

M-CubITS による列車位置検知

松岡 義大[†] 古川 誠治[†] 氏家 健[†] 長谷川 孝明^{††} 金 帝演^{††} 小林 正典^{†††}

[†] 日本信号株式会社研究センター 〒356-8524 埼玉県久喜市大字江面字大谷 1836-1

^{††} 埼玉大学理工学研究科 〒338-0825 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255

^{†††} 秩父鉄道株式会社 〒360-0033 埼玉県熊谷市曙町 1 丁目 1 番地

E-mail: [†] {matsuoka,furukawa,ujiie}@signal.co.jp, ^{††} {takaaki,jykim}@hslab.ees.saitama-u.ac.jp

あらかし 本稿では、鉄道環境下での実証実験を通して M-CubITS による列車位置検知の性能評価を行っている。イメージセンサを用いることにより、GPS や電波を用いた既存の列車位置検知装置と比較してより高い精度で列車位置を検知できることを示している。

キーワード M-CubITS, ポジショニングシステム, 列車位置検知

Train Position Detection System Using M-CubITS

Yoshihiro Matsuoka[†] Seiji Furukawa[†] Takeshi Ujiie[†] Takaaki Hasegawa^{††} Jeyeon Kim^{††}

Masanori Kobayashi^{†††}

[†] Research Center, Kuki Plant, the Nippon Signal Co.,Ltd.

1836-1 Oaza Ezura, Kuki-shi, Saitama, 346-8524 Japan

^{††} Graduate School of Science and Engineering, Saitama University

255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

^{†††} Chichibu Railway Co.,Ltd.

1-1 Akebono-cho, Kumagaya-shi, Saitama 360-0033 Japan

E-mail: [†] {matsuoka,furukawa,ujiie}@signal.co.jp, ^{††} {takaaki,jykim}@hslab.ees.saitama-u.ac.jp

Abstract This paper describes performance evaluation of the train position detection system using M-CubITS through experiments in a rail-way environment. Results show that this image sensor systems can achieve more accurate positioning in comparison with conventional systems such as the GPS based or radio based systems.

Keyword M-CubITS, Positioning System, Train Position Detection,

1. はじめに

画像処理技術の進歩はめざましく、今後もさらなる発展が期待される。現在、自動車の安全運転支援システムや防犯・監視システムにはイメージセンサが広く利用されている。しかし、鉄道分野においてはホームの転落検知や車両内・駅構内での防犯目的で利用されている程度で運転支援や列車制御への利用例はほとんど見られない。鉄道分野では、効率的な運転制御には、列車の位置をいかに精確かつ確実に検出するかが重要な課題である。とくに進路制御や停止位置制御には、さらに高い位置検知精度が要求される。D-ATC では ±0.2% 程度の位置検知精度で、ATO (自動列車運転装置) の停止精度は、±35cm 程度であると知られている [1]。DGPS ではトンネルでの通信補正、ビル群の谷間でのマルチパスの影響などにより位置検知精度は数 m 程度

であるが、直達波が見えない場所ではより誤差が大きくなる。将来的には無線通信技術の飛躍的な発展が期待される。既存の装置とイメージセンサと画像処理技術を利用した装置 (M-CubITS [2]: M 系列マルチモデルマーカポジショニングシステムなど) が協調することで運転制御の更なる効率化、安全運転支援などに貢献できることが期待される。

本稿では、画像処理技術 (M-CubITS) による鉄道位置特定システムを試作し、鉄道環境で実験による性能評価を行う。

2. 実験システム

ここでは実験システム構成、列車位置推定方法、実験場所、実験方法について説明する。

2.1. 実験システム構成

レール側面に貼り付けた M-CubITS マーカ素子を車両床下に取り付けた装置内の CCD イメージセンサにより撮影する。CCD イメージセンサの映像データを映像ケーブルと DV コンバータを通して車両客室内のノート PC で取り込み、画像処理によりマーカ検出及び列車位置と速度を算出し結果を逐次記録する。図 1 にシステム構成を示す。

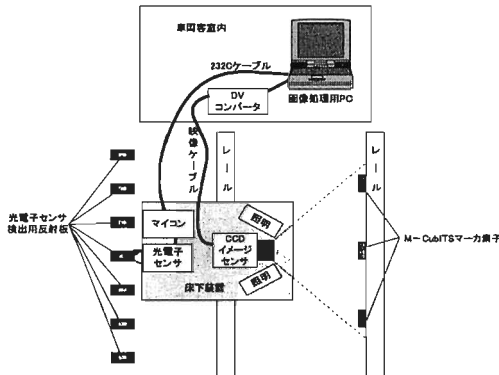


図 1: システム構成図

M-CubITS マーカ素子としては再帰反射性シートを用い、映像データのマーカ部分の輝度が高くなるように CCD イメージセンサの周囲に照明を取り付けてマーカを照射するようにした。

M-CubITS による列車位置と速度の検知精度を評価するために基準となるデータが必要となる。基準データを取得するための系として M-CubITS マーカ素子とは別に反射板を地上レール横に設置し、床下装置内に下向けに取り付けた光電子センサとマイコンを用いて検知する。反射板を検知した際には、マイコンから検知時間データを客室内 PC にシリアル通信で送信し、記録することで反射板検知の時系列データを作成する。

図 2 に床下装置の写真、図 3 に実験で使用した車両、図 4 に M-CubITS マーカ素子と反射板を設置した様子を示す。

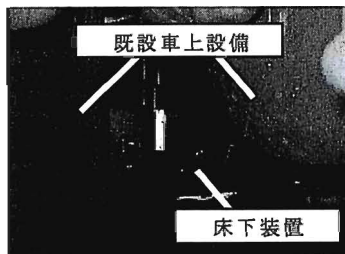


図 2: 床下装置



図 3: 実験車両 (5000 系)

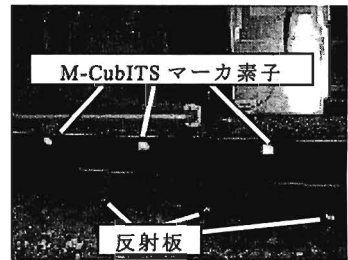


図 4: M-CubITS マーカ素子と反射板

2.2. 列車位置と速度の推定方法

M-CubITS による列車位置と速度の推定手順を以下に示す。

- ① マーカ
CCD イメージセンサから得られた画像データから、輝度、色相の閾値条件によりマーカ部分を抽出する。
- ② マーカの復号
各マーカには色別に 1, 0 の符号が割り当てられている。①で抽出したマーカの色相から各マーカの色を判別し符号系列を復号する。
- ③ マーカ位置の判定
得られた符号の部分系列と実験区間全体の符号系列データベースとを比較し、各マーカが何 m 地点のマーカであるかを判定する。
- ④ 列車位置の推定
画面中央付近のマーカの画面内重心座標を求め、マーカとカメラの相対距離を算定し③で求めたマーカ位置とあわせてカメラの位置を決定し、その時刻における列車位置とする。
- ⑤ 列車速度の推定
④で推定した時刻、列車位置データと 1 フレーム前のデータからフレーム間の列車移動距離 Δx 、時間差 Δt を求め、列車速度を $v = \Delta x / \Delta t$ として推定する。

2.3. 実験場所

今回の実験は秩父鉄道株式会社の広瀬川原車両基地内において実施した。1 つの番線の 150m の区間に M

-CubITS マーカ素子を 1m 毎に 151 枚, 光電子センサ用反射板を 50cm 毎に 301 枚設置した。

2.4. 実験方法

M-CubITS による列車位置と速度の検知精度に影響を与えると考えられるパラメータとして列車走行速度と M-CubITS マーカ素子の周囲の明るさがある。今回の実験ではこれらのパラメータの影響を検証するために列車走行速度については 5km/h, 10km/h, 20km/h の 3 通り, 周囲の明るさについては昼, 夕方の 2 通りで計 6 通りの条件で列車走行を行い列車位置と速度検知データを取得した。

3. 性能評価

ここでは位置検知データの評価方法を述べ, 評価結果を示す。

3.1. 基準データ

M-CubITS による位置・速度検知精度を評価するための基準データを光電子センサによる反射板検知の時系列データから作成する。

3.1.1. 基準データ作成手順

- ① スタート位置から n 番目の反射板を検知した時刻を $t_n(n=1\cdots 301)$ とする。② 時刻 $t_n(n=2\cdots 301)$ における列車速度を v_n とする。
- ② $n-1$ 枚目と n 枚目の反射板を検知した時刻の時間差 Δt_n は

$$\Delta t_n = t_n - t_{n-1} \quad (1)$$
 として求められる。反射板間隔 50cm から v_n を

$$v_n = 0.5 / \Delta t_n \quad (n=2\cdots 301) \quad (2)$$
 として求める。
- ③ ②で得られた時系列データ ($t_n, v_n (n=2\cdots 301)$) をグラフにプロットする。実験時の列車走行速度は実験区間内で等速ではなく運転者の扱い条件により加速が発生している。グラフから目視により加速エリア、減速エリアを判断する (図 5)。

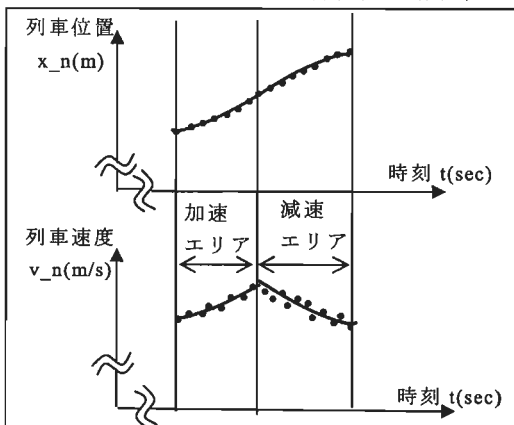


図 5: 加減速エリアの判断

- ④ $t_k \sim t_{k+1} (k, l \geq 1)$ までを一つのエリアとしたとき、時系列データ $(x_k, t_k), \dots, (x_{k+1}, t_{k+1})$ の 3 次の最小二乗近似曲線をそのエリア内での列車位置の基準とする。また、時系列データ $(v_k, t_k), \dots, (v_{k+1}, t_{k+1})$ の 2 次の最小二乗近似曲線を列車速度の基準とする。

3.1.2. 反射板検知漏れと基準データの補間

今回の実験では各実験走行において 301 枚の反射板のうち数枚の反射板について光電子センサで検知できなかった場合があった。原因としては反射板の設置位置・角度の不整合が考えられる。各実験走行での反射板検知回数を m 回とすると, 301 回に満たない場合 $(301-m)$ 個の反射板の検知漏れが発生したことになる。この状態で基準データを作成すると検知漏れ発生箇所以降の基準位置に不整合が生じるため, 検知漏れの発生箇所を特定し, 基準データの補間を行う必要がある。ここで k 番目までの反射板をすべて検知後, 1 枚の反射板検知漏れが発生したとする。このとき隣接する反射板間では列車速度は変化しないとし, 以下の手順で検知漏れ発生箇所を特定する。

- ① (1)式より $\Delta t_n (n=2\cdots 301-1)$ を求める。
- ② このとき $\Delta t_{k+1} = t_{k+1} - t_k$ は実際には 1 枚の検知漏れが発生しているため 50 cm ではなく $50 * (l+1)$ cm の距離を走行しているため, Δt_{k+1} は Δt_k の約 $(l+1)$ 倍になっている。このことから $k+1$ 番目から 1 枚の反射板検知漏れが発生したことがわかる。
- ③ k 番目から $k+l+1$ 番目の反射板検知までの列車速度は v_k で一定であるとして基準データを作成する。

3.2. 評価手順

M-CubITS を用いたシステムの位置・速度検知精度を以下の手順で評価する。

- ① 各走行での M-CubITS による列車位置と速度の推定演算回数を n 回とする。 $m(m=1\cdots n)$ 番目のフレームにおける列車位置と速度推定結果の時系列データの時刻, 列車位置, 列車速度を (t_m, x_m, v_m) とする。基準データと推定結果の誤差 $(\Delta x_m, \Delta v_m)$ を算定するため, (x_m, v_m) と (2), (3)式から求めた基準データ $(x(t_m), v(t_m))$ との差をとる。 $(\Delta x_m, \Delta v_m) = (x(t_m) - x_m, v(t_m) - v_m)$ とする。
- ② 位置検知誤差の+側へのずれの最大値を $\max \Delta_x(+)$, -側を $\max \Delta_x(-)$ として算定する。

3.3. 誤差要因

本実験の評価において基準データと M-CubITS による推定結果との間に生じる誤差の要因として考えるものをあげ, 結果生じると予想される誤差の大きさを

以下で算定する。

- ① 画像のブレによるマーカ位置（重心）の不整合
シャッター開放時間内に列車が走行することにより、結果として得られるマーカ画像にブレが生じる。シャッター速度を t_{sh} (msec)、列車速度を v_t (km/h)とすると、シャッター開放時間内に列車が走行する距離 x_{sh} は
- $$x_{sh} = t_{sh} * v_t / 3600 \text{ (m)} \quad (3)$$

で計算される。今回の実験ではシャッター速度は1/1000秒、列車速度は最大20km/hで行ったので最大で0.6cm程度の誤差が生じると考えられる。

- ② マーカ検出プログラムに起因する誤差
今回の実験ではフレームレート30[fps]の映像データをリアルタイム処理するため画像処理プログラムを簡素化し、マーカ探索と検出の際に3画素毎に処理を行っている。結果として実際の重心と3画素程度の不整合が生じる可能性がある。今回の CCD センサおよびマーカの設定条件では列車走行範囲の CCD センサの画素数 $H=720$ (pixel)、撮影範囲 $L=2.25$ m であるので1画素あたりの撮影範囲 l_{px} (cm)は

$$l_{px} = 100 * L / H = 0.31 \text{ (cm)} \quad (4)$$

重心計算で3画素分の不整合が生じた場合1.0cm程度の誤差が生じる可能性がある。

- ③ 画像処理時間に起因する誤差
CCDセンサによる撮影から画像処理が終了し列車位置推定の結果が出るまでに時間遅れ t_{cal} (msec)が発生する。列車走行速度 v_t (km/h)とすると、
 $x_{cal} = v_t * t_{cal} / 3600 \text{ (m)} \quad (5)$
の誤差が生じる。今回の実験で使用した PC (CPU: Core2Duo T7800 2.60GHz) での計算時間は11(msec)であった。ただし、この誤差は結果を画像フレームデータを取得した時間の列車位置として処理することでキャンセルしている。

- ④ 基準データに含まれる誤差
本実験においては基準データ作成用の反射板を50cm間隔で設置し、光電子センサとマイコンにより10msec間隔でサンプリングを行った。結果として反射板検知時刻には最大10msecの誤差が含まれる。20(km/h)での走行時には最大6cmの誤差が生じることになる。

- ⑤ 列車の縦揺れに起因する誤差
今回の実験では走行中に大きな縦揺れが発生することはなかった。仮に発生した場合でも CCD イメージセンサは列車進行方向に対してほぼ90°の向きに設置されており位置推定に与える影響はほとんどない。

これらの誤差要因を考慮すると M-CubiTS の位置推

定結果と基準データとの誤差は±7~8cm以内に収まると予想される。

3.4. 結果

実験走行は列車速度5km/h、20km/hを2回、10km/hを1回を1セットとし、昼、夕方で1セットずつ計10回の走行を行った。ただし、実験区間走行中の速度は一定ではなく運転者の扱い条件による加減速がみられる。図6に基準データから求めた実験区間内での走行速度の変化を示す。また、5km/h(夕方1回目)走行データと20km/h(昼2回目)の全フレームの誤差計算結果をヒストグラムにまとめたものを図7、図8に示す。

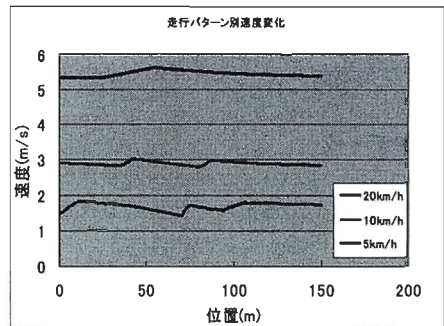


図6：実験区間走行中の速度変化

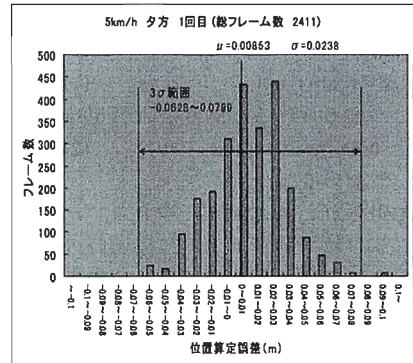


図7：位置推定誤差計算結果（5km/h 夕方）

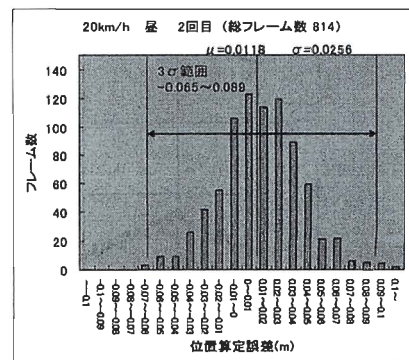


図8：位置推定誤差計算結果（20km/h 昼）

表 1：走行パターン別位置推定誤差最大値および走行時照度

	5km/h				20km/h				10km/h	
	昼		夕方		昼		夕方		昼	夕方
	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目		
max $\Delta_x(+)$ (m)	0.090	0.084	0.097	0.069	0.093	0.104	0.084	0.072	0.089	0.064
max $\Delta_x(-)$ (m)	-0.059	-0.071	-0.054	-0.055	-0.052	-0.063	-0.079	-0.052	-0.062	-0.054
床下照度 (lx)	2,600		776		2,260		110		670	110
周囲照度 (lx)	62,800		3,100		62,800		2,200		34,600	1,450

10 回の走行データの位置推定誤差の最大値と走行時の周囲および列車床下照度を表 1 に示す。これらの結果から位置推定誤差はほぼ $\pm 10\text{cm}$ の範囲内に収まっている事が分かる。

5km/h, 20km/h, 10km/h の 3 パターン以外に実験区間で停止するパターン走行実験を昼・夕方 1 回ずつ行った。停止前の速度変化の基準データは停止前 10 回分の反射板検知データから 2 次の最小二乗近似により作成した。

走行時の速度変化と位置推定誤差の最大値を図 9、表 2 に示す。

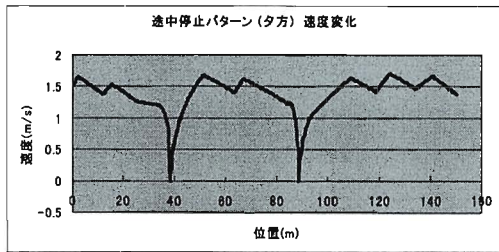


図 9：途中停止パターン速度変化

表 2：位置推定誤差最大値

	昼	夕方
max $\Delta_x(+)$ (m)	0.18	0.13
max $\Delta_x(-)$ (m)	-0.14	-0.10

表 1 の結果と比較して、やや誤差範囲が大きくなっている。誤差が大きくなったのは列車停止地点手前の最後の反射板を検知してから停止するまでの間である。50cm 間隔の反射板検知データを基に、列車が最後の反射板を検知してから何秒後に反射板から何 cm の位置に停止したかを精確に近似することは困難であるため基準データに含まれる誤差が大きくなったことが原因と考えられる。

4. 考察

実験結果より M-CubITS による列車位置検知精度は 20km/h までの速度で $\pm 20\text{cm}$ 以内に収まることが確認できた。今回の実験区間は 150m であったが M-CubITS

の位置推定には蓄積誤差がないため、設置区間を広げた場合でも $\pm 20\text{cm}$ で変化しない。誤差範囲を $\pm 7\sim 8\text{cm}$ と予想したが、M-CubITS マーカ素子と反射板の設置は人手による設置のため発生する誤差を考慮すると予想の範囲内の結果が得られたと言える。

明るさの影響については昼と夕方の測定で大きな差は見られなかった。装置を車両床下に設置したことで、直射日光が遮断され昼間でも安定した照明条件下での撮影が可能であったことによる。

速度の影響については 5km/h、10km/h、20km/h で顕著な差は見られなかった。3.3①の画像のブレによる誤差は 20km/h でも 0.6cm であり今回の結果には大きな影響がなかったためである。図 10、図 11 に今回の実験で使用したカメラの走行中のマーカ素子の撮影画像を示す。床下に取り付けたことにより昼間でもマーカ素子と周囲で十分なコントラストが得られていること、20km/h と 5km/h の速度の違いによるブレの大きさの違いが少ないことが確認できる。

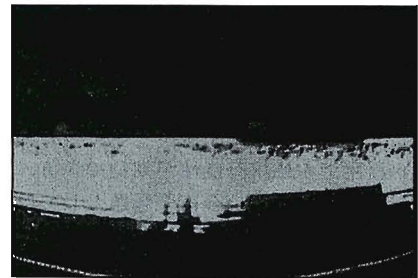


図 10：マーカ素子撮影画像 (20km/h 昼)



図 11：マーカ素子撮影画像 (5km/h 夕方)

より列車速度を大きくした場合、今回の実験と同一の撮影範囲とフレームレートの条件で位置検知が可能なのはサンプリングの定理から 110km/h の速度までである。その場合には画像のブレが 3cm まで大きくなる。より高速な走行に対応するためには撮影範囲を広くする、フレームレートを上げる、シャッター速度を速くするなど設定パラメータの変更を検討する必要がある。

また、今回の実験で反射板の検知漏れがあったように光による測定、検知では光の遮断による誤動作が懸念される。本方式で用いる CCD イメージセンサも光を検知するセンサであり、M-CubITS マーカ素子の汚れや遮蔽物により符号誤り、検知漏れが発生する恐れがある。符号誤り対策としては部分符号系列を読取る際に位置特定に必要な符号長よりも長い過去の符号データとの比較を行うことで訂正が可能である[3]。また、検知漏れ対策としては M-CubITS 素子の位置や間隔をデータベースとして持ち、検知結果と比較することで訂正を行うことができる [3]。

また、速度パルスをカウントする位置検知方式では誤差が累積していくため一定距離ごとにリセットが必要であったり、低速時には単位時間当たりのパルス数が少なくなるため速度検知精度が低下が起こるが、M-CubITS では各フレームごとに位置検知処理を行うため誤差の累積がなく、低速時の精度の低下も起こらない。こういった既存の装置とは異なる特徴により列車運転制御の効率化や安全運転支援などへの貢献が期待できる。

5. むすび

今回、鉄道環境の下で画像処理技術である M-CubITS による方法を使用して、明るさと車両速度の条件を変化させて位置検知精度を算定し、 $\pm 20\text{cm}$ を得た。実運用として、車両基地や駅ホームでの各編成に伴う定点停止場所での使用可能性が期待できる。安全運転支援の補助装置としての今後の課題としては、(1)高速運転 (2)天候条件による位置検知精度 (3) M-CubITS マーカ素子汚れ対策の機構検討などがあり、これらを検討実証していきたいと思っている。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、実験実施のご協力をいただいた秩父鉄道株式会社 広瀬川原車両基地の皆様 に心より感謝申し上げます。

文 献

- [1] ATACS システム評価委員会報告書,2005
- [2] 長谷川孝明, “ITS プラットフォーム“EUPITS”～実現へのアプローチ～,” 電子情報通信学会技術研究報告,ITS2002-120,2003
- [3] 金帝演, 長谷川孝明, “M-CubITS を用いた車両測定実験,” 電子情報通信学会論文誌 Vol.J89-A,2006