

# 車載レーダ用追尾における複数フィルタの同時実行法 ～シミュレーションによる性能評価～

角田 智広<sup>†</sup> 藤村 嘉一<sup>†</sup> 秋田 学<sup>†</sup> 小菅 義夫<sup>†</sup> 稲葉 敬之<sup>†</sup>

<sup>†</sup>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: kakuta.tomohiro@inabalab.ee.uec.ac.jp

**あらまし** 筆者らは、高距離分解能と遠距離性が両立する変復調方式として多周波ステップ CPC(Complimentary Phase Code)方式を採用したミリ波レーダを開発している。これまでに、上記ミリ波レーダから得られる距離、ドップラ、角度が紐づけされた検知データを使用した追尾法として、極座標系を用いた三種の追尾フィルタの同時実行方式を提案した。しかし、その定量的な評価がなされていなかった。本稿では、複数の運動モデルに対して、提案法を適用したモンテカルロシミュレーションによる定量評価を実施し、その結果を報告する。

**キーワード** 車載レーダ、多周波ステップ CPC 方式、目標追尾

## A method of tracking with multiple filters in an automotive millimeter-wave radar ～An evaluation by simulation～

Tomohiro KAKUTA<sup>†</sup> Kaichi FUJIMURA<sup>†</sup> Manabu AKITA<sup>†</sup> Yoshio KOSUGE<sup>†</sup> and Takayuki INABA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate school of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications

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

E-mail: kakuta.tomohiro@inabalab.ee.uec.ac.jp

**Abstract** We have been developing millimeter-wave radar that adopts a multi-frequency step CPC (Complimentary Phase Code) method with high range resolution ability and long range detection capability. We have reported a tracking method with multiple filters in an automotive millimeter-wave radar which uses polar coordinate systems. However, we have not given a quantitative estimation of this method for some motion models. In this paper, we present results of an evaluation of this method by Monte Carlo simulation.

**Keywords** automotive radar, stepped multiple frequency CPC, target tracking

### 1. まえがき

近年、自動車の安全運転支援のためのセンサとして車載ミリ波レーダが注目されている。筆者らは、狭受信機帯域幅で高分解能を実現する独自の変復調方式である多周波ステップ CPC(Complementary Phase Code)方式[1]を用いたミリ波レーダを開発している[2]。上記ミリ波レーダから得られる距離、ドップラ、角度が紐づけされた検知データを用いた追尾法として、極座標系を用いた三種の追尾フィルタが提案され、それらの追尾性能の比較検討が行われた[3][4]。その結果、検討された全てのフィルタについて平滑性能と追従性能を同時に満たすことは困難であることが報告されている。以上の背景より、上記の相反する性能を満たすための新たな追尾法として、三種の追尾フィルタの同時実行方式を提案し、動作確認を行った[5]。しかし、その定量的な評価がなされていなかった。本稿では、

代表的な四種の運動モデル(先行車両を追従する場合、目標車両が横切の場合、目標車両とすれ違う場合、目標が静止している場合)に対して、提案法を適用したモンテカルロシミュレーションによる定量評価を実施し、その結果を報告する。

#### 1.1. 多周波ステップ CPC ミリ波レーダ

図 1.1 に、多周波ステップ CPC 方式を変調方式とするミリ波レーダの信号処理ブロック図を示す。また、表 1.1 に、レーダパラメータおよび本レーダの期待性能を示す。

#### 1.2. 従来追尾法

図 1.2 に、本レーダ装置に対する従来追尾法のブロック図を示す。また、表 1.2 に従来追尾法である追尾フィルタ-A,B,Cにおける差異を示す[4]。

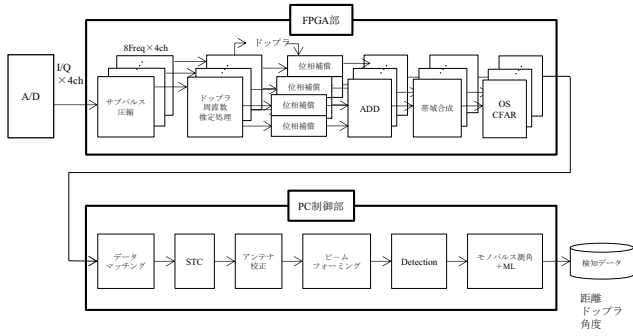


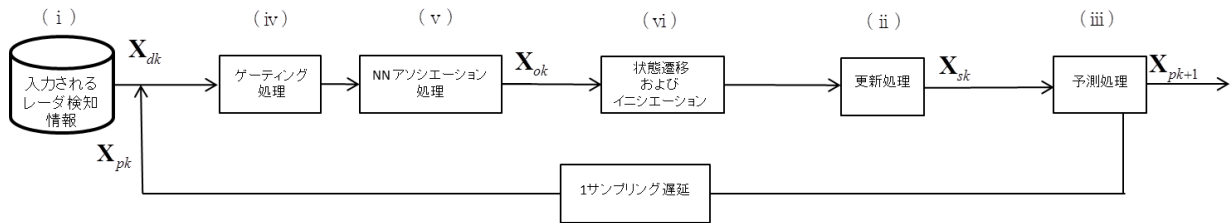
図 1.1. 信号処理ブロック図

表 1.1. レーダパラメータおよび期待性能

送信周波数	60.5GHz
パルス帯域幅	80MHz
パルス幅	0.2μs(30m)
符号長	16
パルス繰返し間隔 (PRI)	3.5μs
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
送信帯域幅	430MHz
観測時間	28.6ms
A/D サンプル周波数	160MHz
距離分解能	0.35m
測角域	± 12deg
最大速度視野	±79.64km/h (±22.12m/s)
速度分解能	0.311km/h (0.0863m/s)

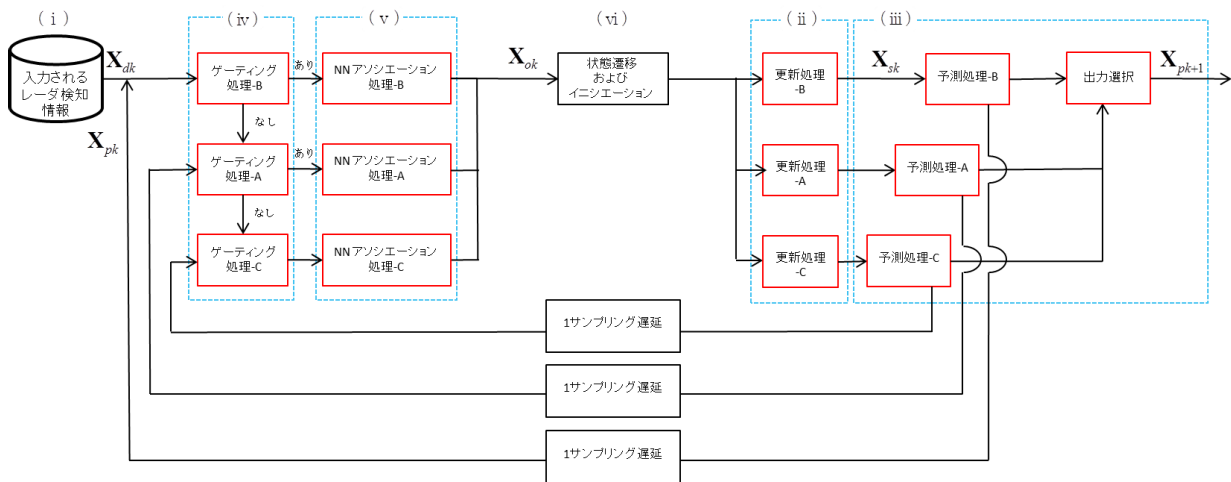
表 1.2. 追尾フィルタ-A,B,C における差異

	距離追尾誤差		ドップラ追尾誤差		角度追尾誤差		特徴
	バイアス誤差	ランダム誤差	バイアス誤差	ランダム誤差	バイアス誤差	ランダム誤差	
追尾フィルタ-A	○	△	△	○	△	○	
追尾フィルタ-B	○	◎	×	◎	×	◎	平滑性能: 優
追尾フィルタ-C	○	△	○	△	○	△	追従性能: 優



$X_{dk}$  検知データベクトル  $X_{ok}$  観測値ベクトル  $X_{pk}$  予測値ベクトル  $X_{sk}$  平滑値ベクトル

図 1.2. 従来法ブロック図



$X_{dk}$  検知データベクトル  $X_{ok}$  観測値ベクトル  $X_{pk}$  予測値ベクトル  $X_{sk}$  平滑値ベクトル

図 2.1. 提案法ブロック図

## 2. 同時実行法

追尾フィルタ-A, B, C のうち 1 個の追尾フィルタでは, 平滑性能と追従性能の相反する追尾性能を同時に満たすことが困難であることが明らかとなった. そのため, 追尾フィルタ-A, B, C の同時実行方式 (以下, 同時実行法) が提案されている [5]. 図 2.1 に, 同時実行法のブロック図を示す. なお, この提案法は次の 2.1 及び 2.2 で示す特徴を有する.

### 2.1. 平滑性能と追従性能の確保

図 2.2 に示すように, 追尾フィルタ-A はドップラ, 角度を一定とし, 現在時刻の検知データをそのまま出力値としている. また, 追尾フィルタ-B では平滑性能を高めるため, 現在時刻と過去時刻の検知データの間接値を出力値としている. 一方, 追尾フィルタ-C は追従性能を高めるため, 現在時刻と過去時刻の検知データの延長線上の値を予測値としている.

実際, 最も平滑性能が高いのはランダム誤差が小さい追尾フィルタ-B である. また, 最も追従性能が高いのはバイアス誤差が小さい追尾フィルタ-C である.

本提案の追尾フィルタ同時実行法は, 平滑性能の高い追尾フィルタのゲート内の検知データを優先して使用する. しかしながら, 平滑性能の高い追尾フィルタはゲートが小さい. そのうえ, ドップラ, 角度変化が大きい目標に対しては, バイアス誤差が大きく追尾を外しやすい. そのため, 平滑性能の高い追尾フィルタのゲート内に検知データが存在しない場合は, 追従性能の高い追尾フィルタのゲート内の検知データを使用して追尾を行う.

### 2.2. 同一航跡の確保

従来法である追尾フィルタ-A, B, C が各々独立に実行する方式では, 追尾フィルタごとに異なるゲート中心をとる. そのため, 図 2.3 に示すように, 各追尾フィルタは異なる検知データを選択し, 異なる航跡 (検知データの時系列データ) を作成する恐れがある. 提案法では, 異なる航跡の作成を防ぐため, 追尾フィルタ-A, B, C は各サンプリング時刻で同一の検知データを使用する.

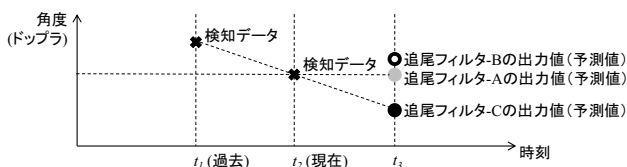


図 2.2. 追尾フィルタの出力値の関係



図 2.3. 追尾フィルタのゲートの関係

## 3. シミュレーションによる性能評価

図 1.2 または図 2.1 の処理ブロック全体を通すシミュレーションを行う. なお, 図 1.2 または図 2.1 の (iv) ゲーティング処理では, 目標がゲート内に収まる確率を 99.999% として, シミュレーションを行う. 追尾フィルタ-A, 追尾フィルタ-B, 追尾フィルタ-C, 同時実行法の目標追尾の予測誤差 (出力値と真値との差) 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.

### 3.1. 先行車両

表 3.1 に本シミュレーションの目標条件, 図 3.1.1 に先行車両モデルと真値を示す.

図 3.1.2 に予測誤差の標準偏差を示す. また, 図 3.1.3 に予測誤差の平均値を示す. 図 3.1.2 に示す予測誤差の標準偏差から, ランダム誤差は追尾フィルタ-B, 追尾フィルタ-A, 追尾フィルタ-C の順で小さい値を取ることを確認した. また, 同時実行法は, 追尾フィルタ-B と同等の平滑性能が確保できることを確認した. 一方, 図 3.1.3 に示す予測誤差の平均値から, バイアス誤差は追尾フィルタ-C, 追尾フィルタ-A, 追尾フィルタ-B の順で小さい値を取ることを確認した. 本条件では, 追尾フィルタ-A, 追尾フィルタ-B, 追尾フィルタ-C, 同時実行法について, 追尾維持が可能であることを確認した.

以上のことから, 同時実行法は, 追尾フィルタ-B で追尾維持が可能な場合, 追尾フィルタ-B と同等の平滑性能が確保できることが確認された.

### 3.2. 静止目標

表 3.2 に本シミュレーションの目標条件, 図 3.2.1 に静止目標モデルと真値を示す.

図 3.2.2 に予測誤差の標準偏差を示す. また, 図 3.2.3 に予測誤差の平均値を示す. 図 3.2.2 に示す予測誤差の標準偏差から, ランダム誤差は追尾フィルタ-B, 追尾フィルタ-A, 追尾フィルタ-C の順で小さい値を取ることを確認した. また, 同時実行法は, 追尾フィルタ-B と同等の平滑性能が確保できることを確認した. 一方, 図 3.2.3 に示す予測誤差の平均値から, バイアス誤差は追尾フィルタ-C, 追尾フィルタ-A, 追尾フィルタ-B の順で小さい値を取ることを確認した. 本条件では, 追尾フィルタ-A, 追尾フィルタ-B, 追尾フィルタ-C, 同時実行法について, 追尾維持が可能であることを確認した.

以上のことから, 同時実行法は, 追尾フィルタ-B で追尾維持が可能な場合, 追尾フィルタ-B と同等の平滑性能が確保できることが確認された.

### 3.3. 対向車両

表 3.3 に本シミュレーションの目標条件, 図 3.3.1 に対向車両モデルと真値を示す.

図 3.3.2 に予測誤差の標準偏差を示す. また, 図 3.3.3 に予測誤差の平均値を示す. 図 3.3.2 に示す予測誤差の標準偏差から, ランダム誤差は追尾フィルタ-B, 追尾フィルタ-A, 追尾フィルタ-C の順で小さい値を取ることを確認した. また, 同時実行法は, 追尾フィルタ-B と同等の平滑性能が確保できることを確認した. 一方, 図 3.3.3 に示す予測誤差の平均値から, バイアス誤差は追尾フィルタ-C, 追尾フィルタ-A, 追尾フィルタ-B の順で小さい値を取ることを確認した. 本条件では, 追尾フィルタ-A, 追尾フィルタ-B, 追尾フィルタ-C, 同時実行法について, 追尾維持が可能であることを確認した.

以上のことから, 同時実行法は, 追尾フィルタ-B で追尾維持が可能な場合, 追尾フィルタ-B と同等の平滑性能が確保できることが確認された.

### 3.4. 横切り車両

表 3.4 に本シミュレーションの目標条件, 図 3.4.1 に横切り車両モデルと真値を示す.

図 3.4.2 に予測誤差の標準偏差を示す. また, 図 3.4.3 に予測誤差の平均値を示す. 図 3.4.2 に示す予測誤差の標準偏差から, ランダム誤差は追尾フィルタ-B, 追尾フィルタ-A, 追尾フィルタ-C の順で小さい値を取ることを確認した. また, 同時実行法は, 追尾フィルタ-A, B で追尾維持が可能な場合, 追尾フィルタ-A, B と同等の平滑性能が確保できることを確認した. 一方, 図 3.4.3 に示す予測誤差の平均値から, バイアス誤差は追尾フィルタ-C, 追尾フィルタ-A, 追尾フィルタ-B の順で小さい値を取ることを確認した. そのうち, 追尾フィルタ-A, 追尾フィルタ-B はドップラ予測誤差, 角度予測誤差においてバイアス誤差が大きく, 追尾維持が不可能であった. それに対し, 追尾フィルタ-C, 同時実行法は, 追尾維持が可能であることを確認した.

以上のことから, 同時実行法は, 追尾フィルタ-A, B では追尾維持が不可能な場合でも, 追尾維持が可能なが分かった. また, 追尾フィルタ-A, B で追尾維持が可能な場合, 同時実行法により, 追尾フィルタ-A, B と同等の平滑性能が確保できることが確認された.

### 3.5. 各フィルタを適用した場合における追尾維持が不可能になった時刻

3.4. 横切り車両モデルに対し, 追尾フィルタ-A, 追尾フィルタ-B はドップラ予測誤差, 角度予測誤差においてバイアス誤差が大きく, 追尾維持が不可能であった. 図 3.5 は追尾維持が不可能になった時刻をシミュレーション試行回数毎に集計した結果である. 横軸は

追尾維持が不可能になった時刻を 1 サンプル毎に表している. 縦軸は度数を表している. 図 3.5.1 は追尾フィルタ-B, 図 3.5.2 は追尾フィルタ-A を適用した場合を示す.

表 3.1. 先行車両目標条件

自車速度 [km/h]	目標条件		レーダパラメータ		観測誤差の標準偏差の規定値		
	初期位置[m]	速度[km/h]	観測時間[ms] (データレート)	測角範囲[deg]	距離[m]	ドップラ[km/h] ([m/s])	角度[deg]
(0,30)	(0, 100)	(0,20)	29	±12	0.8	0.09 (0.025)	1.2

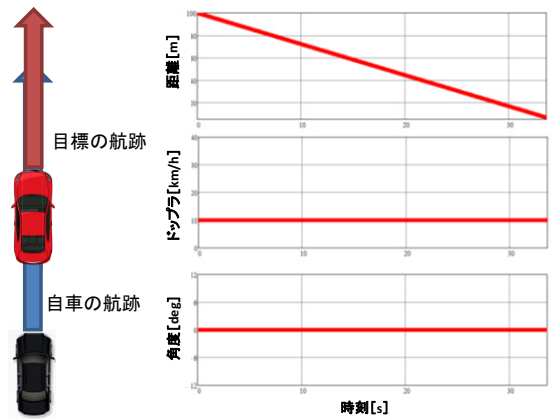


図 3.1.1. 先行車両モデルと真値

表 3.2. 静止目標条件

自車速度 [km/h]	目標条件		レーダパラメータ		観測誤差の標準偏差の規定値		
	初期位置[m]	速度[km/h]	観測時間[ms] (データレート)	測角範囲[deg]	距離[m]	ドップラ[km/h] ([m/s])	角度[deg]
(0,30)	(-5, 100)	(0,0)	29	±12	0.8	0.09 (0.025)	1.2

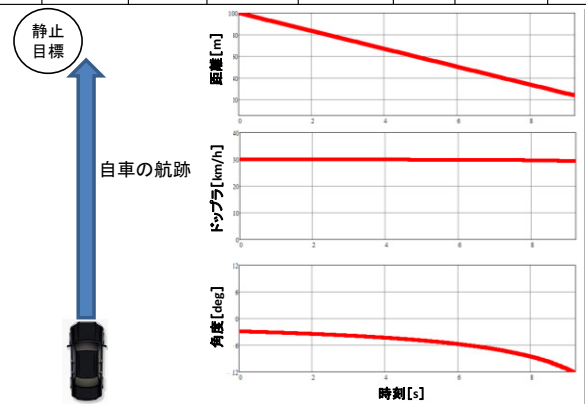


図 3.2.1. 静止目標モデルと真値

表 3.3. 対向車両目標条件

自車速度 [km/h]	目標条件		レーダパラメータ		観測誤差の標準偏差の規定値		
	初期位置[m]	速度[km/h]	観測時間[ms] (データレート)	測角範囲[deg]	距離[m]	ドップラ[km/h] ([m/s])	角度[deg]
(0,30)	(5, 100)	(0,-30)	29	±12	0.8	0.09 (0.025)	1.2

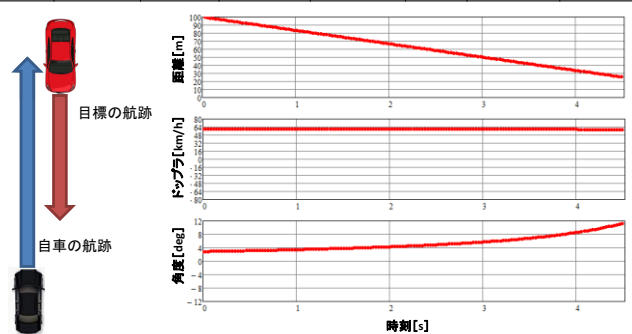


図 3.3.1. 対向車両モデルと真値

表 3.4. 横切り車両目標条件

自車速度 [km/h]	目標条件		レーダパラメータ		観測誤差の標準偏差の規定値		
	初期位置[m]	速度[km/h]	観測時間[ms] (データレート)	測角範囲[deg]	距離[m]	ドップラ[km/h] [(m/s)]	角度[deg]
(0,60)	(-7.4, 35)	(30,0)	29	±12	0.8	0.09 (0.025)	1.2

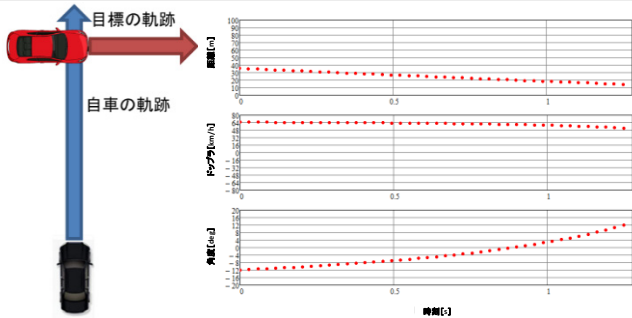


図 3.4.1. 横切り目標モデルと真値

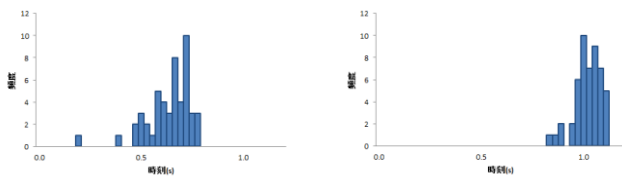


図 3.5.1. 追尾フィルタ-B      図 3.5.2 追尾フィルタ-A  
図 3.5. 追尾維持が不可能になった時刻

#### 4. むすび

本稿では、代表的な四種の運動モデル（先行車両を追随する場合、目標車両が横切る場合、目標車両とすれ違う場合、目標が静止している場合）に対して、提案法を適用したモンテカルロシミュレーションによる定量評価を実施し、その結果を報告した。予測誤差の比較により、同時実行法は、追尾フィルタ-A、追尾フ

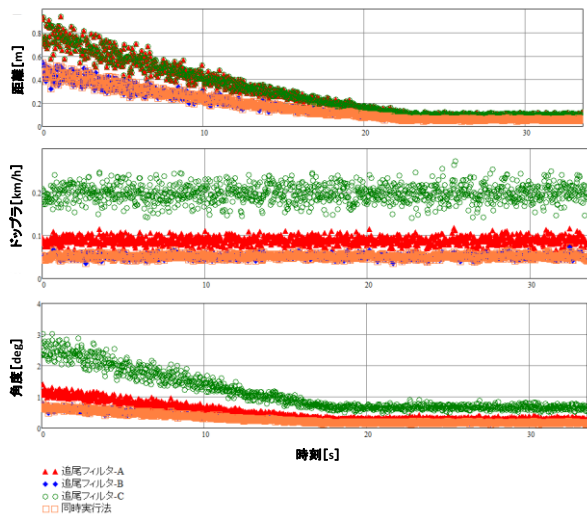


図 3.1.2. 先行車両に対する予測誤差の標準偏差

イルタ-B では追尾維持が不可能な場合でも、追尾維持が可能なが確認された。また、追尾フィルタ-A, 追尾フィルタ-B で追尾維持が可能なが場合、同時実行法により、追尾フィルタ-A, 追尾フィルタ-B と同等の平滑性能が確保できることが確認された。今後の課題として、複数の目標や、複数反射点を有する目標に対する提案法の有効性の検証が挙げられる。

#### 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] 渡辺優人, 秋田学, 稲葉敬之, “多周波ステップ CPC レーダの提案と原理検証実験”, 電気学会論文誌 C, Vol.135, No.3, pp. 285-291, 2015.
- [2] 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.
- [3] 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, SANE2012-133, Jan, 2012.
- [4] 瀬楽瑞樹, 秋田学, 稲葉敬之, 小菅義夫, “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”, 電子情報通信学会, 信学技報, SANE2014-114, Jan, 2014.
- [5] 角田智広, 秋田学, 藤村嘉一, 小菅義夫, 稲葉敬之 “車載レーダ用追尾における複数フィルタの同時実行法”, 2016 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-2-12, 2016-09

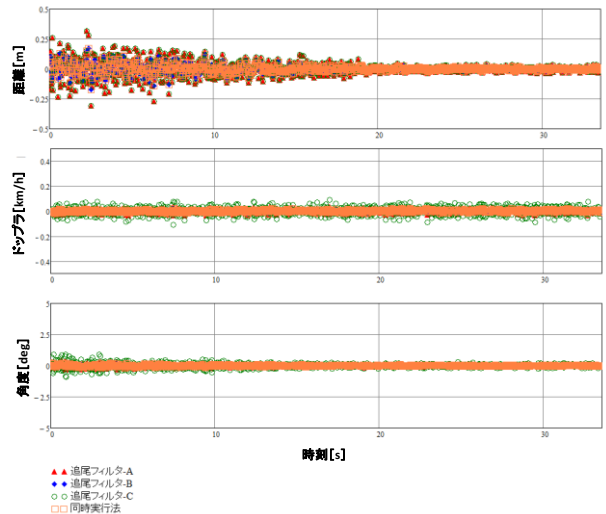


図 3.1.3. 先行車両に対する予測誤差の平均値

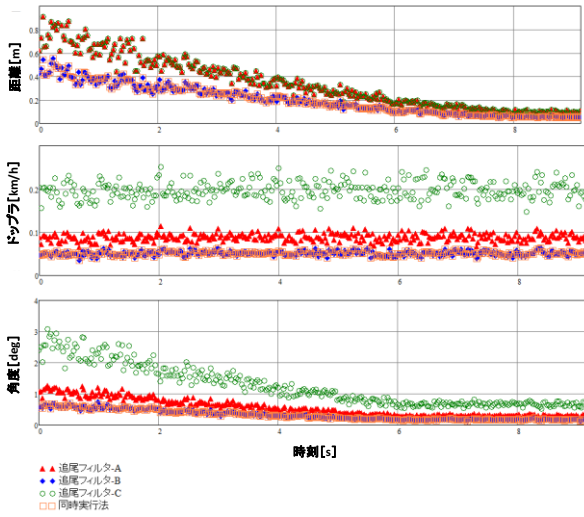


図 3.2.2. 静止目標に対する予測誤差の標準偏差

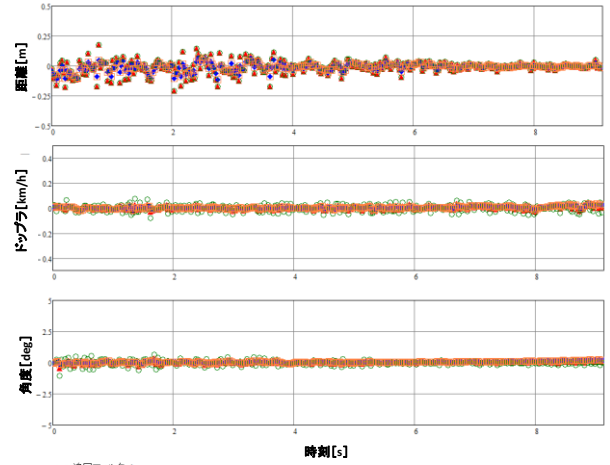


図 3.2.3. 静止目標に対する予測誤差の平均値

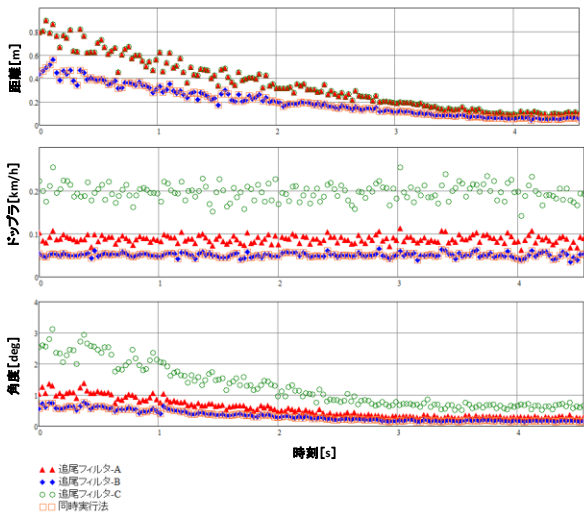


図 3.3.2. 対向車両に対する予測誤差の標準偏差

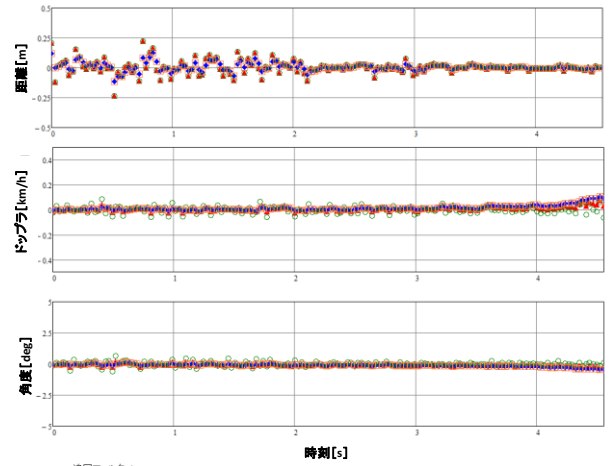


図 3.3.3. 対向車両に対する予測誤差の平均値

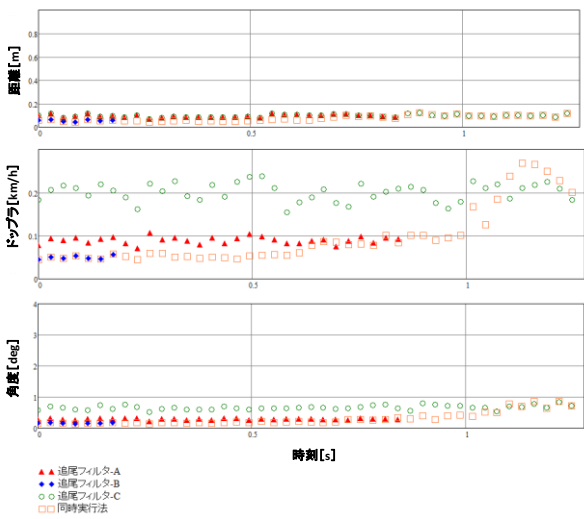


図 3.4.2. 横切り車両に対する予測誤差の標準偏差

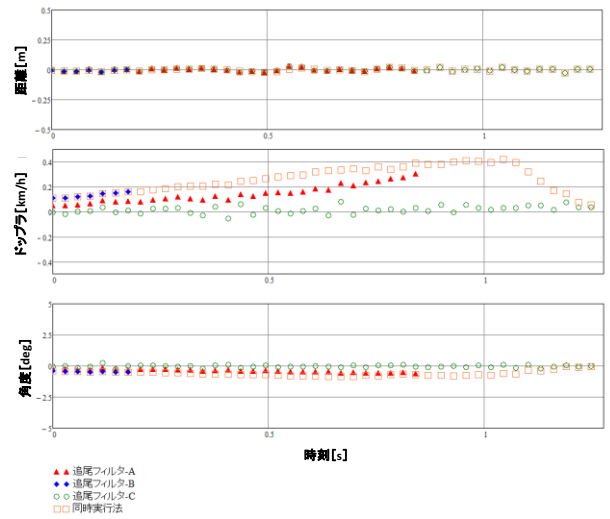


図 3.4.3. 横切り車両に対する予測誤差の平均値