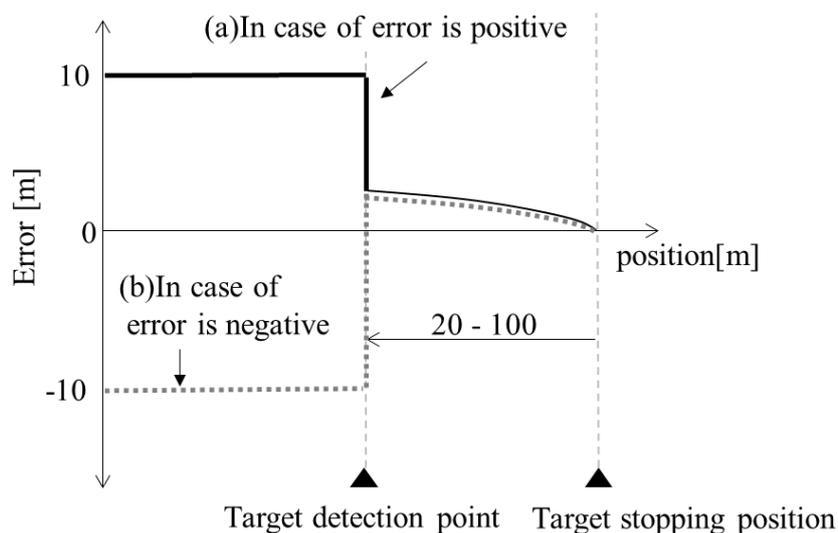


図 13 停止位置目標が一つの場合の位置誤差モデル

Fig. 13 Position error model in proposed method in case of target is located at target stopping position.

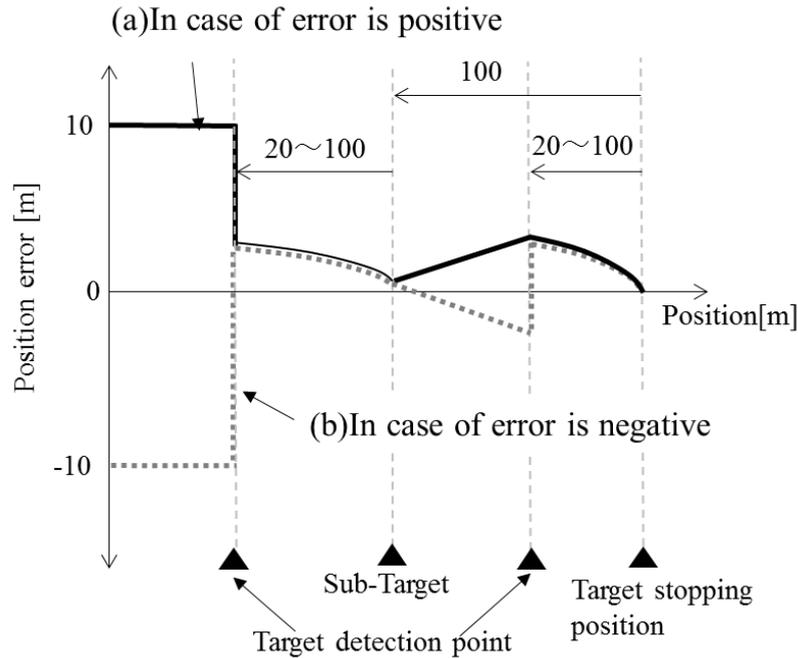


図 14 停止位置目標が二つの場合の位置誤差モデル

Fig. 14 Position error model in proposed method in case of target is located at both target stopping position and sub-target position.

次にシミュレーション構成を図 15 に示す。走行する列車には加速を妨げようとする力が発生する。直線平坦路を一定速度で走行するとき生じる抵抗を走行抵抗 $R[N]$ と呼び、JIS[41]では式(3)で定義される。

$$\begin{aligned}
 R = & (1.650 + 0.025 \times (V \times 3.6)) \times M_m \\
 & + (0.780 + 0.003 \times (V \times 3.6)) \times M_t \\
 & + 9.810 \times (0.028 + 0.008 \times (n - 1)) \times (V \times 3.6)^2
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

ここで V は列車速度[m/s], M_m は編成のうち駆動装置が実装された車両の質量による荷重[kN], M_t は編成のうち駆動装置が実装されていない付随車両の質量による荷重[kN], n は編成両数である。今回のシミュレーションでは $M_m=1177.2[kN]$, $M_t=784.8[kN]$, $n=10$ とする。列車速度の 0・1 次項は機械的な

抵抗に起因する抵抗を，2次項は空気抵抗に起因する抵抗を表現している．列車モデルの無駄時間 D は1秒とする．3.2.3で定義した位置誤差条件に基づいて，自己位置に位置誤差追加し比例制御部へ自己位置として渡す．定点停止制御は自己位置から求まる目標速度に追従するように列車を制御する．追従制御は比例制御で行い，最大減速度は 0.93 m/s^2 ，最大ジャークは 4.65 m/s^3 とした．比例制御のパラメータは位置誤差がない条件で複数回定点停止制御を試行し最適化した値を使用する．比例制御に関して車両特性のばらつきに起因する停止位置精度の悪化が考えられるが，実際に発生した減速度に基づいて列車ごとの特性を学習できる自動調整技術に関する研究が多く報告されており[42][43][44]，これらの技術を活用することで車両特性のばらつきに起因する精度悪化は相殺できると考える．そのため，今回のシミュレーションの車両モデルは車両特性のばらつきは考慮せず無駄時間のみとし，位置誤差が停止位置精度に与える影響を検証する．

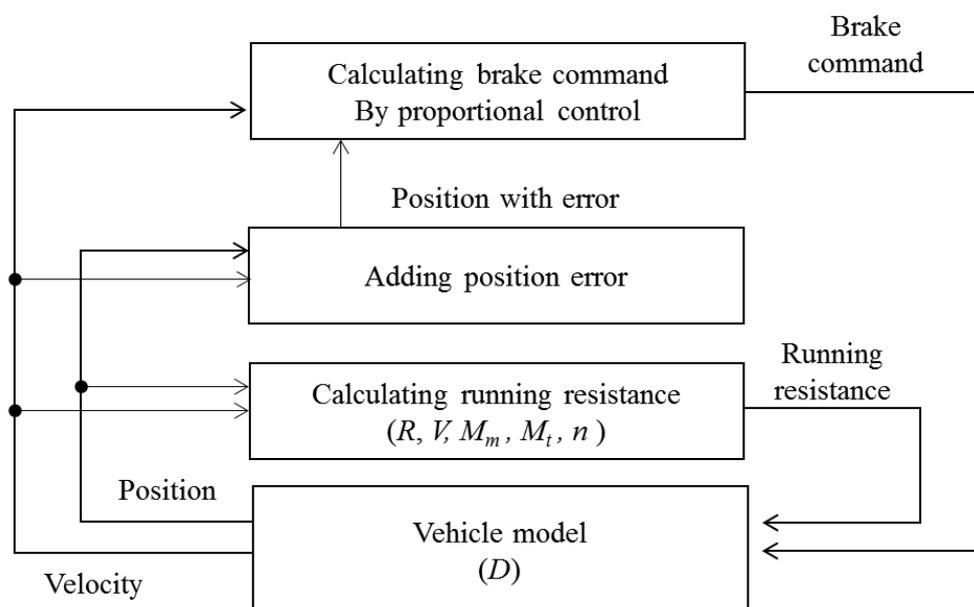


図 15 シミュレーション構成

Fig. 15 Simulation configuration.

3.2.4 シミュレーション結果

シミュレーションの結果，従来方式による定点停止制御の停止位置誤差は累積誤差が正の場合が0.25 m，累積誤差が負の場合は0.04 mであった．次に提案手法の定点停止制御の結果を表 4に示す．停止位置目標1個の条件では累積誤差が負かつカメラの検知距離が40 m以下の場合に停止位置誤差が3.41, 6.11 mとなり停止位置精度1mを満たせなかった．一方，停止位置目標2個の場合の停止位置誤差は累積誤差の正負や停止位置目標の検知距離に関わらず停止位置精度1 mを満たしていた．

以上の結果から提案手法を用いて定点停止制御を行う場合，停止位置目標を2個設置すればカメラの検知距離によらず停止位置精度を満たすことが分かった．停止位置目標2個の場合の停止位置誤差は0.14~0.21mであり，従来手法の停止位置誤差0.04~0.25mと同等の精度が得られた[45]．

表 4 提案手法の停止位置誤差[m]

Table 4 Stopping position error result of proposed method.

		Detection range[m]				
		20	40	60	80	100
One target	Error is positive	0.05	0.21	0.19	0.18	0.17
	Error is negative	6.11	3.41	0.02	0.18	0.16
Two targets	Error is positive	0.19	0.18	0.18	0.14	0.17
	Error is negative	0.21	0.19	0.17	0.18	0.18

3.3 1/10 試験線による停止位置精度の評価

本節では実機に近い環境として 1/10 スケールの試験線を用いて提案手法による定点停止制御を行い、停止位置精度の評価を行う。

3.3.1 1/10 試験線の構成

実機に近い環境として1/10試験線を用いた評価を行う。試験線の概観を図 16 に、1/10試験線のシステム構成を図 17に示す。試験線は12m×10mの敷地に外周33m,内周30m, 軌間127mmの環状線を有し、同時に最大6両の列車が運行可能である。試験線は地上に設置された制御システム, 列車, 変電システムで構成されている。変電システムは安定化電源と電子負荷で構成されており, 直流24Vのトロリ線を介して列車に電力を供給し, 自動運転システムプログラムのトルク指令に従って列車が制御される。各列車は軌道に敷設されたRFIDを列車のリーダーで読み込むことで自己位置を認識している。

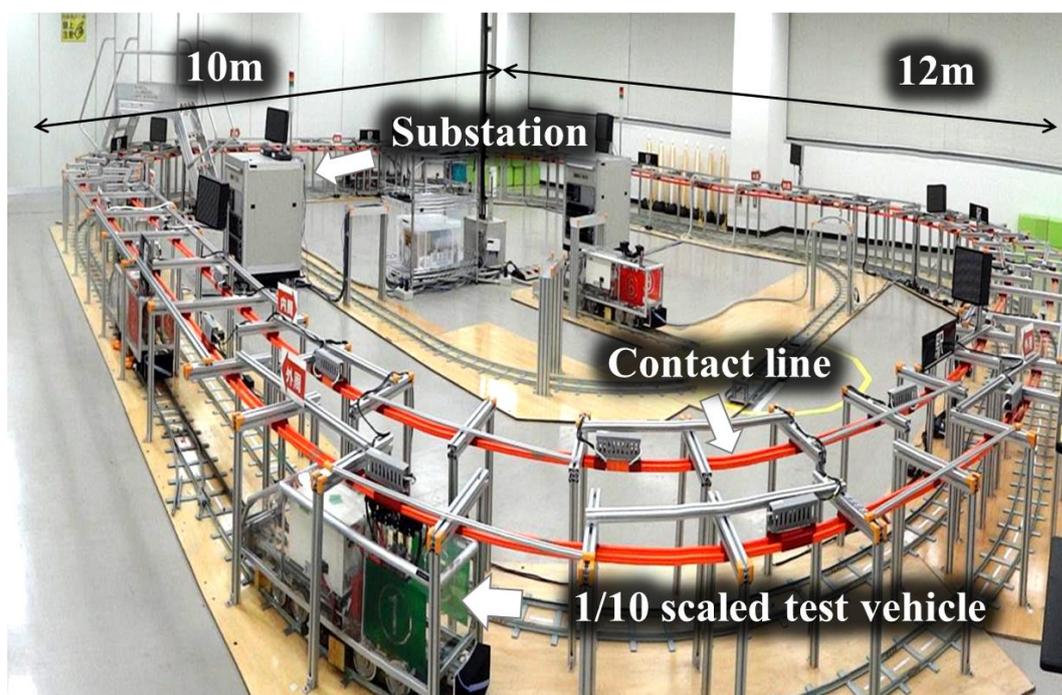


図 16 1/10 スケール試験線概観

Fig. 16 Overview of 1/10-scaled test track.

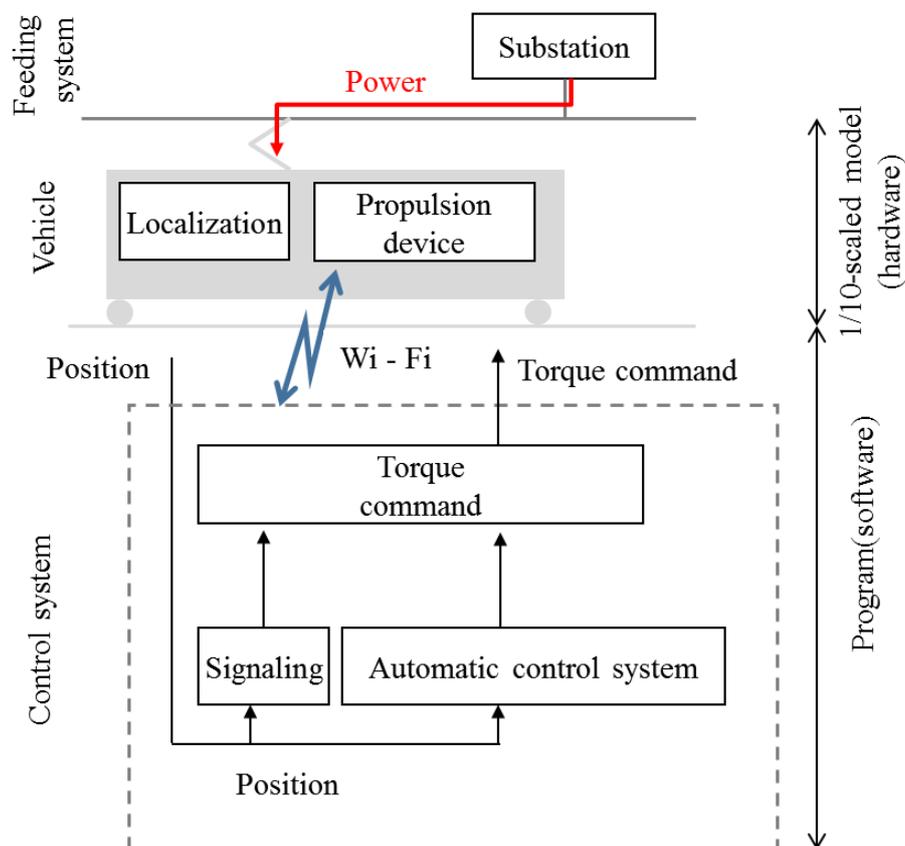


図 17 1/10 試験線システム構成

Fig. 17 System configuration of test track.

3.3.2 1/10 試験線車両および試験構成

図 18に1/10試験車両を示す. 1/10試験車両は全長1.244m, 幅0.27m, レール面からの高さ0.47m, 車両質量83kg, 車輪径0.102m, モータ最大回転数 5950rpm 最高速度11km/hである. 制御システムの自動運転プログラムからトルク指令をWi-Fi経由で受信し, 車両は100ms周期で制御される. レール方向の車両サイズを実際の列車の1/10スケールとし, 速度も1/10スケールとすることで実際の列車と試験線の等価性を確保する. カメラの解像度は1280×960pixel, 画像処理装置は2.5GHzのCPUを使用し, 画像処理装置は車両に搭載する. 停止目標の大きさは一般的な日本の鉄道の停止目標の大きさである0.18m×0.18mを基準としてその1/10の直径0.018mの円とし, 停止位置に車両が停止したときに停止目標がカメラの画

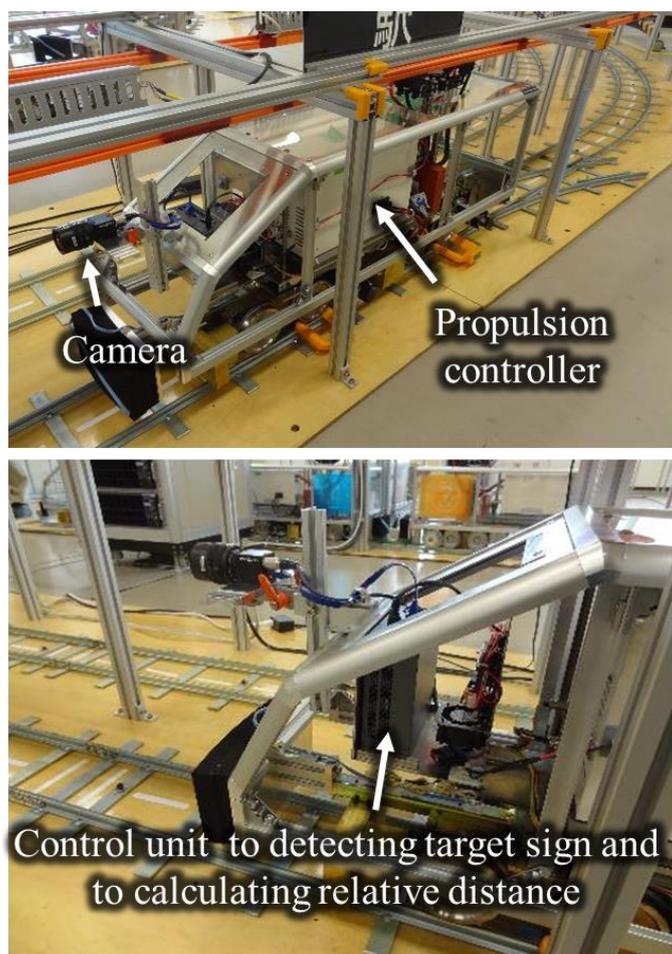


図 18 1/10 試験車両

Fig. 18 1/10 scaled test vehicle.

角内に納まるように停止目標は目標停止位置の0.5m先に設置する。試験は蛍光灯下で行い、試験区間は試験線の直線区間で定点停止制御開始時の列車速度は4km/h、停止位置精度は±1mの1/10の±0.1mとする。

3.3.3 試験手順

画像処理によって推定した自己位置を用いた定点停止制御試験は以下の手順で実施する。

- (1)停止位置目標の色の決定
- (2)定点停止制御のパラメータ調整
- (3)目標停止位置からの相対距離と停止目標の撮像素子上の位置関係の測定

(4)画像処理による自己位置を用いた定点停止制御を10回試行

はじめに停止位置目標の色(H: Hue, S: Saturation, V: Value)を決定する. 決定試験の様子を図 19に示す. 複数種類の色から試験線環境に存在しない色として(H: 180, S: 100, V: 100)を得た. 次に定点停止制御が車両の停止位置のばらつきに影響を与えないように, 定点停止制御の比例制御係数を複数回定点停止制御を試行し, 最適化する. 次に目標停止位置から2800mmまで100mmごとに車両を移動させて各地点で画像を取得する. 取得した画像に画像処理を行い停止目標の撮像素子上の位置(dy)を算出する. 目標停止位置からの相対距離(L)と停止目標の撮像素子上の位置(dy)との関係を停止位置目標の撮像素子上の位置をテーブルとして記録する. 目標停止位置からの相対距離と停止目標の撮像素子上の位置との関係を図 20に, 目標を画像処理で検知している様子を図 21に示す. 撮像素子上の位置と図 20に示す関係から自己位置を推定し, 自己位置に基づいて得られる目標速度に追従するように定点停止制御を実施する. 定点停止制御は10回試行し, 停止位置精度を測定する.

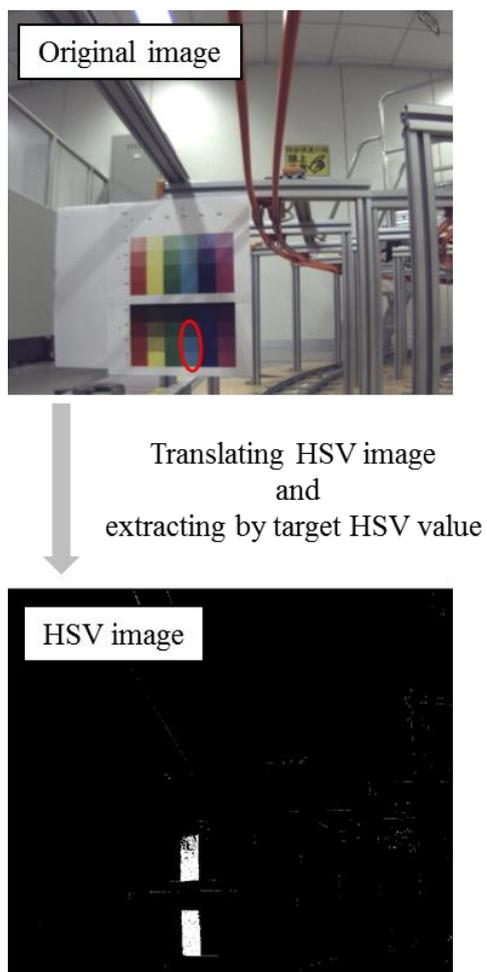


図 19 停止位置目標色の決定試験

Fig. 19 Test of determination of color used for target sign.

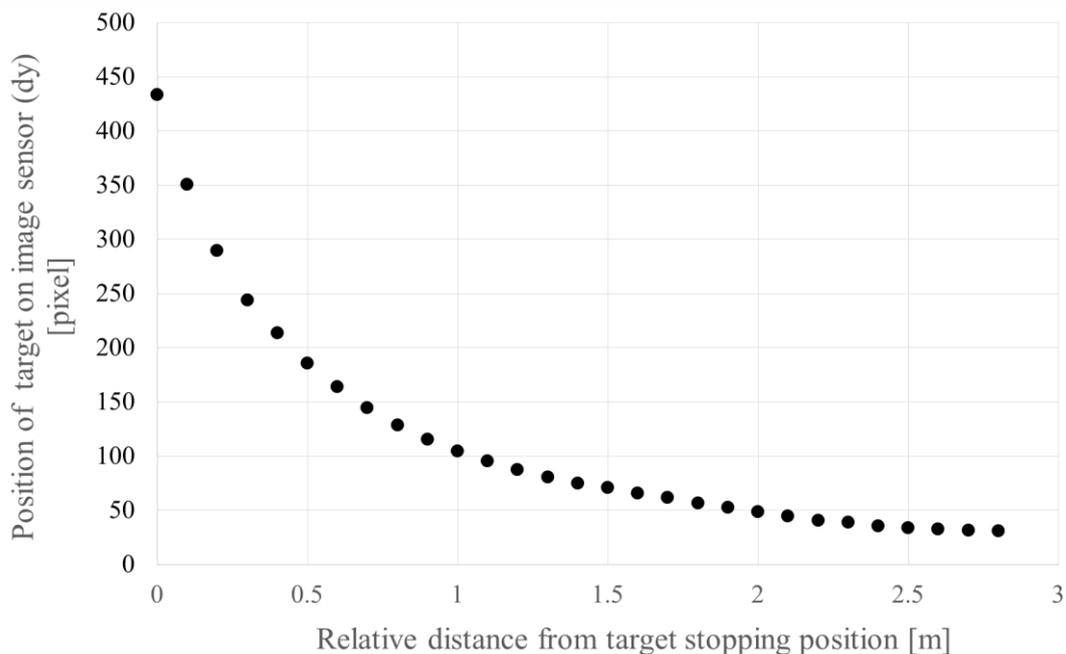


図 20 目標停止位置からの相対距離と停止目標の撮像素子上の位置との関係

Fig. 20 Database of L and dy used for the experiment.

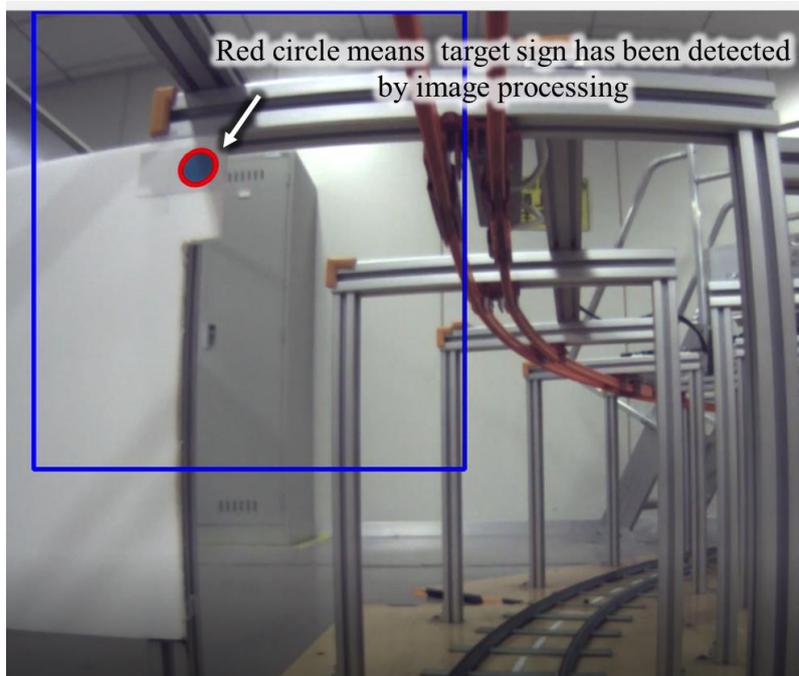


図 21 停止目標の検出結果例

Fig. 21 Example of detection of sign by image recognition.

3.3.4 試験結果

提案手法の定点停止制御結果の一例を図 22に示す。図 22から相対距離が連続的に算出できていること、目標速度の算出と目標速度への追従制御が出来ていることが確認できた。10回の定点停止制御の停止位置精度を図 23に示す。停止位置精度Aは式(4)で算出する。

$$A = X_t - X_s \tag{4}$$

ここで X_t は目標停止位置、 X_s は実際に試験車両が停止した位置である。停止位置精度が正の値は目標停止位置を通過して停止したことを意味し、負の値の場合は目標停止位置よりも手前で停止したことを意味する。図 23から10回の試行すべてで停止位置精度 $\pm 0.1\text{m}$ を満たすことを確認した。平均は -0.001m 、標準偏差は 0.011m 、 3σ は 0.033m であった[46]。試験線による評価は実際の鉄道システムの1/10スケールとなるように設計されている。1/10試験線で停止精度 $\pm 0.1\text{m}$ を満たしており、その10倍となる実環境では $\pm 1\text{m}$ の停止精度を満たせると考えられる。

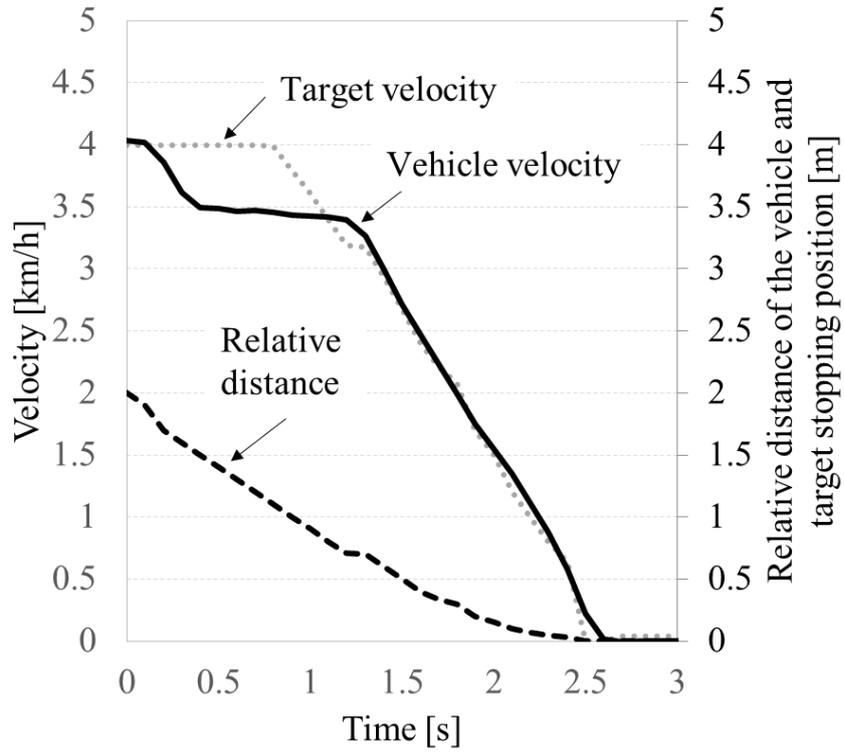


図 22 定点停止制御結果の例

Fig. 22 Result of stopping control using vision-based localization.

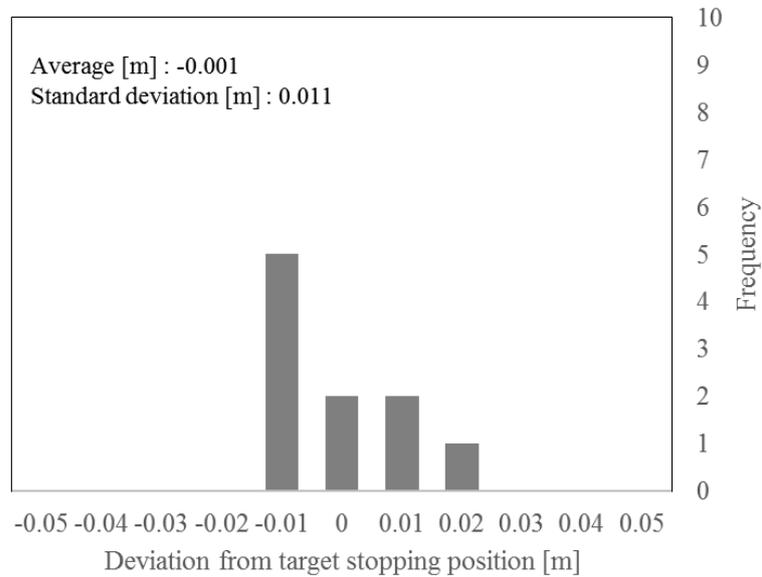


図 23 停止位置精度結果

Fig. 23 Histogram of accuracy of stopping position.

3.4 まとめ

定点停止制御向けの低コストな自己位置推定技術として地上目標物と列車との相対距離情報を画像処理により算出し、地上目標物の絶対位置と相対距離から自己位置を推定する方法を提案した。シミュレーションによる実現性検討では停止目標を2個設置することにより停止位置精度1mを満たせることを確認した。また、1/10試験線を用いた評価では画像処理によって連続的に自己位置が推定できること、画像処理により推定した自己位置で定点停止制御が安定して動作し、定点停止制御に求められる停止位置精度1mを満たせる見込みを得た。

提案方式は地上側設備である地上目標物（停止位置目標）を軌道上ではなく駅のホームなどに設置が可能となり、設置コストを低減できる可能性がある。マーカは1駅当たり数百万円程度かかるのに対して停止位置目標コストは数万から数十万円程度を想定している。車上設備は汎用品(数万円)であるカメラであり、鉄道システム向けに製造された受信機(数十万円)を利用するオドメーター+マーカ方式と比較して低コスト化が期待できる。

第4章

車両特性を考慮した自動調整技術

本章では定点停止制御技術のもう一つの課題であるシステム導入時の調整作業コストについてコスト低減に向けた研究を行う。調整作業の大部分を占める車両特性の把握にかかる調整日数を低減するために減速度波形から車両特性を自動で把握する自動調整技術を提案し、提案手法の実機試験結果や計算負荷の観点から有用性を評価する。

4.1 自動調整技術

4.1.1 動作原理

定点停止制御の調整作業に時間が掛かる理由として列車で実際に発生する減速度が設計減速度とは異なることが挙げられる。図 24は設計減速度波形と発生減速度波形のズレ具合を示す概念図である。著者らは発生減速度を以下のように分解できると考えた。

$$\text{発生減速度} = \text{設計減速度} + \text{定常偏差} + \text{外乱}$$

設計減速度は比例制御によって算出されたブレーキ指令に対して設計値として定義された出力すべき減速度である。定常偏差は列車ごとの発生減速度のばらつきであり、その変化周期は日や月単位と長く列車ごとに固有の値をとる。外乱は降雨時に車輪が滑走することにより発生する一時的な減速度のばらつきや、乗客の多寡に起因する一時的な減速度のばらつきである。従来の定点停止制御の調整作業では定常偏差と外乱に起因する発生減速度の偏差を比例制御のパラ

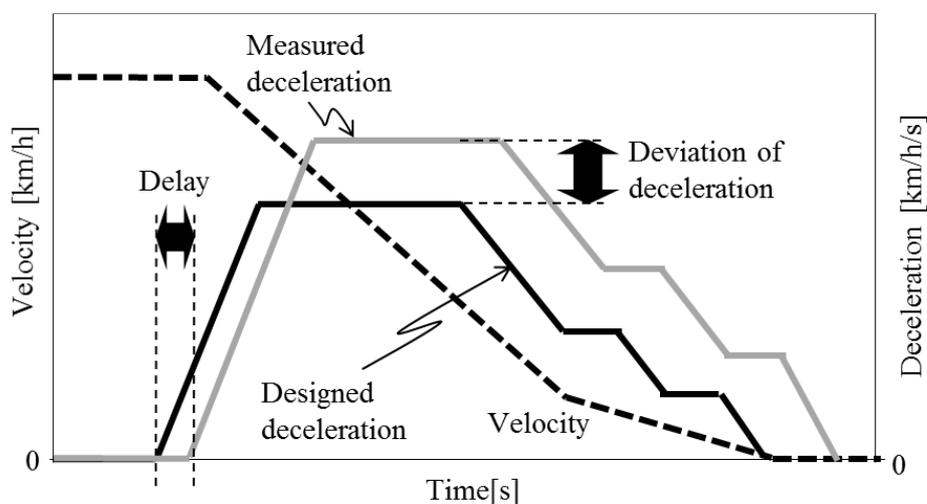


図 24 設計減速度と発生減速度のズレを示す概念図

Fig. 24 Conceptual diagram about difference between designed deceleration and measured deceleration.

メータ調整で吸収していた。そのため比例制御で大きな減速度偏差を吸収する必要があり、比例制御を難しくするとともに停止精度を満たす制御パラメータの範囲を狭く(パラメータが少ない)していた。その結果、最適な制御パラメータを決定するのに多くの作業時間を要していた。そこで著者らは定常偏差を自動的に把握し、把握した定常偏差に基づいてブレーキ指令を補正することにより、比例制御は降雨時の滑走など一時的な減速度のばらつきのみに対応させる方法を提案する。提案手法により比例制御で吸収すべき減速度の偏差が小さくなり、停止位置精度が安定するとともに停止精度を満たす制御パラメータが容易に決定できると考えた。このように定常的な偏差を自動で把握する技術を自動調整技術と呼ぶ。図 24に示すように設計減速度と発生減速度の定常偏差は減速度偏差以外に無駄時間（指令から実際に列車が減速を開始するまでの遅れ）にも発生する。本論文では減速度偏差と無駄時間の定常偏差を車両特性として把握することとする。

本論文で提案する自動調整技術を備えた定点停止制御のシステム構成を図 25に示す。自動調整技術(図 25 色塗りの部分)は、走行データの減速度情報か

ら車両特性を抽出し、統計処理により最終的な車両特性を得る。車両特性として把握するのは無駄時間（指令から実際に列車が減速を開始するまでの遅れ）と減速度偏差（設計減速度と発生減速度の偏差）である。無駄時間と減速度偏差の値は、ブレーキ指令に基づく設計減速度を時系列にプロットしたものである設計減速度波形と、実際に発生した減速度を時系列にプロットしたものである発生減速度波形とのズレ具合として把握する。自動調整技術は、はじめに発生減速度波形を所定範囲（例：無駄時間0～2秒，減速度偏差-1～+1km/h/s），所定の刻み幅（例：無駄時間0.1秒，減速度偏差0.1 km/h/s）で無駄時間方向・減速度偏差方向に平行移動させた新たな波形を作成する。次に新たな波形を無駄時間・減速度偏差のすべての組合せで作成し，設計減速度波形と比較し両波形のズレを評価関数 J とし，評価関数 J が最小となるときの無駄時間・減速度偏差の組合せを車両特性として抽出する（以下，総当り法と称する）。総当り法で算出した評価関数 J の例を図26に示す。評価関数 J が最小となるときの無駄時間・減速度偏差の組合せを車両特性として抽出する作業を駅停車ごとの走行データに対して行い，無駄時間・減速度偏差を積み上げる。図25に示した統計処理は空転・滑走などにより一時的に発生する車両特性のばらつきや，乗客の多寡に起因する車両特性のばらつきが車両特性として学習されないように，外乱の影響を除去するために実施する。一定期間車両特性(無駄時間・減速度偏差)を積み上げし得られた最頻値をその列車の車両特性とする。最後に得られた車両特性に対して適切な比例制御の制御パラメータを決定する。例えば得られた減速度偏差は比例制御のバイアス値補正に使用し，無駄時間は無駄時間後の列車位置予測に使用される。

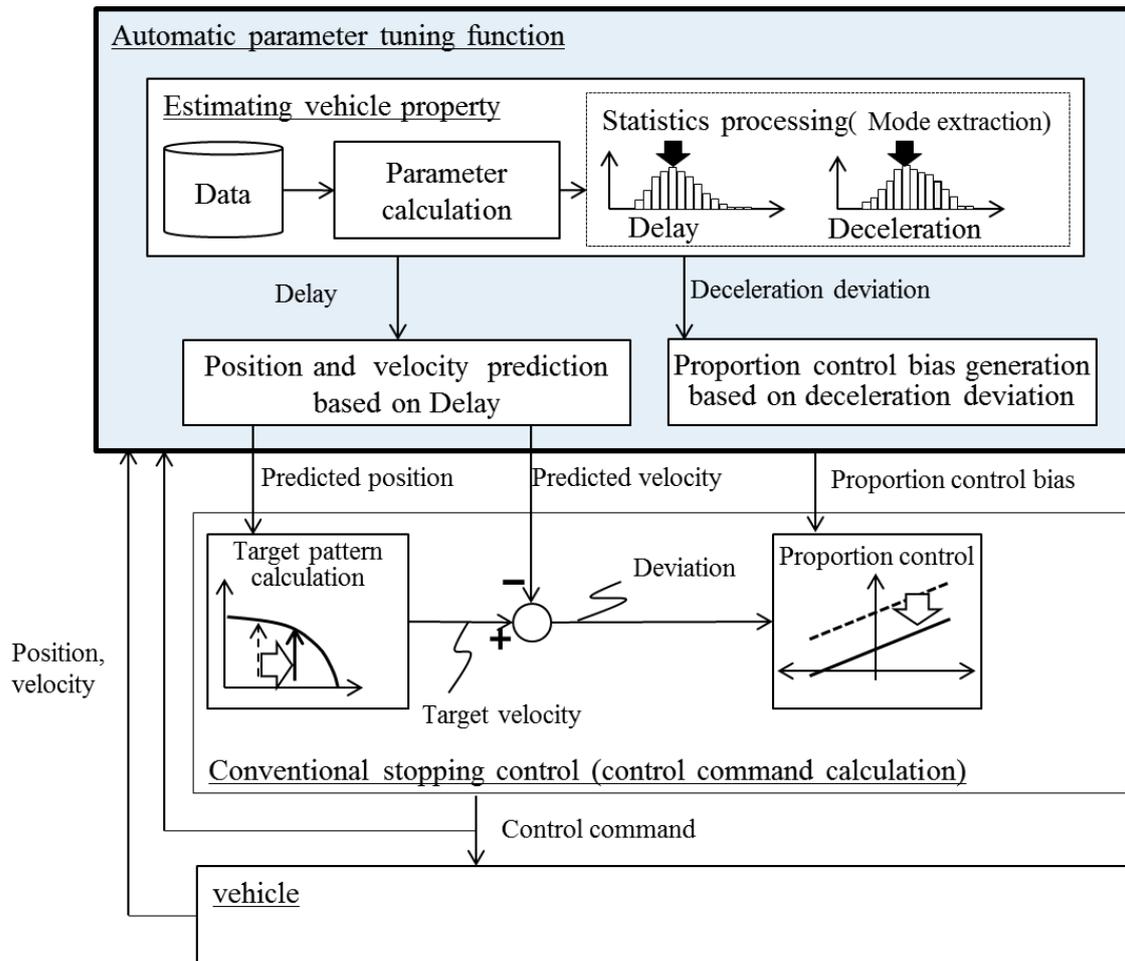


図 25 自動調整技術のシステム構成

Fig. 25 System configuration of automatic parameter tuning.

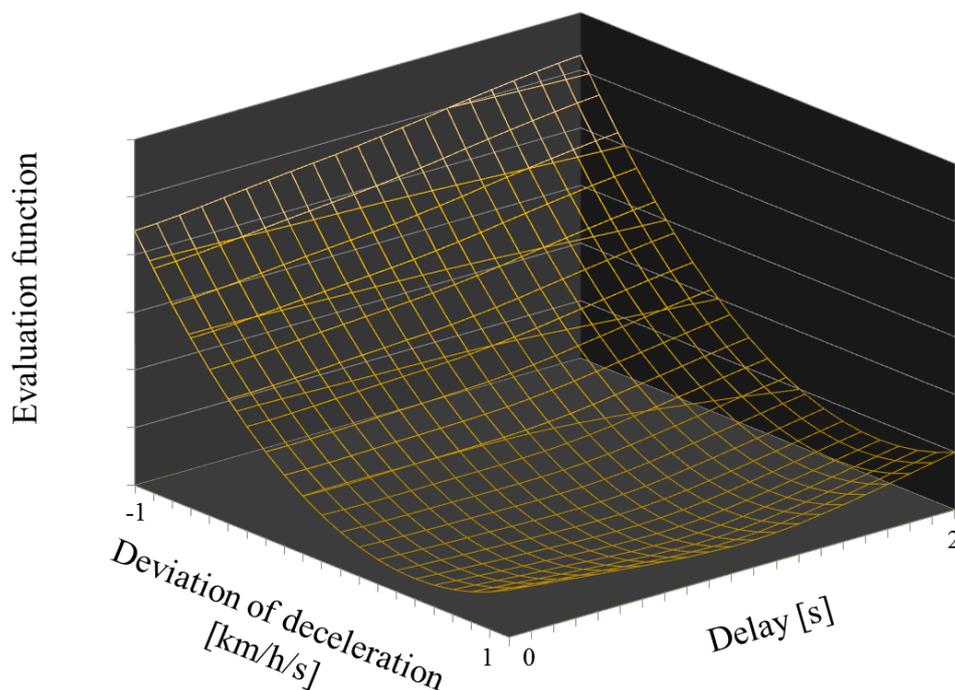


図 26 評価関数の応答曲面例

Fig. 26 Response surface of evaluation function.

4.1.2 停止位置精度と計算負荷評価

総当たり法による自動調整技術の評価を停止位置精度と計算負荷の観点で評価する。まず停止位置精度については総当たり法により得られた車両特性から比例制御の制御パラメータを決定し、その制御パラメータを使用して実機にて定点停止制御を行い停止位置精度を評価する。比較対象として手動で制御パラメータを調整した場合の停止位置精度も測定する。停止位置精度結果を図 27 に示す。自動調整技術なしの場合は停止位置精度ばらついているのに対し、自動調整技術を用いて決定した制御パラメータを用いることで停止位置精度のばらつきが抑制されていることが確認された。この結果、15 駅間の路線において調整日数は 6 日から 2 日に大幅に短縮された[47]。

次に計算負荷について評価する。自動調整技術は調整作業の短縮を目的としており、自動調整技術による車両特性の把握は短期間で完了することが望ましい。ところが提案手法では車両特性を統計処理により算出していることから、統計処理に時間がかかることが懸念される。したがって統計処理データの早期積み上げのため、車両特性を一駅間走行ごとに算出することを目標とする。国内の複数の地下鉄路線（5 路線、対象駅間は 182 駅間）の駅間走行時分を調査し

た結果、走行時分は 80 秒以上（地下鉄の一般的な駅停車時分 30 秒を含む）であったため、計算時間の目標値を 80 秒とする。

総当たり法による車両特性のパソコンにおける算出時間を、定点停止制御装置のCPUスペック(クロック周波数16MHz)で見積もった。結果、1駅間の走行データの車両特性算出時間が5000秒程度となり、開発目標である80秒を満たせなかった。そこで、計算時間の短縮するために総当たり法の計算負荷低減について次節で検討を行う。

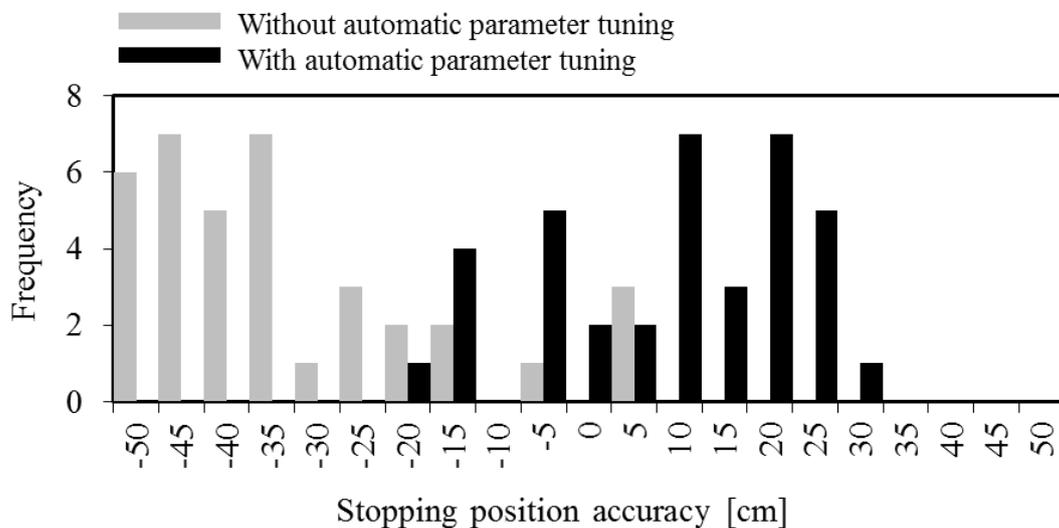


図 27 停止位置精度

Fig. 27 Comparison of stopping position accuracies with automatic parameter tuning and without automatic parameter tuning.

4.2 近似関数を用いた計算負荷低減

4.2.1 計算負荷低減方法

評価関数 J が2次関数のような挙動を示すことに着目し、評価関数 J を2変数2次関数で近似し、近似関数の極小値から設計減速度波形と発生減速度波形のズレが最小となる無駄時間・減速度偏差の組合せを解析的に算出する方法を提案する(以下、近似関数法と称する)。総当たり法では無駄時間21条件と減速度偏差21条件の計441条件で評価関数を計算していた。評価関数 J を式(5)に示すような2変数2次関数で近似できれば、近似関数の6つの係数を導出するために6つの方程式があればよいことになるため、評価関数の計算は6点で済むこととなり、大幅な計算負荷低減が期待できる。以下、近似関数法の詳細を説明する。近似関数 $Z(x,y)$ を

$$Z(x,y) = ax^2 + by^2 + cx + dy + exy + f \quad (5)$$

と定義する。ここで、 a,b,c,d,e,f は係数である。次に、無駄時間と減速度偏差の組み合わせ (x,y) を6点選択し、評価関数 $J(x,y)$ を求めると連立方程式(6)を得る。行列 A (式(7))および列ベクトル \mathbf{a} (式(8))、 \mathbf{z} (式(9))を用いて連立方程式(6)は式(10)であらわされる。

$$\left. \begin{aligned} ax_1^2 + by_1^2 + cx_1 + dy_1 + ex_1y_1 + f &= J(x_1, y_1) \\ ax_2^2 + by_2^2 + cx_2 + dy_2 + ex_2y_2 + f &= J(x_2, y_2) \\ ax_3^2 + by_3^2 + cx_3 + dy_3 + ex_3y_3 + f &= J(x_3, y_3) \\ ax_4^2 + by_4^2 + cx_4 + dy_4 + ex_4y_4 + f &= J(x_4, y_4) \\ ax_5^2 + by_5^2 + cx_5 + dy_5 + ex_5y_5 + f &= J(x_5, y_5) \\ ax_6^2 + by_6^2 + cx_6 + dy_6 + ex_6y_6 + f &= J(x_6, y_6) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$A = \begin{bmatrix} x_1^2 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_6^2 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} J(x_1, y_1) \\ \vdots \\ J(x_6, y_6) \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$A \cdot \mathbf{a} = \mathbf{z} \tag{10}$$

ここで、式(6)が唯一の解を持つための十分条件は係数行列**A**が正則であることである。そこで無駄時間と減速度偏差の組み合わせのうち、総当たり法で得られた車両特性(無駄時間・減速度偏差)に近い点から係数行列**A**が正則となるような6点の無駄時間・減速度偏差の組み合わせを設定した。式(10)に左から逆行列**A⁻¹**をかけると近似関数の係数を表す列ベクトル**a**(式(8))が求まり近似関数Z(x,y)が得られる。

近似関数Z(x,y)がある無駄時間・減速度偏差の組み合わせ(p,q)で極小値をとるとき、

$$\frac{\partial Z}{\partial x}(p, q) = \frac{\partial Z}{\partial y}(p, q) = 0$$

(11)

が成立する。式(11)を満たす (p, q) を求めることで近似関数 $Z(x, y)$ が極小値をとる無駄時間・減速度偏差が得られる。事前検討から評価関数 $J(x, y)$ を求めると無駄時間0~2秒，減速度偏差-1~1km/h/sの領域において，極値を有しており下に凸の挙動をとることを確認されているため判別式による判定は省略する。

式(11)を満たす (p, q) を近似関数 $Z(x, y)$ に関して求める。近似関数 $Z(x, y)$ を式(11)に代入すると，連立方程式(12)を得る。

$$\left. \begin{aligned} 2a \cdot p + c + e \cdot q &= 0 \\ 2b \cdot q + d + e \cdot p &= 0 \end{aligned} \right\}$$

(12)

式(12)を (p, q) について解くと式(13)が得られる。

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{2bc - de}{e^2 - 4ab} \\ q &= \frac{2ad - ce}{e^2 - 4ab} \end{aligned} \right\}$$

(13)

近似関数 $Z(x, y)$ の係数 a, b, c, d, e, f は既知であるから，式(13)より近似関数 $Z(x, y)$ の極小値が算出される。すなわち，評価関数 $J(x, y)$ が最小となる車両特性（無駄時間，減速度偏差の組み合わせ）が得られる。

4.2.2 近似関数法の評価

近似関数法の評価を以下の観点で評価する。

- (1)評価関数 J に対して近似関数 Z が妥当であること
- (2)計算時間が80秒以内であること

(1)については、前述の実機検証時の走行データ（全80駅間走行データ）を用いて、近似関数法で算出した制御パラメータが総当たり法で算出した制御パラメータと一致するか、(2)については、1駅間の走行データの車両特性算出時間が80秒以下であるかを判定基準とした。

まず、近似関数 Z の妥当性評価について述べる。総当たり法と近似関数法で算出した車両特性の分布比較を図28に示す。自動調整技術では各駅ごとに得られた車両特性に対して統計処理を行い、最頻値を最終的な制御パラメータとして採用する。今回使用したデータでは総当たり法による制御パラメータが0.4km/h/s、近似関数法による制御パラメータも0.4km/h/sであり総当たり法と同じ制御パラメータを近似関数法でも算出可能であることを確認した。すなわち2変数2次関数で総当たり法の評価関数を近似可能であることを確認した。

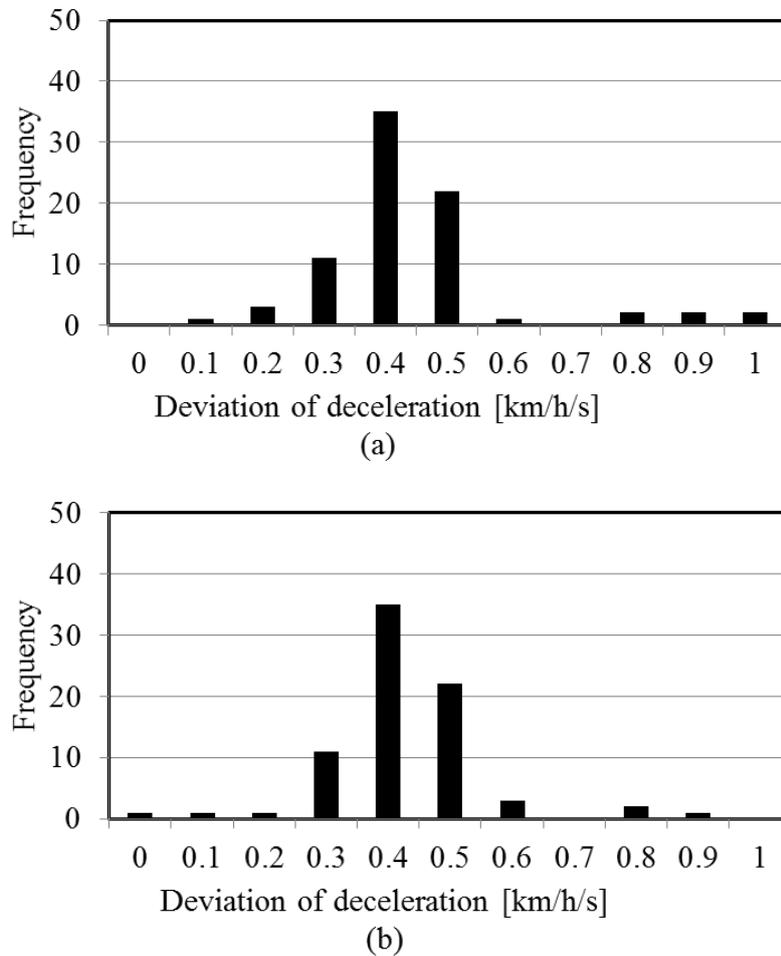


図 28 車両特性分布比較

(a)総当たり法

(b)近似関数法

Fig. 28 Tuning parameter result by :

(a) round robin method.

(b) approximation function method.

次に、計算負荷について検証する。計算負荷検証は以下の手順で実施した。

(1)自動調整技術(総当たり法)をパソコンに実装し、車両特性の算出に必要な計算時間を記録

(2) 計算時間がクロック周波数に反比例すると仮定し、パソコンでの計算時間から定点停止制御装置上での計算時間を見積

パソコン : CPUクロック周波数2,830MHz

定点停止制御装置：CPUクロック周波数16MHz

(3)総当たり法と近似関数法の評価関数の算出点の比率(6/441)から近似関数法による計算時間を推定

結果、定点停止制御装置における1駅間の走行データの車両特性算出の推定計算時間が約70秒となり、目標である80秒以内となることを確認した。今回はすべての既存の定点停止制御装置に適用可能とするために、定点停止制御装置のCPUとしては低いクロック周波数に条件で計算時間を評価したが、最新の定点停止制御装置のCPUであればクロック周波数に応じて計算時間は短くなる。その場合、統計処理が短時間で終了し、自動調整技術による制御パラメータの調整も短時間で終了することが期待できる。

4.3 まとめ

設計減速度波形と発生減速度波形のズレから車両特性が自動で把握できることを明らかにした。この自動調整技術で停止位置精度が安定することや従来の専門作業員による調整と比較して調整作業日数が1/3になることを確認した。また定点停止制御装置への実装検討も行い、近似関数法を用いることで計算負荷を抑えつつ、追従制御の制御パラメータを自動で算出可能なことを明らかにした[48]。

第5章 結論

5.1 研究成果の概要

鉄道システムの省エネに寄与する自動運転技術をより多くの列車や路線に導入するためには、定点停止制御を安価に実現することが重要である。そこで本研究では、従来と比較して安価に定点停止制御を実現する技術について検討を行った。

第2章では鉄道システムの自動運転技術で鍵となる定点停止制御に関して、その構成要素と課題について述べた。定点停止制御システムの導入コストが高くなる要因である、(1)高精度自己位置推定のための装置が高価、(2)システム導入時に実使用環境下における専門作業員による調整作業が必要で人件費がかかる、という二つの課題に対して(1)の課題を解決するための研究を第3章で、(2)の課題を解決するための研究を第4章で行った。

第3章では現状のマーカを用いた自己位置推定に代えて画像処理を用いて自己位置を推定する新たな手法を提案した。提案手法について計算機シミュレータを用いた実現性検討や、1/10スケールの試験車両を用いた提案手法による定点停止制御の停止位置精度の評価を行い、目標とする停止位置精度を満たすことを確認した。またコストの評価も行い画像処理を用いることでコストが低減されることを明らかにした。

第4章では、もう一つの課題であるシステム導入時の調整作業コストを低減するための研究を行った。まず、調整作業の大部分を占める車両特性の把握について減速度波形から自動調整を行う技術を提案し、提案手法の実機試験結果や計算負荷の観点から有用性を評価した。その結果、近似関数を用いた自動調整技術によって計算負荷を低減しつつ、停止位置精度を満足することを明らかにした。また、自動調整技術により従来の専門作業員による調整と比較して調整作業日数が1/3となることを明らかにした。

以上のように本研究により定点停止制御の課題であった導入コストの高さを改善できる見通しが得られた。本研究で得られた成果を自動運転技術に適用することで低コストで自動運転技術が実現される見込みが得られた。その結果、自動運転技術を用いて省エネな走行パターンで列車を走行させることが可能となり、運転士ごとの運転操作のばらつきに起因する消費エネルギーのばらつきが抑制され、消費エネルギーが20%程度削減できると考えられる。

5.2 残された課題と今後の展望

本研究では画像処理による自己位置推定技術について照明が存在し環境が安定した地下路線を対象とする前提条件をおいた。省エネのために自動運転技術を広めていくためには、屋外を走行する路線への適用を検討する必要がある。

そのため今後は画像処理による自己位置推定技術の自己位置推定精度や、画像処理による推定自己位置を用いた定点停止制御の安定性について屋外を含めた様々な環境で評価していく予定である。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、筑波大学 システム情報工学研究科 水谷孝一教授には論文投稿先のアドバイスや、査読結果への対応、研究のまとめ方、質疑応答の仕方など、細部にいたるまで懇切丁寧にご指導・ご鞭撻を賜りました。著者は社会人学生として在学していたため日程などで制約が多かったのですが、水谷教授には常にご配慮頂き、学位論文を円滑に作成することができました。また、筑波大学 システム情報工学研究科 知能機能システム専攻 海老原格准教授、北原格准教授、若槻尚斗准教授、庄野 和宏准教授、NTT 未来ねっと研究所 安藤篤也様には、学位論文の審査を頂き、研究内容の伝え方や研究ストーリーの立て方などについて有益なご助言・ご指導を賜りました。

本研究は、株式会社日立製作所 研究開発グループにおいてその機会を頂いて実施した研究の成果をまとめたものです。研究を遂行するにあたり、特に常日頃からご指導いただきました勝田敬一氏（制御イノベーションセンタ 輸送システム制御研究部 ユニットリーダー主任研究員）、社会人ドクターの機会を与えていただいた鈴木敦氏（制御イノベーションセンタ センタ長）、川股幸博氏（制御イノベーションセンタ 輸送システム制御研究部 部長）に心より謝意を表します。

最後に、博士号取得という自分の夢にチャレンジする機会を与えてくれ、育メン全盛のこの時代に休日の貴重な時間を自分自身の研究のために費やすことを許してくれた妻 夏海に感謝します。またさびしい思いをさせた子供達 航太郎、駿之介にも感謝します。ありがとう。

参考文献

- [1] 秦広, “鉄道の省エネルギー”, 鉄道総研レビュー第69巻第5号, pp.4-7, 2012.
- [2] 川崎 淳司, 河野洋一, 菅谷 誠, 祖父江 昭彦, 星野 健太郎, 小田 篤史, 辰巳 尚吾, “100Mbpsイーサネットによる鉄道車両伝送システムの開発(第二報)”, 平成24年電気学会産業応用部門大会講演論文集, pp.219-220, 2012.
- [3] 佐藤真哉, 菅谷誠, 廣瀬哲也, 松橋正美, 佐藤春雄, 祖父江昭彦, 牧 健太郎, 星野健太郎, 辰巳尚吾, “100Mbpsイーサネットによる鉄道車両伝送システムの開発(第三報)”, 平成25年電気学会産業応用部門大会講演論文集, pp.1909-202, 2013.
- [4] 井関一隆, “JR西日本における電力削減に向けた挑戦”, 持続可能な低コスト・省エネルギー鉄道のためのパワーマネジメントに関する公開シンポジウム, 2012.
- [5] 横田将堯, 宮内努, 水口芳樹, 菌田秀樹, “運転エネルギー測定データを用いた省エネ運転パターン作成手法の検討”, 鉄道技術連合シンポジウム(J-Rail)講演論文集, 2015.
- [6] 村田悟, 永田剛士, 秋山弘之, “駅間の速度制限を考慮した省エネルギー運転曲線作成方法”, 鉄道技術連合シンポジウム(J-Rail)講演論文集, No. 135, 1995.
- [7] A.R.Albrecht, P.G.Howlett, P.J.Pudney, X.Vu, “Energy-efficient train control: From local convexity to global optimization and uniqueness”, Automatica, Vol 49, No. 10, pp.3072-3078, 2013.
- [8] N.V.Cuong, 渡邊翔一郎, 古関隆章, “エネルギーと最大制動電力の比較分析に基づくATO省エネルギー運転曲線設計”, 鉄道技術連合シンポジウム(J-Rail)講演論文集, pp.409-412, 2013.
- [9] 高英聖, 古関隆章, 宮武昌史, “動的計画法を用いた列車運転曲線最適化問題の求解法”, IEEEJ Trans. IA, Vo. 125, No. 12, pp.1084-1092, 2005.

- [10] 行木英明 , 桑原梨瑛子, 佐口太一 , “長距離走行時の省エネ実現に向けた惰行活用列車運転方式の検討”, 平成27年電気学会全国大会講演論文集, pp.388-389, 2015.
- [11] 落合統, “ATOの走行制御技術<5>”, 鉄道車両と技術, No. 181, 2011.
- [12] 竹井靖, 新美行男, 江幡文男, “7000系定位置停止支援装置の開発”, 第45 回サイバネ・シンポジウム論文集, 論文番号522,2008.
- [13] 安藤裕隆, 田中光彦, 成田武, “あおなみ線1000形TASC装置-TASC・ホームドア制御装置-”, 第42 回サイバネ・シンポジウム論文集, 論文番号519, 2005.
- [14] D. Chen, R.Chen, Y. Li, T. Tang, “Online learning algorithms for train automatic stop control using precise location data of Balises” , IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems, Vol. 14, No. 3, pp. 1526-1535, 2013.
- [15] 根岸徹, 大矢純子, 高木誠, 射場智, 中澤弘二, “停止位置精度向上と省エネを目指したATOシステムの開発” ,第44 回サイバネ・シンポジウム論文集, 論文番号513, 2007.
- [16] 山本春生, “GPSの鉄道への適用” , Railway Research Review, Vol. 67, No. 2, pp. 30-31, 2010.
- [17] L. Jiang, C. Bai-gen, W. Jian2016, “Track-constrained GNSS/Odometer-based Train Localization using a Particle Filter” , IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2016.
- [18] 水間 毅, 吉永純, 工藤 希, “衛星を用いた列車制御・保安システムの開発” , 交通安全環境研究所報告, 第11号, 2007.
- [19] A. Albanese, L. Marradi, “The integrity performances of GNSS-based railway user navigation equipment” , Proceedings of the 2005 ASME/IEEE Joint Rail Conference, pp. 211-218, 2005.
- [20] O. Gebauer, W. Pree, B. Stadlmann, “Autonomously driving trains on open tracks - concepts, system architecture and implementation aspects ” .
<http://www.softwareresearch.net/research/publications/journal-publications/>.
- [21] K. Lingemann, H. Surmann , A. Nuchter, “Indoor and Outdoor Localization for Fast Mobile Robots”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots

- and Systems, 2004.
- [22] 村松英治, “高度な自動運転を実現するLIDAR技術”, Journal of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 71, No. 3, pp. 37-42, 2017.
 - [23] R. Zlot, M. Bosse, “Place Recognition Using Keypoint Similarities in 2D Lidar Maps”, Springer Tracts in Advanced Robotics Vol. 54, pp. 363-372, 2009.
 - [24] J. Zhang, S. Singh, “Lidar Odometry and Mapping in Real-time”, Robotics: Science and Systems Conference, 2014.
 - [25] T. Daoust, F. Pomerleay, Timothy D. Barfoot, “Light at the End of the Tunnel: High-Speed Lidar-Based Train Localization in Challenging Underground Environments”, Conference on Computer and Robot Vision, 2016.
 - [26] D. Stein, M. Spindler, J. Kuper, M. Lauer, “RAIL DETECTION USING LIDAR SENSORS”, International Journal of Sustainable Development and Planning Vol. 11, No. 1, pp. 65-78, 2016.
 - [27] 島田直人, 加藤孝信, 島田信幸, 北野士朗, 川又薫, 松村隆史, “鉄道環境に適応するミリ波速度計の開発と精度向上手法”, 第50回サイバネ・シンポジウム論文集, 論文番号526, 2013.
 - [28] H. Lategahn, C. Stiller, “Vision-Only Localization”, IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS VOL. 15, NO. 3, pp. 1246-1257, 2014.
 - [29] B. Bah, E. Jungabel, M. Kowalska, C. Leithäuser, A. Pandey, C. Vogel, “Odometry for train location”, EUROPEAN CENTRE FOR MINORITY ISSUES REPORT, 2009.
 - [30] 大矢純子, 宮島康行, 中澤弘二, “東芝の自動列車運転システム”, 鉄道車両と技術 No.177 レールアンドテック出版, 2011.
 - [31] 大矢純子, 鎌田恵一, 結城和明, 中澤弘二, 明石征邦, “予測制御を用いた駅定位置停止制御装置の開発”, サイバネティクス 論文番号509, 2005.
 - [32] 根岸徹, 高木誠, 大矢純子, 射場智, 中澤弘二, “安定輸送と省エネを目指したATOシステムの開発”, サイバネティクス 論文番号513, 2008.
 - [33] 志磨健・的野春樹・掛川晋司・門司竜彦: 「自動車向け画像認識技術とステレオカメラによる距離計測」, 応用物理学会分科会日本光学会, 光学, Vol.

- 41, No. 5, pp. 287-291, 2012.
- [34] 滝本周平・伊藤崇晶:「車載カメラを用いた単眼測距検証システムの開発」, SEI テクニカルレビュー, 第169号, pp. 82-87, 2006.
- [35] 李博・張曉林・佐藤誠:「車間距離計測のための車載単眼カメラを用いたピッチ角推定」, 映像情報メディア学会誌, Vol. 69, No. 4, pp. 169-176, 2015.
- [36] Z. Sadreddini, T. Çavdar, H. B. Jond (2016): “A distance measurement method using single camera for indoor environments” , Telecommunications and Signal Processing, 39th International Conference.
- [37] M. Milkhalsky, J. Sitte (2004): “Active motion vision for distance estimation in autonomous mobile robots” , Robotics, Automation and Mechatronics, IEEE Conference.
- [38] G.P. Stein, O. Mano, A. Shashua: 「Vision-based ACC with a single camera: bounds on range and range rate accuracy」 , Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings. IEEE, 2003.
- [39] IEEE 1474 part1, pp.31 Table C.1, 2004.
- [40] 池山 智也, “自動運転に向けたセンサの開発動向と展望”, Journal of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 71, No. 2, pp. 13-17, 2017.
- [41] JIS E6002, 通勤用電車の性能通則, 走行抵抗式(1), 2008.
- [42] 牧健太郎, 小平豊, 小田篤史, “TASC 装置導入時の調整工数を低減する自動調整機能の開発”,第51回サイバネ・シンポジウム論文集, 論文番号534, 2014.
- [43] P. Wu, Q. Wang, “Research of the automatic train stop control based on adaptive generalized predictive control” , 33rd Chinese Control Conference, 2014.
- [44] D. Chen, R. Chen, Y. Li, “Online Learning Algorithms for Train Automatic Stop Control Using Precise Location Data of Balises” , IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems Vol. 14, No. 3, pp. 1526 - 1535 , 2013.
- [45] 小田篤史, 堤雄飛, 西野尊善, “画像処理による地上目標物との相対距離情報を用いた定位置停止制御の実現性検討”, REAJ誌, Vol. 41, No. 1, 2019.
- [46] A. Oda, Y. Tsutsumi: 「Vision-based localization for stopping control of public transportation system」 , Proceedings of the 8th International Conference on

Railway Engineering (ICRE 2018), 2018.

- [47] 牧健太郎・小平豊・小田篤史：「TASC装置導入時の調整工数を低減する自動調整機能の開発」, 第51回サイバネ・シンポジウム論文集 論文番号534, 2014.
- [48] 小田篤史・新美行男・牧健太郎：「車両自動停止制御装置の自動調整機能の開発」, 電気学会論文誌D Vol. 136, No. 9, pp. 629-634, 2016.

著者論文

公表済み論文（学位請求申請に関連のある論文）

査読付雑誌論文

- (1) 小田篤史, 新美行男, 牧健太郎, 「列車自動停止制御装置の自動調整機能の開発」, 電気学会論文誌D, Vol. 136, No. 9, 2016, pp. 629-634.
- (2) 小田篤史, 堤雄飛, 西野尊善, 「画像処理による地上目標物との相対距離情報を用いた定位置停止制御の実現性検討」, REAJ誌, Vol. 41, No. 1, 2019.

査読付国際会議論文

- (2) A. Oda, Y. Tsutsumi, “Vision-based localization for stopping control of public transportation system”, Proceedings of the 8th International Conference on Railway Engineering (ICRE 2018), 2018.

公表済み論文（学位請求申請に関連のない論文）

査読なし発表論文

- (1) 菅谷誠, 川崎淳司, 祖父江昭彦, 星野健太郎, 小田篤史, 甲村哲朗, 「100Mbpsイーサネットによる鉄道車両伝送システムの開発（第一報）」, 【D】平成23年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 2011, 3-75.
- (2) 川崎淳司, 河野洋一, 菅谷誠, 祖父江昭彦, 星野健太郎, 小田篤史, 辰巳尚吾, 「100Mbpsイーサネットによる鉄道車両伝送システムの開発（第二報）」, 【D】平成24年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 2012, 5-20.
- (3) 牧健太郎, 小平豊, 小田篤史, 「TASC(タスク)装置導入時の調整工数を低減する自動調整機能の開発」, 鉄道サイバネ・シンポジウム論文集 51, 2014.

- (4) 小田篤史, 小平豊, 牧健太郎, 「TASC 向け車両特性自動学習機能の開発」, 鉄道サイバネ・シンポジウム論文集 52, 2015.
- (5) 小田篤史, 牧健太郎, 堀聡美, 西野亨, 原田淳一, 「省エネ運転支援システムの実証試験」, 平成29年電気学会全国大会論文集, 2017, 5-224.
- (6) 小田篤史, 村上真子, 福原聖人, 堀聡美, 徳山和男, 「運転技術の見える化システムの開発」, 鉄道サイバネ・シンポジウム論文集 54, 2017.
- (7) 中村恭之, 宮内努, 小田篤史, 「鉄道システムの電力消費および輸送力評価技術と省エネルギーへの取り組み (特集 社会ニーズに応え,将来を担う鉄道技術)」, 日立評論 94(6), 2012, pp.452-456.
- (8) 宮内努, 鈴木基也, 小田篤史, 「鉄道統合評価システムの開発と鉄道システム省エネ技術への取り組み」, 自動車技術 66(10), 2012, pp.73-78.