

車載レーダ用目標追尾における半干渉形フィルタの基礎検討

瀬楽 瑞樹 秋田 学 小菅 義夫 稲葉 敬之

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

E-mail: mizuki.seraku@inabalab.ee.uec.ac.jp

あらまし 衝突被害軽減ブレーキの普及に伴い、ミリ波車載レーダが注目されている。そこで、筆者らは多周波ステップ CPC 方式を変調方式とする多周波ステップ CPC ミリ波レーダを開発している。さらに、多周波ステップ CPC ミリ波レーダの出力（距離、速度、角度）をもとに追尾フィルタを適用した先行車両追従実験について報告した。本稿では先行車両を追従する運動モデルに加え、新たに想定する目標車両が横切の場合の運動モデル、目標が静止している場合の運動モデルに対してシミュレーションを行い、座標系の違いによる追従性能と平滑性能比較、ならびにゲイン等の差異による追従性能と平滑性能比較評価を行う。

キーワード 車載レーダ, 多周波ステップ CPC ミリ波レーダ, 目標追尾

Basic Study of Semi-Coupled Filter for Target Tracking in Automotive Radar

Mizuki SERAKU Manabu AKITA Yoshio KOSUGE and Takayuki Inaba

Graduate school of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications

1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

E-mail: mizuki.seraku@inabalab.ee.uec.ac.jp

Abstract With the spread of the Collision Mitigation Brake System, millimeter-wave automotive radar has been attracting attention. Therefore, we have developed Millimeter wave radar using stepped multiple frequency CPC(Complimentary Phase code). And conducted a preceding vehicle tracking test with it that assumes the application to automotive radar, we have been the preceding vehicle tracking. In this paper, we simulate for the motion model of assuming the preceding vehicle, crossing vehicle and the stationary target. And we check tracking performance and smooth performance in a cartesian coordinate system and the polar coordinate system and the properties of the target tracking of semi-coupled filter.

Keywords automotive radar, stepped multiple frequency CPC, target tracking

1. まえがき

近年、ACC(Adaptive Cruise Control)や衝突被害軽減ブレーキ等のシステムが普及とともに注目を集めている。これらのシステムでは、高データレートにて逆光・夜間、雨天等の悪天候下においても目標の距離・速度・角度の計測の可能なセンサが要求される。これら要求を実現するセンサとしてミリ波車載レーダが有望視されている。そこで筆者らは、多目標環境下においても高い振幅アイソレーションと送信帯域幅に比べ狭受信機帯域幅で高距離分解能を達成可能な多周波ステップ CPC 方式[1][2]を変調方式とするリアルタイム多周波ステップ CPC ミリ波レーダを開発している[3]。さらに、車載レーダへの応用を想定した先行車両追従試験を実施し、市街地相当の環境において先行車両の追尾を実験的に検証した[4]。本稿では、先行車両を追従するという運動モデルに加え、新たに目標車両が横切の場合、目標が静止している場合という三種の運動モデルに対して、シミュレーションにより各種比較評価を行う。シミュレーションでは、まず目標追尾における座標系の比較検討を目的として直交座標系（干渉形）と極座標系（非干渉形）の予測値算出精度の評価を行い、続いて目標追尾フィルタのゲインまたは予測式が

異なる目標追尾-A, 目標追尾-B, 目標追尾-C に対する追従性能と平滑性能比較を行う。

2. 多周波ステップ CPC ミリ波レーダ

2.1. レーダパラメータ

多周波ステップ CPC ミリ波レーダのレーダパラメータを表 1 に示す。

表 1 レーダパラメータ

送信周波数	60.5GHz
パルス帯域幅	80MHz
パルス幅	0.2 μ sec(30m)
符号長	16
パルス繰返し間隔 (PRI)	3.5 μ sec
パルス数 M	512
周波数ステップ幅	50MHz
周波数ステップ数 N	8
(最大速度視野)	(\pm 79.64km/h)
送信帯域幅	430MHz
(距離分解能)	(0.35m)
観測時間	28.6msec
(速度分解能)	(0.311km/h)
A/D サンプリング周波数	160MHz
測角域	\pm 12deg 以内

2.2. 観測誤差の標準偏差のモデル

多周波ステップ CPC ミリ波レーダの観測誤差の標準偏差のモデルについて述べる。距離・角度の精度は信号対雑音比 S/N (Signal to Noise Ratio)の関数であるため距離および角度の標準偏差は S/N の関数となる。ここで、レーダ方程式より、 S/N は距離の関数であることから、距離・角度の観測誤差の標準偏差式(1)も距離の関数となる[5]。本稿では、 $(S/N)_{reg} = 30\text{dB}$ において、 $\sigma_{R,reg} = 0.8\text{m}$ 、 $\sigma_{\theta,reg} = 1.2\text{deg}$ を採用し、距離の観測誤差の標準偏差の最小値を 10cm 、角度の観測誤差の標準偏差の最小値を 0.3deg とした。距離と角度の観測誤差の標準偏差を図1に示す。一方、速度(ドップラ)の観測誤差の標準偏差 σ_V は距離によらず速度分解能の範囲内で一様分布であると考え、 $\sigma_V = 0.09\text{km/h}$ ($= 25 \times 10^{-3}\text{m/s}$)とした。

$$\sigma_R = \sigma_{R,reg} \frac{R^2}{R_{reg}^2} \quad \sigma_\theta = \sigma_{\theta,reg} \frac{R^2}{R_{reg}^2} \quad (1)$$

3. 運動モデル

シミュレーションを行う運動モデルについて述べる。目標として先行車両を想定した場合の運動モデル(先行車両モデル)、目標が横切りの場合の運動モデル(横切り車両モデル)、建造物等の目標が静止している場合の運動モデル(静止目標モデル)の3つの運動モデルに対しシミュレーションを行う。

3.1. 全運動モデルにおける共通条件

レーダ(レーダ搭載車両)と目標との相対距離、相対速度、相対角度の航跡(目標真値データ)に対し観測誤差を与え目標疑似データを作成する。与える観測誤差は標準偏差が2.2. 観測誤差の標準偏差のモデルに示す標準偏差に従うガウス分布とする。なお、レーダ搭載車両および目標はすべて等速直線運動をしており、疑似目標データは検出確率 $P_D = 1$ 、誤警報確率 $P_{FA} = 0$ とした。

3.2. 運動モデルの航跡

表2にレーダ搭載車両と目標の距離および速度を直角座標系で表した運動モデルの諸元を示す。直角座標系はレーダ搭載車両の進行方向を y 軸正の方向としている。また、目標真値データを図2に示す。図2より各運動モデルの特徴が確認できる。先行車両モデルは、速度および角度が時間によらず一定値をとるが、横切り車両モデル、静止目標モデルは、速度および角度に時間変化がある。近傍における航跡に着目するため、横切り車両モデルにおいては近距離にて目標真値データを作成している。目標真値データの角度範囲はレーダの測角域と同様である。

4. 目標追尾概要

目標追尾の概要を述べる。図3に処理ブロック図を示す。先行車両追尾[4]と同様の処理ブロックである。サンプリング時刻を $t_k = k \cdot T_c$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) (以降、時刻 t_k と呼ぶ)とし、観測値ベクトル \mathbf{X}_{ok} 、予測値ベクトル \mathbf{X}_{pk} 、平滑値ベクトル \mathbf{X}_{sk} を式(2)に定義する。ここで R, V, θ はそれぞれ距離、速度(レーダに接近する速度は正)、角度を表し、上付き文字 T はベクトルの

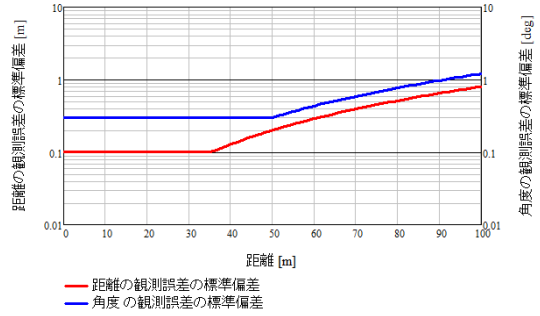


図1 距離と角度の観測誤差の標準偏差

表2 運動モデル諸元

	初期位置 [m]		速度 [km/h]	
	X軸方向	Y軸方向	X軸方向	Y軸方向
レーダ搭載車両	0	0	0	30
先行車両	0	100	0	20
横切り車両	7.4	35	15	0
静止目標	-5	100	0	0

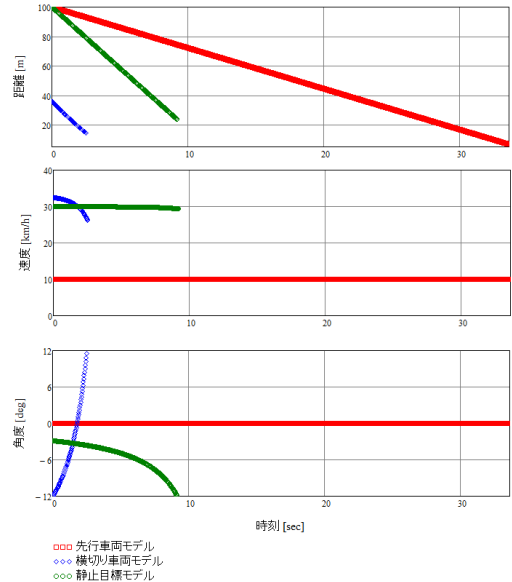


図2 目標真値データ

転置を表す。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{dk} &= [R_{dk} \quad V_{dk} \quad \theta_{dk}]^T \\ \mathbf{X}_{ok} &= [R_{ok} \quad V_{ok} \quad \theta_{ok}]^T \\ \mathbf{X}_{pk} &= [R_{pk} \quad V_{pk} \quad \theta_{pk}]^T \\ \mathbf{X}_{sk} &= [R_{sk} \quad V_{sk} \quad \theta_{sk}]^T \end{aligned} \quad (2)$$

4.1.1. フィルタ処理

フィルタの出力する速度を使用する α - β フィルタのようなフィルタとレーダにより観測される速度を使用する α フィルタが同程度の速度の平滑誤差の分散を得るために必要なサンプル数(CPI数)を比較し、図3の(vi)Updateに適用するフィルタを決定する。線形最小二乗フィルタ[6][7][8]の速度の平滑誤差の分散は、距離の観測誤差の分散を B とすると、式(3)より求まる。

$$P_k = \frac{B}{T_c^2} \cdot \frac{12}{k(k+1)(k+2)} \quad (3)$$

目標が 100m にいるとした場合の線形最小二乗フィル

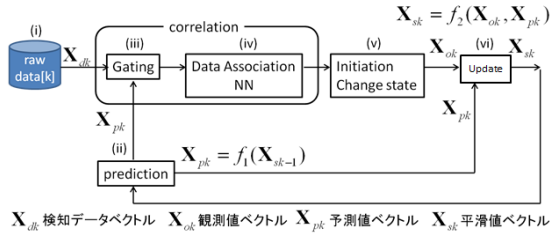


図 3 目標追尾ブロック図

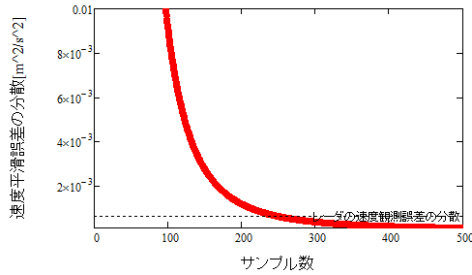


図 4 線形最小二乗フィルタの速度の平滑誤差の分散

タの速度の平滑誤差の分散を図 4 に示す。このとき、レーダの速度の観測誤差の分散と線形最小二乗フィルタの速度の平滑誤差の分散が同程度の値になるために必要とされるサンプル数は、245 回(7sec)となる。すなわち両フィルタが同程度の速度の平滑誤差の分散を得るためには、 α フィルタではサンプル数が 1 必要であることに對し、 α - β フィルタはサンプル数が 245 必要となる。車載レーダ用目標追尾においては、速度の早期収束が重要である。そのため、 α - β フィルタではなく、 α フィルタを適用する。

5. 直角座標系と極座標系の予測値算出精度の比較

予測値算出を行う座標系の検討を目的として、図 3 の(ii) prediction における直角座標系と極座標系の予測値の算出精度の比較をシミュレーションにより行う。

5.1. 直角座標系と極座標系の予測式

図 3 の(ii) prediction における直角座標系と極座標系の予測式を述べる。

5.1.1. 直角座標系における予測式

一般に航空管制に應用されている目標追尾は、運動の記述が行いやすいため、直角座標系が用いられる[9]。レーダが観測する極座標系の情報を式(4)により直交座標系へ変換後、式(5)に示す予測処理により予測値を算出する。ここで x , y , vx , vy はそれぞれ直角座標系における位置、直角座標系における速度を表す。

$$\begin{bmatrix} x_{ok} \\ y_{ok} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ok} \sin \theta_{ok} \\ R_{ok} \cos \theta_{ok} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} x_{pk+1} \\ y_{pk+1} \\ vx_{pk+1} \\ vy_{pk+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ok} \\ y_{ok} \\ x_{ok-1} \\ y_{ok-1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

極座標系との比較を行うため、式(6)により直角座標系を極座標系へ変換する。式(6)の予測式を直角系と呼ぶ。

表 3 予測誤差の比較

	距離		速度誤差		角度誤差	
	バイアス誤差	標準偏差	バイアス誤差	標準偏差	バイアス誤差	標準偏差
直角系	○	×	○	×	○	×
RV θ 系	○	○	×	○	×	○

また、直角系では速度の予測値に距離、角度の観測値が干渉しているため、直角系による目標追尾を干渉形と呼ぶ。

$$R_{pk+1} = \sqrt{x_{pk+1}^2 + y_{pk+1}^2}$$

$$V_{pk+1} = \frac{1}{R_{pk+1}} \begin{pmatrix} vx_{pk+1} & vy_{pk+1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{pk+1} \\ y_{pk+1} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\theta_{pk+1} = \arctan\left(\frac{x_{pk+1}}{y_{pk+1}}\right)$$

5.1.2. 極座標系における予測値

直角座標系に対し、レーダが観測する極座標系のまま目標追尾を行うときの予測式を述べる。多周波ステップ CPC ミリ波レーダの観測時間は 29msec とデータレートが高いため、サンプリング時刻 t_{k-1} から t_k の間は等速直線運動を行うと仮定すると極座標系における予測式は、式(7)のようになる。式(7)の予測式を RV θ 系と呼ぶ。また、RV θ 系は距離の予測値に速度の観測値が干渉しているため、RV θ 系による目標追尾を半干渉形と呼ぶ。

$$\begin{bmatrix} R_{pk+1} \\ V_{pk+1} \\ \theta_{pk+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{ok} \\ V_{ok} \\ \theta_{ok} \end{bmatrix} \quad (7)$$

5.2. 予測値算出精度の比較

予測値を直角系、RV θ 系の予測式により求め、それらの予測値算出精度を比較する。予測値と目標真値データとの差を予測誤差とし、予測式の予測誤差を比較する。予測式毎に想定する各運動モデルに対し、50 回シミュレーションを行い求めた予測誤差の平均値・標準偏差を比較する。図 5、図 6、図 7 にそれぞれ先行車両モデル、横切り車両モデル、静止目標モデルの予測誤差の平均値・標準偏差を示す。バイアス誤差は図 5、図 7 においては確認できなかったが、図 6 の RV θ 系の速度、角度予測誤差において確認された。一方、標準偏差の広がり比較結果は図 5、図 6、図 7 で共通している。比較結果をまとめたものを表 3 に示す。直角系の予測式は追従性能が高く、平滑性能が低いことが確認できる。一方、RV θ 系の予測式は距離の追従性能と平滑性能、速度、角度の平滑性能が高いことが確認できる。また、両予測式を比較すると、速度の平滑性能においては特に RV θ 系の予測式が優れていることが確認できる。

6. 半干渉系フィルタの予測値算出精度の比較

速度の平滑性能の高い半干渉形における目標追尾の基本特性確認を目的とし、予測値算出精度の比較をシミュレーションにより行う。

6.1. 半干渉系フィルタの予測値算出

目標追尾-A、目標追尾-B、目標追尾-C について述べる。それぞれの目標追尾は全て図 3 のブロック図に従うが、(ii) prediction における予測式、(vi) Update にお

けるゲインは異なる。それぞれは、式(8)または式(9)により予測値を算出し、式(10)により平滑値を算出する。式(8)は半干渉形のRVθ系による予測式であり、式(9)は、速度、角度が等加速度、等角速度で変化することを想定し、式(8)の速度、角度の予測式に外挿を加えた予測式である。式(9)の予測式をRVθ系-速度・角度外挿と呼ぶ。表4に3種の目標追尾の予測式とゲインを示す。それぞれの目標追尾は以下の特性となることが想定される。目標追尾-Aは、距離の追従性能が高い目標追尾であると想定される。それに対し、目標追尾-Bは目標追尾-Aに比べ平滑性能は高いが追従性能は低い目標追尾であり、目標追尾-Cは目標追尾-Aに比べ速度、角度の追従性能は高く平滑性能は低い目標追尾であることが想定される。

$$\begin{bmatrix} R_{pk+1} \\ V_{pk+1} \\ \theta_{pk+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{sk} \\ V_{sk} \\ \theta_{sk} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} R_{pk+1} \\ V_{pk+1} \\ \theta_{pk+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{sk} \\ V_{sk} \\ \theta_{sk} \\ V_{sk-1} \\ \theta_{sk-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} R_{sk} \\ V_{sk} \\ \theta_{sk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{pk} + \alpha_R(R_{ok} - R_{pk}) \\ V_{pk} + \alpha_V(V_{ok} - V_{pk}) \\ \theta_{pk} + \alpha_\theta(\theta_{ok} - \theta_{pk}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

6.2. 干渉系フィルタの予測誤差の比較

図2の処理ブロック全体を通す半干渉系フィルタの目標追尾シミュレーションを行う。なお、図3の(iii)Gatingにおけるゲート幅を十分に広げ、必ず目標がゲート内に収まる状況下でシミュレーションを行う。目標追尾-A、目標追尾-B、目標追尾-Cの目標追尾の予測出力誤差を比較する。目標追尾毎に想定する各運動モデルに対し、50回シミュレーションを行い求めた予測誤差の平均値・標準偏差を比較する。図8、図9、図10にそれぞれ先行車両、横切り車両、静止目標の予測誤差を示す。バイアス誤差は図8、図10においては、距離、速度、角度ともに確認できなかったが、図9における目標追尾-A、目標追尾-Bの速度予測誤差、角度予測誤差においては確認された。なお、目標追尾-Aのバイアス誤差に比べ目標追尾-Bのバイアス誤差の方が大きな値をとっている。一方、標準偏差の広がりとの比較結果は図8、図9、図10で共通している。比較結果をまとめたものを表5に示す。目標追尾-Aは距離の追従性能が高く、速度、角度の追従性能、平滑性能は他の目標追尾と比較すると平均的な目標追尾であり、目標追尾-Bは最も追従性能は低い平滑性能は高いという特性を持つ目標追尾、目標追尾-Cは最も追従性能が高いが最も平滑性能が低いという特性を持つ目標追尾であることを確認した。すなわち、角度および速度の時間変化のない先行車両の追尾には、目標追尾-Bが適しているが、角度および速度の時間変化が大きい横切り車両追尾には目標追尾-C、横切り車両に比べ角度および速度の時間変化の小さい静止目標追尾には目標追尾-Aが適していることを確認した。

表4 目標追尾予測式とゲイン

	予測値算出式	距離ゲイン α_R	速度ゲイン α_V	角度ゲイン α_θ
目標追尾-A	RVθ系	1	1	1
目標追尾-B	RVθ系	0.5	0.5	0.5
目標追尾-C	RVθ系-速度・角度外挿	1	1	1

表5 各目標追尾における予測誤差の比較

	距離誤差		速度誤差		角度誤差	
	バイアス誤差	標準偏差	バイアス誤差	標準偏差	バイアス誤差	標準偏差
目標追尾-A	○	×	△	△	△	△
目標追尾-B	○	○	×	○	×	○
目標追尾-C	○	×	○	×	○	×

7. むすび

本稿では、多周波ステップCPCミリ波レーダを車載レーダとして運用する際の目標追尾の基礎検討として、先行車両モデル、横切り車両モデル、静止目標モデルに対するシミュレーションを行った。予測誤差比較により、半干渉形のRVθ系の予測式は速度の平滑性能に優れることを確認した。また、干渉系フィルタの予測誤差の比較より、目標追尾-Aは距離の追従性能が高い目標追尾であり、目標追尾-Bは最も追従性能は低い平滑性能は高い目標追尾、目標追尾-Cは最も追従性能が高いが最も平滑性能が低い目標追尾であることを確認した。すなわち先行車両の目標追尾には、目標追尾-Bが適しているが、横切り車両追尾には目標追尾-C、静止目標追尾には目標追尾-Aが適していることを確認した。複数目標追尾をする場合、他の目標との干渉を避けるため、ゲート処理が重要となる。このゲート中心は予測値、ゲートの広がりには予測のランダム誤差の大きさにより算出するのが一般的である。ところで、ゲートは狭い方が他の目標との干渉が避けられる。しかし、追尾にバイアス誤差がある場合、ゲートが狭いと、追尾の維持が困難となる。ところで、本発表でも示したように、バイアス誤差を小さくする追尾法は、ランダム誤差を大きくする。このため、本発表の基礎検討に基づき、狭い範囲に多数の目標が存在する車載レーダにおけるゲート処理の確立が今後の重要課題である。

謝辞

本稿に示す研究内容は、総務省の委託研究「電波資源拡大のための研究開発（狭帯域・遠近両用高分解能小型レーダ技術の研究開発）」により実施されたものである。

文献

- [1] 木島壮氏, 稲葉敬之, “ミリ波車載レーダへの適用したHybrid-CFS”, 信学総大, B-2-21, 2009-03
- [2] 坪田光, 稲葉敬之, “多周波ステップCPCレーダ方式の実験的検証”, 信学総大, B-2-36, 2010-03
- [3] Masato Watanabe, Takayuki Inaba, Hikaru Tsubota, Takahiro Yano, “Development of Millimeter wave Radar using Stepped Multiple Frequency Complementary Phase Code modulation”, ICSANE2011-81, Oct.2011.
- [4] 深町弘毅, 渡辺優人, 稲葉敬之, 小菅義夫, “車載レーダにおけるNNアソシエーションを適用した先行車両追尾”, 電子情報通信学会, 信学技報, vol.112, No.391, pp.37-42, Jan, 2012
- [5] 松崎貴史, 系正義, 小菅義夫, “PDA追尾における目標消滅判定法”, 電子情報通信学会論文誌(B), vol.J86-B No.3, pp.536-551, Mar. 2003
- [6] 小菅義夫, “レーダによる単一目標追尾法の現状と将

来”，電子情報通信学会論文誌(B)，vol.J93-B No.11,pp.1504-1511, Nov. 2010.

- [7] A.M.Navarro, “General properties of alpha beta, and alpha beta gamma tracking filters,” PHL19977-02, Jan.1977.
- [8] 小菅義夫, 亀田洋志 “ α - β フィルタを使用したレーダ

追尾における最適ゲイン”，電子情報通信学会論文誌(A)，vol.J82-A No.3,pp.351-364, Mar. 1999.

- [9] 緒方雅俊, 小菅義夫, 松波勲, “位置及び速度観測値を使用した航空機追尾過渡応答用カルマンフィルタ”，信学技報, vol.111, No.407, pp.37-42, Jan, 2011

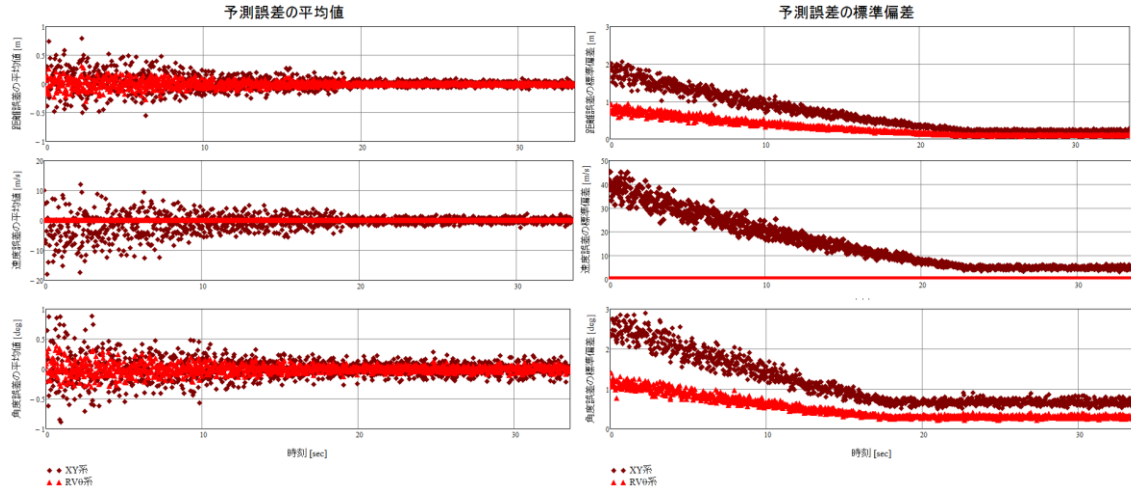


図 5 先行車両に対する予測誤差比較

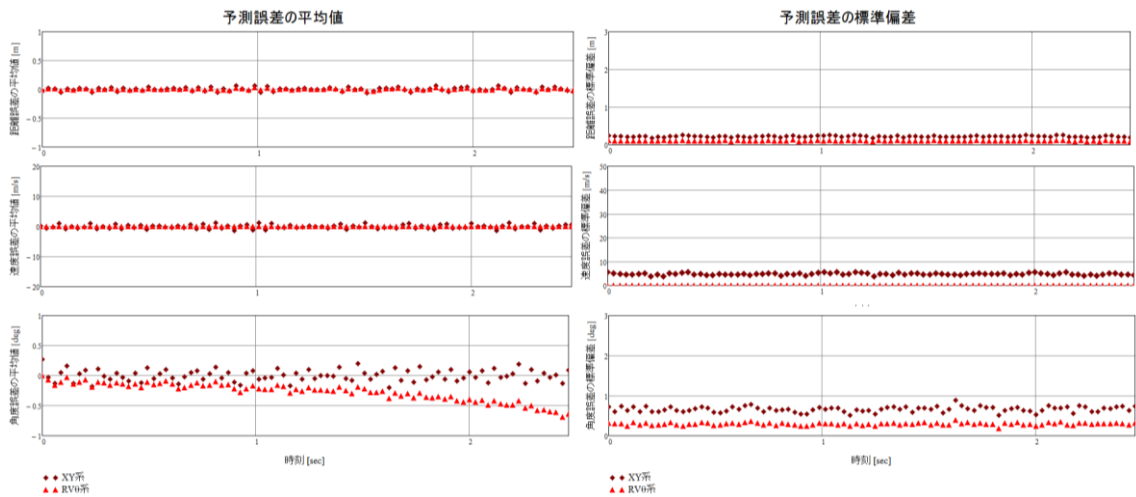


図 6 横切り車両に対する予測誤差比較

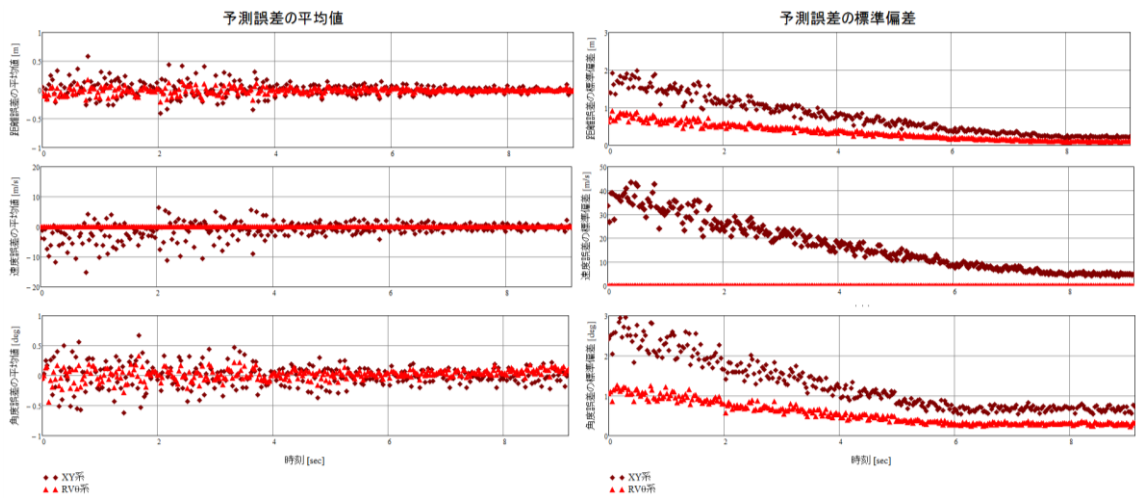


図 7 静止目標に対する予測誤差比較

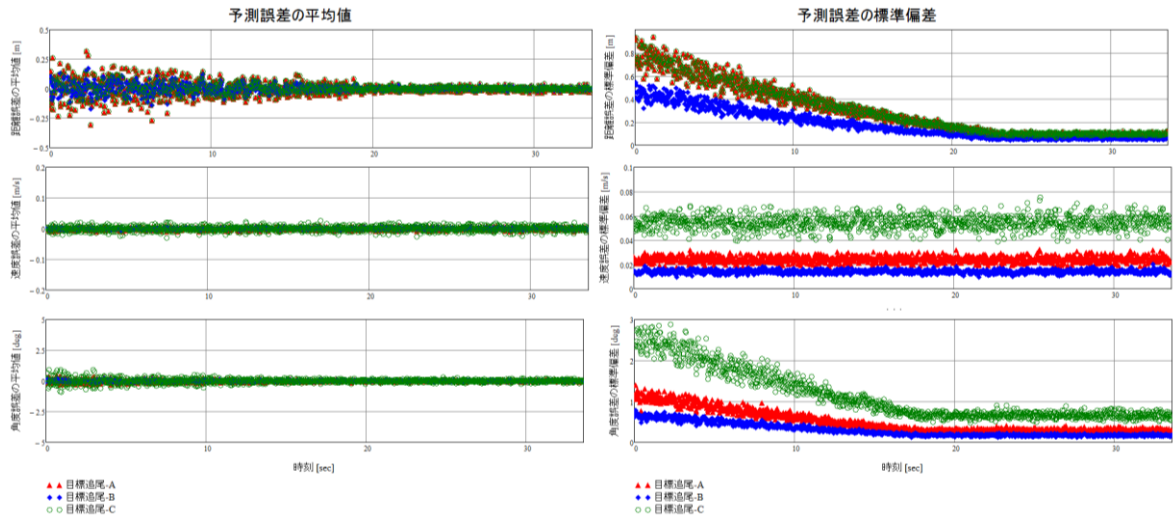


図 8 先行車両に対する目標追尾出力誤差

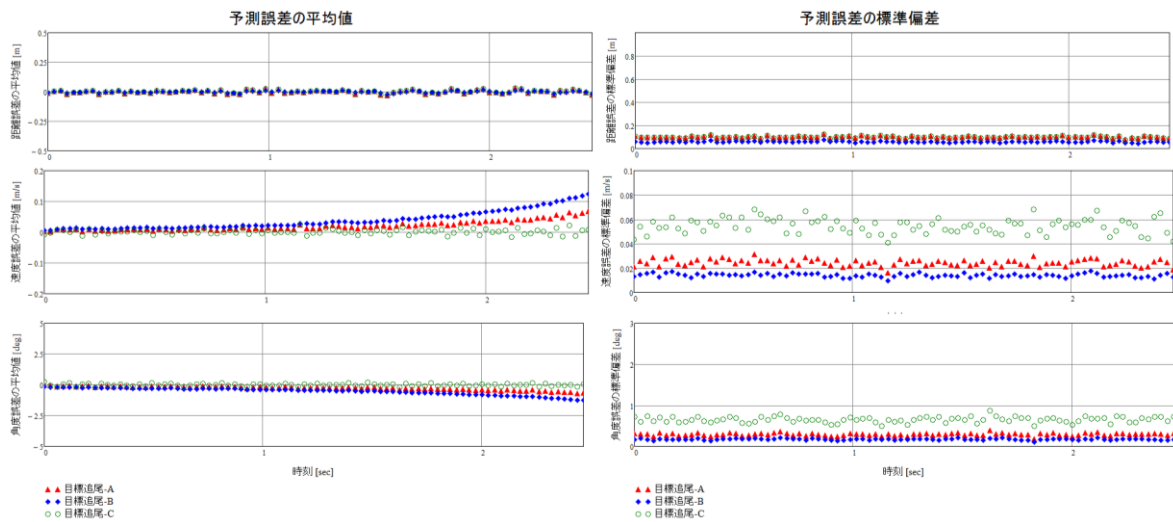


図 9 横切り車両に対する目標追尾出力誤差

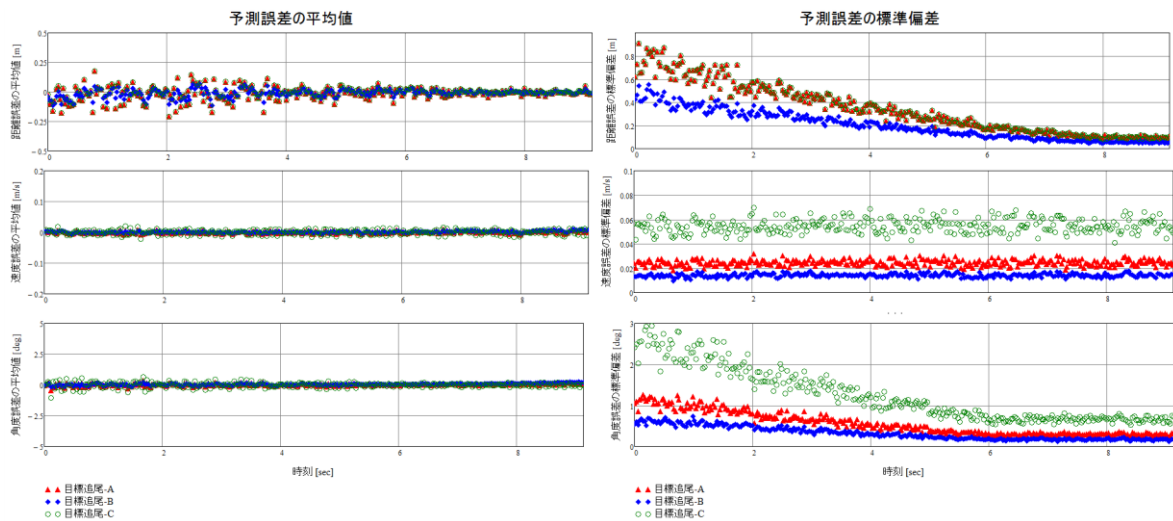


図 10 静止目標に対する目標追尾出力誤差