

2周波CW方式に基づく列車速度推定法と鉄道環境における基礎実験

秋田 学[†] 山下 遼[†] 稲葉敬之[†] 坪田 光[‡] 浅野 晃[‡]

[†] 電気通信大学大学院情報理工学研究科 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1

[‡] 株式会社京三製作所 〒230-0031 神奈川県横浜市鶴見区平安町2-29-1

E-mail: [†] akita.manabu@uec.ac.jp,

あらまし 本稿では、車輪の空転や滑走により誤差を生じない列車速度の測定法として、2周波CW方式に基づく推定法を提案し、レーダを列車に搭載した鉄道環境下における基礎実験結果について報告する。2周波CW方式に基づく三つの速度推定法は、GPSによる速度計測で課題となる上方に遮蔽物のある環境においても、他の区間と同等の観測精度で列車速度推定結果が得られることを実験的に示す。非線形最小二乗法（1変数）による速度推定結果は、レーダ設置高度の変化のない区間においては、三つの推定法のなかで最も推定速度の標準偏差が小さく、非線形最小二乗法（2変数）による速度推定結果は、GPS速度計とのバイアス誤差が小さいことを鉄道環境における基礎実験結果より示す。

キーワード レーダ, 2周波CW方式, 列車速度計

Estimations for Train Speed based on Two-Frequency CW and Initial Experiments on Railway Environments

Manabu AKITA[†] Ryo Yamashita[†] Takayuki INABA[†]

Hikaru TSUBOTA[‡] and Akira ASANO[‡]

[†] Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications 1-5-1 Chofugaoka,
Chofu, Tokyo 182-8585 Japan

[‡] Kyosan Electric Manufacturing Co., Ltd, 2-29-1 heiancho, Thurumi-ku, Yokohama, Kanagawa 230-0031 Japan

E-mail: [†] akita.manabu@uec.ac.jp

Abstract: Estimation methods based on 2FCW for the train speed, which are not affected by idling and slide of wheels, are presented. The initial experimental results on the railway environments are also shown. The proposed methods obtained stable estimation results even in the situation where there exists shielding objects. A nonlinear least square method with an unknown quantity had the smallest standard deviation in the environment where the height of ballast track bed was stable. A nonlinear least square method with two unknowns had the smallest bias errors between the estimation results and GPS speedometer.

Keywords: Radar, 2FCW, Train speedometer

1. まえがき

現在、列車の速度を計測する方法として、車軸の回転より速度を導出する方法が広く用いられているが、ブレーキ時の車輪の空転や滑走により誤差が生じ、また低速時に速度発電機の出力が十分得られない課題がある[1]。既存のシステムでは、ブレーキ力を弱めた非稼働軸に速度発電機を取り付けることなど、空転・滑走を防止する方法をとっているが、本質的な解決には至っていない[2]。これらの問題を解決するために車輪の空転や滑走に影響されない方法として、GPSを用いた速度計測や、CW(Continuous Wave)レーダを用いた速度計の開発が報告されている[1][3]。GPSを用いた速度計は、トンネルや高架等の遮蔽物がアンテナ上方

にある環境では、速度推定が行えない課題がある。また、鉄橋、建物、樹木等がGPSアンテナ周辺にある環境では、衛星からの電波が反射し、別の経路でGPSアンテナに届くマルチパスが発生し、計測に誤差を生む課題がある。CWレーダによる速度計測では、直接ドップラ周波数が計測可能であり、受信機は低サンプリング周波数のA/D変換器で構成される。CWレーダを用いた列車速度計測では、電波の照射範囲はアンテナのビーム幅に従い広がるため、地面からは電波の照射範囲の多数の反射点からの反射波が計測される。地面反射によるドップラ周波数は反射点の位置に依存するため、ビームの広がりや推定速度の誤差要因となりうる。そこでビーム幅を狭くすることが解決手段として

考えられるが、レーダのアンテナのサイズが大きくなるという課題がある。

上記の既存の列車速度計における課題に対処するために、本研究では、簡易なレーダ変調方式で測距・測速が可能な2周波CW方式[4]に基づく列車速度推定法を提案する。2周波CWレーダは、目標（ここでは地面における反射点）との相対速度に紐づけられた距離情報を得ることができ、これにより、各地面反射点を分離可能である。また、2周波CW方式は距離精度が周波数帯域幅でなくS/Nに依存する[5]ため、本研究のような近距離を観測対象としたレーダ方式として適合性に優れている。本稿では、地面の反射位置に依存するドップラ周波数の変化を反射点までの距離情報により補正する方法を提案し、レーダを列車に搭載した鉄道環境下における基礎実験結果について報告する。

2. 2周波CW方式に基づく速度推定

本章では、2周波CW方式に基づく三つの列車速度の推定法（うち一つは無変調CWレーダでも可能）について述べる。

2.1 レーダ照射角度（チルト角）のみによる速度補正

図1にレーダの設置条件の模式図を示す。レーダの設置高度を h 、レーダのチルト角を θ とする。レーダを地面に対して、図1のように傾けて照射すると、図2に示すようなドップラースペクトルが得られることが知られている[3]。地面からの反射により得られるレーダと反射点との相対速度を V_m 、1観測時間内(1CPI)で任意のしきい値を超える点数を M とすると、列車速度 V_g は、レーダの取付けチルト角で補正する簡易な方式を用いて式(1)より求められる。

$$V_g = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \frac{V_m}{\cos(\theta)} \quad (1)$$

式(1)は2周波CWレーダにて計測される速度・距離のうち、速度情報のみを用いる方法であり無変調CWレーダにおいても用いることができる。2.2節および2.3節で述べる推定法のような距離情報を用いていないため、誤差がS/Nに依存しない方法である。一方、本方式ではアンテナのビームの広がりに伴う地面反射点の位置に依存する速度の変化量は考慮していない。列車走行時における地面反射のドップラ周波数は、反射点の位置に依存するため、ビームの広がりが推定速度の誤差要因となりうる。また、レーダの取付け時の設置角度の誤差、加速時などにおいて車両がピッチングするときには、その原理上バイアス誤差が発生する。

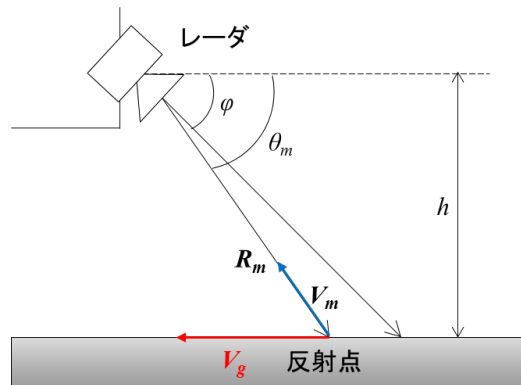


図1. レーダ設置角（チルト角）、計測される速度
距離および列車速度の関係

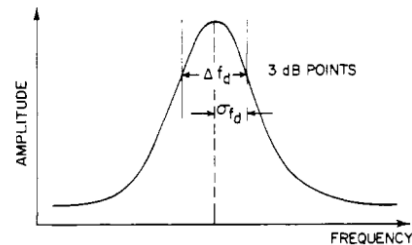


図2. 地面からの反射波のドップラースペクトル
(J. Mladek and J. Townsend, 1978)

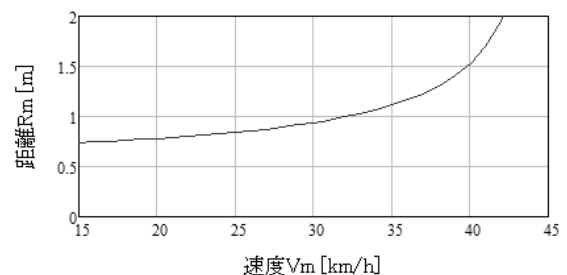


図3. 反射点までの距離と速度の関係
($h=0.7m, V_g=45km/h$)

2.2 推定距離を用いる非線形最小二乗法（1変数）による速度推定

前述の通り、2周波CW方式は測速・測距が可能な方式であり、速度分解能毎に対応する反射点までの距離情報が得られる。本研究ではこの速度に紐づけられた距離情報を用いて列車速度を推定することを考える。地面からの反射により導出されるレーダと反射点の相対速度を V_m 、これに紐づけられた距離を R_m 、距離 R_m より推定されるレーダから反射点までの角度を θ_m とする。 V_m 、 R_m 、 h 、 V_g を用いて三角関数の関係式(2)が得られる。式(3)に示す非線形最小二乗法（未知

数は V_g) より列車速度を求める．本研究では，エレベーション方向に広がる地面の反射点のみを考慮している．

$$\sin^2(\theta_m) + \cos^2(\theta_m) - 1 = \left(\frac{h}{R_m}\right)^2 + \left(\frac{V_m}{V_g}\right)^2 - 1 = 0 \quad (2)$$

$$V_g = \arg \min_{V_g} \left[\sum_{m=0}^{M-1} \left(\frac{h}{R_m}\right)^2 + \left(\frac{V_m}{V_g}\right)^2 - 1 \right] \quad (3)$$

2.3 推定距離を用いる非線形最小二乗法 (2 変数) による速度推定

2.2 節で示した非線形最小二乗法 (1 変数) では，チルト角のみによる速度補正において誤差要因となるエレベーション方向のビーム幅の広がりによる速度推定誤差の軽減，レーダの設置時の角度の誤差によるバイアス誤差，加速時などピッチング時のバイアス誤差の軽減が期待される方式である．レーダの設置高度 (地面からアンテナまでの高さ) が一定のとき，非線形最小二乗法 (1 変数) による速度推定は，チルトのみによる速度補正に比べて，上記の改善効果が期待される．一方で，列車が走行する軌道中で地面の高さが変化する場 (バラストの砂利の高さの違い，積雪の多い地域では積雪の深さの変化) には，式 (3) においてはレーダの設置高度を一定と仮定しているため，これが誤差の要因となりうる．そこで，式 (3) において，列車速度とレーダの設置高度の 2 変数を未知数とする非線形最小二乗法 (2 変数) を式 (4) に示す．

$$(V_g, h) = \arg \min_{V_g, h} \left[\sum_{m=0}^{M-1} \left(\frac{h}{R_m}\right)^2 + \left(\frac{V_m}{V_g}\right)^2 - 1 \right] \quad (4)$$

3. 実験結果と考察

3.1 レーダパラメータおよび期待性能

本章では，レーダを列車に搭載した鉄道環境下における列車速度推定の基礎実験結果について述べる．実験における 2 周波 CW レーダのパラメータおよび期待性能を表 1 に示す．アンテナの設置高は 0.835m とし，アンテナのビーム幅については，2 章で述べた速度推定法は，エレベーション方向のビーム幅の広がりによる速度の変化のみを考慮した方式であるため，アジマス方向のビーム幅をエレベーション方向のビーム幅よりも狭くとしている．2 周波の周波数差 Δf は，アンテナの設置高とビーム幅から想定される反射点までの距離から，周波数差による距離のアンビギュイティが発生せずかつ距離の精度を得るために $\Delta f = 75.0$ MHz を

表 1. 2 周波 CW レーダパラメータおよび期待性能

項目	仕様/期待性能
周波数 f_1	24.0900 GHz
周波数 f_2	24.1650 GHz
f_1, f_2 の周波数差 Δf	75.0 MHz
周波数切り替え間隔 T_{pri}	50 μ sec
アンテナ設置高 h	0.835m
アンテナビーム幅 (エレベーション)	± 7.5 deg
アンテナビーム幅 (アジマス)	± 3.0 deg
観測時間 T_{cpi}	307 msec
速度分解能 ΔV	0.073 km/h
速度視野 V_{max}	112.14 km/h
距離の観測精度	SN に依存
検出 S/N しきい値	36dB
距離視野 R_{max}	1.99 m
データレート	9.77 pt/sec

採用している．2 周波 CW 方式における距離の推定精度は S/N に依存するので [5]，信号処理利得を得るために，1CPI を 307ms としているが，102ms 毎に CPI のスライド処理を施しているため，データレートは 9.77Hz である [6]．

3.2 1CPI の各推定法による速度推定結果

二章で述べた三つの各推定法による 1CPI の速度推定を示す例として，図 4 のようなバラスト軌道上を走行時 (計測開始 212.5 秒後) において取得されるドップラースペクトルを図 5 に示す．図 5 中の破線は検出 S/N しきい値 (雑音レベルから 36dB 上) を示しており，この CPI ではドップラースペクトルにおいて 76 点が検出 S/N しきい値を超えて検出される．式 (1) よりチルト角のみによる速度補正からは，76 点の反射点までの相対速度の平均値をチルト角で補正することで列車速度， $V_g = 45.8$ [km/h] が推定される．検出 S/N しきい値を超えて検出される速度と紐付けられて周波数 f_1 と f_2 の位相差から得られるレーダと各反射点までの距離と相対速度の関係を図 6 に示す．図 6 中の破線は非線形最小二乗法 (1 変数) において評価式を最小とする V_g における式 (3) を表しており， $V_g = 47.1$ [km/h] が求められる．図 6 中の実線は非線形最小二乗法 (2 変数) において評価式を最小とする V_g と h における式 (4) を表しており，これより $V_g = 46.5$ [km/h]， $h = 0.83$ [m] となる．以下，同様の信号処理により計測開始から 390 秒間 (二駅区間) の解析結果を次節で示す．



図 4. 計測開始 212 秒後に通過したバラスト軌道 (本実験環境において一般的なバラスト条件)

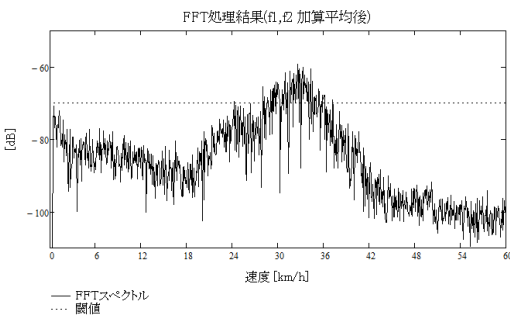


図 5. 計測開始 212.5 秒後におけるドップラースペクトル

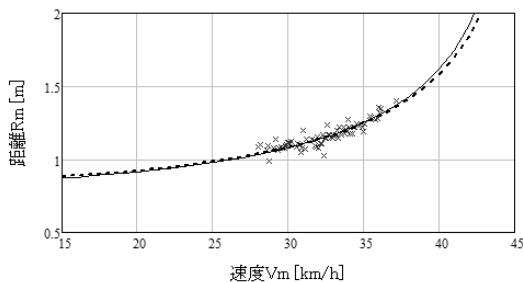


図 6. 検出される速度とそれに紐づけられた距離の関係 (×: 反射点までの距離と相対速度, 破線: 非線形最小二乗法 (1 変数), 実線: 非線形最小二乗法 (2 変数))

3.3 各推定法による列車速度推定結果

図 7 に、計測開始から 390 秒間の列車走行時における各推定法による列車速度推定結果を示す。ここでは、GPS 速度計による列車推定速度を列車速度の参照データとする。まえがきでもふれたように、GPS による速度計測では、高架等の障害物が GPS アンテナ上方にある環境において課題があるとされており、本実験では、時刻 106 秒～107 秒において列車が高架の下を通過している。同区間の拡大図を図 8 に示す。GPS 速度計のデータは時刻 106 秒～110 秒までの間、推定速度のばらつきが大きくなっているが、レーダを用いた三つの

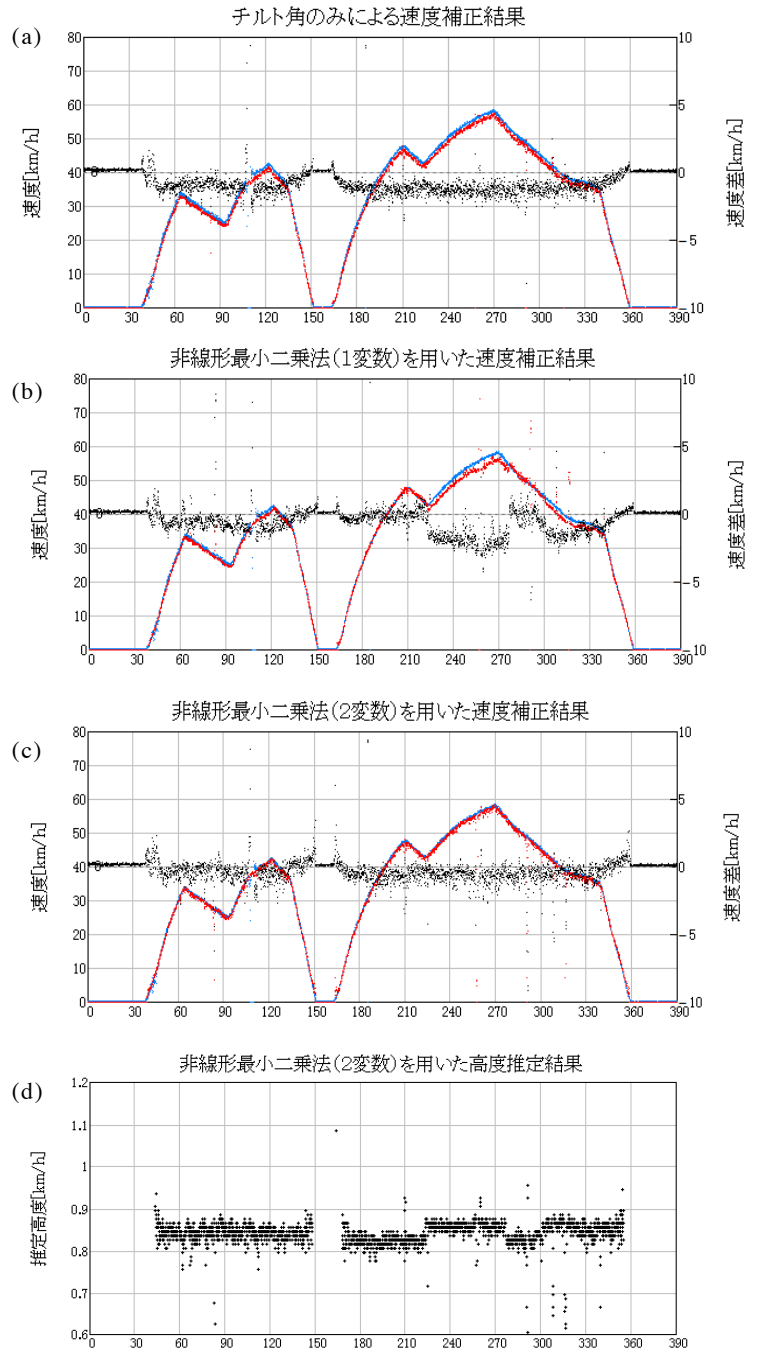


図 7. 各推定法による列車速度推定結果 ((a) チルト角のみによる速度補正結果, (b)非線形最小二乗法 (1 変数による速度推定結果, (c)非線形最小二乗法 (2 変数) による速度推定結果, (d)非線形最小二乗法 (2 変数) による高度推定結果)

推定法では、同区間においても他の区間と同等の観測精度で速度推定結果が得られている。チルト角のみによる速度補正結果には、全観測時間にわたり、とくに高速域において GPS 速度計と比較して 1km/h 程度低速側にバイアス誤差があることがわかる。チルト角のみによる速度補正は簡易な方式であり、S/N による観測精度の依存がない方式であるが、レーダの設置角度の

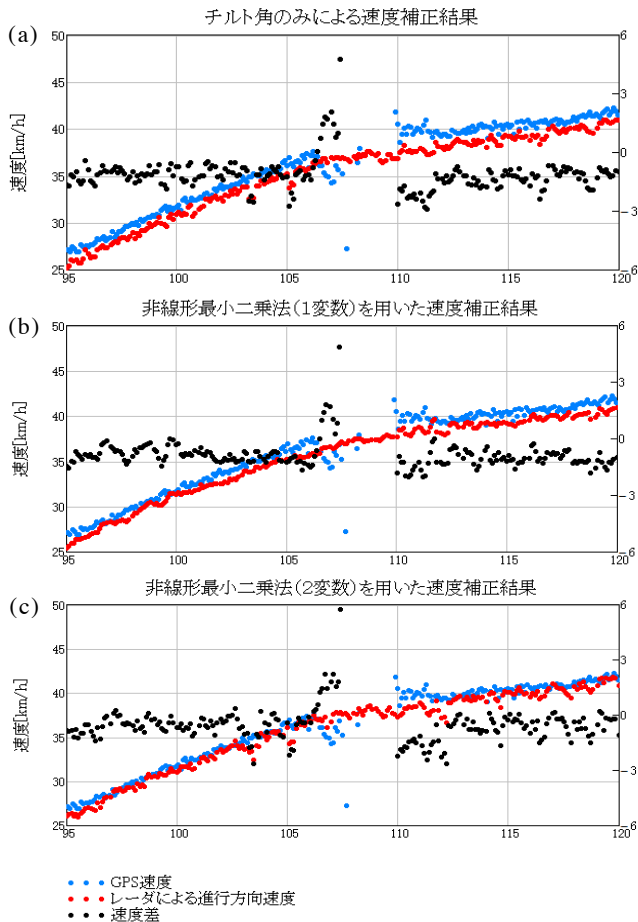


図 8. 時刻 95 秒～120 秒における各推定法による列車速度推定結果 ((a) チルト角のみによる速度補正結果, (b)非線形最小二乗法 (1 変数による速度推定結果, (c)非線形最小二乗法 (2 変数) による速度推定結果)

誤差と加速時などにおいて車両がピッチングするときバイアス誤差が生じる。本実験においてもこれがバイアス誤差の要因となっていることが考えられる。

非線形最小二乗法 (1 変数) による速度推定結果は楕円で示す区間 (時刻 225 秒～345 秒) を除くと、三つの推定法のなかで最も GPS 速度計との速度差のばらつきが小さいことがわかる。同法では、楕円で示す区間において、2km/h 程度の低速側にバイアス誤差が生じていることがわかる。同区間の拡大図を図 9 に示す。同法においてはレーダの設置高度 h を一定と仮定しているため、設置高度の変化 (すなわちアンテナとバラストまでの距離の変化) によりバイアス誤差が生じる。式 (2) および式 (3) よりレーダの設置高度が高くなるとき、低速側にバイアス誤差が生じると考えられる。

非線形最小二乗法 (2 変数) による速度推定結果は全観測時間にわたり、三つの速度推定法のなかで GPS 速度計とのバイアス誤差が小さいことがわかる。図

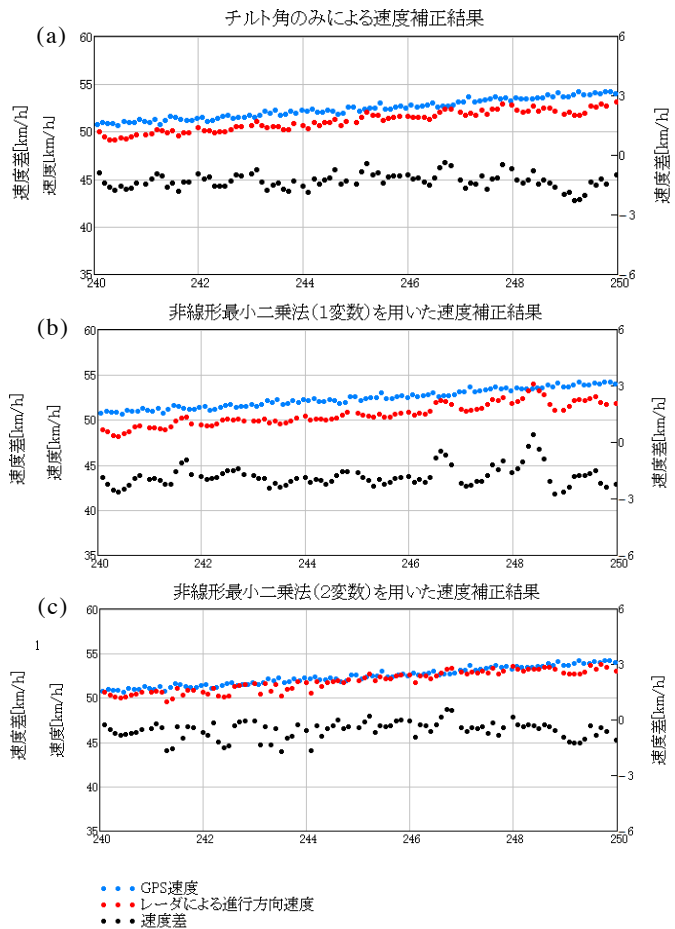


図 9. 時刻 240 秒～250 秒における各推定法による列車速度推定結果 ((a) チルト角のみによる速度補正結果, (b)非線形最小二乗法 (1 変数による速度推定結果, (c)非線形最小二乗法 (2 変数) による速度推定結果)



図 10. 計測開始 245 秒後に通過したバラスト軌道

7(d)より、非線形最小二乗法 (1 変数) による速度推定結果でとくに GPS 速度計とのバイアス誤差の大きい区間 (時刻 225 秒～345 秒) は、推定高度が約 4cm 他の区間よりも高く推定されており、設置高度の変化を含めて、列車速度が推定されており、GPS 速度計とのバイアス誤差が小さい結果が得られている。

以上より、定常的には非線形最小二乗法 (1 変数) による速度推定を用い、設置高度が変化する領域では非線形最小二乗 (2 変数) に切り替えるのが有効な手段の一つであると考えられる。また、S/N の低い場所

においては、チルト角のみによる速度補正と上記方式を組み合わせた方式が有効であると考えられる。

4. まとめ

本稿では、簡易なレーダ変調方式で測距・測速が可能な2周波CW方式に基づく列車速度推定法を提案し、レーダを列車に搭載した鉄道環境下における基礎実験結果について報告した。GPSによる速度計測で課題となる上方に遮蔽物のある環境においても、2周波CW方式に基づく三つの速度推定法（チルト角のみによる速度補正、非線形最小二乗法（1変数）による速度推定、非線形最小二乗法（2変数）による速度推定）で、同区間においても他の区間と同等の観測精度で速度推定結果が得られることを実験的に示した。

三つの速度推定法のうち、チルト角のみによる速度補正は、レーダの設置角度の誤差および車両のピッチングによりバイアス誤差が生じるが、検出した速度をチルト角で補正し平均する簡易な方式でGPS速度計と比較して全観測区間において1km/h以下の誤差で速度推定結果が得られている。非線形最小二乗法（1変数）による速度推定結果は、レーダ設置高度の変化のない区間においては、三つの推定法のなかで最も速度推定結果の標準偏差が小さい結果となった。非線形最小二乗法（2変数）による速度推定結果は、三つの速度推定法のなかでGPS速度計とのバイアス誤差が小さい結果となった。

これより、定常的には非線形最小二乗法（1変数）による速度推定を用い、設置高度が変化する領域では非線形最小二乗（2変数）に切り替えるのが有効な手段の一つであると考えられる。また、S/Nの低い場所においては、チルト角のみによる速度補正と上記方式を組み合わせた方式が有効であると考えられる。

文 献

- [1] 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, pp.13-22, 2008.
- [2] 福田光芳, 菅原宏之, 祇園昭宏, 小野雄人, 北野隆康, 白井稔人, 列車制御のための車上での高精度な位置検知手法の開発, 鉄道総研報告特集論文, 第27号, pp17-22, 2013
- [3] J. Mladek and J. Townsend, A Doppler Radar Velocity Meter for Agricultural Tractors, IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol.VT-27, no.1, pp.24-30, 1978
- [4] M.I. Skolnik, Introduction to Radar System, McGraw-Hill, New York, 1962.
- [5] 稲葉敬之, 多周波ステップ ICW レーダによる多目標分離法, 電子情報通信学会(B), vol.J89-B, No.3, pp.373-383, 2007.
- [6] 田村俊徳, 山下遼, 秋田学, 稲葉敬之, 坪田光, 浅野晃, 2周波CWレーダを用いた列車速度計の開発, B-2-32, 2014年電子情報通信学会総合大会, 2014.