

高精度の距離和とドップラー和観測値による交差点目標の追尾法 —シミュレーションによるケーススタディ—

佐々木 裕央[†] 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: sasaki.hiroyuki@inabalab.ee.uec.ac.jp

あらまし マルチスタティックレーダから観測される距離和とドップラー和より、三次元の目標位置及び速度を推定し、その推定値を目標追尾法に使用して追尾することを考える。その際、追尾を継続（航跡維持）するために、高精度の予測値が必要となる。従来法としてカルマンフィルタ追尾法が挙げられるが、自動車などの運動変位の大きな目標に対して追従性能が十分に確保できない可能性を考慮し、新たに Non-filter 追尾法を提案する。本稿では、交差点での車両監視を想定した受信アンテナ4個の場合に、直進、右折、停止と発進をする3つの運動モデルに対して上記の目標追尾法により得られた予測値から、追従性能を評価した。この結果、従来法は直進目標に対してのみ追従性能を有する一方、提案法はどの運動モデルに対しても追従性能を有することがわかった。また提案法において、位置情報の他に速度情報も使用した方が、高精度のうえ追従性能も良いことがわかった。

キーワード TSOA, 距離和, ドップラー和, テイラー級数推定法, 目標追尾, Non-filter 追尾法

Tracking Method of Intersection Target by High Accuracy Range Sum and Doppler Sum - Case Study by Simulation -

Hiroyuki Sasaki[†] Manabu Akita[†] Yoshio Kosuge[†] 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: sasaki.hiroyuki@inabalab.ee.uec.ac.jp

Abstract We discuss a target tracking method using the estimate of the three-dimensional target position and velocity obtained from the range sum and the Doppler sum observation by a multi-static radar. We should have highly tracking accuracy in order to maintain the track. We propose a Non-filter automobile tracking method because conventional Kalman-filter tracking method may not maintain a track for non-constant velocity target. In this paper, we compare tracking accuracy of the predicted values for the three target motion models (constant velocity, turn right, stop and go) in the case of 4 receiving antennas assuming vehicle surveillance at an intersection. We can conclude that conventional method has track maintenance capability only for the constant velocity target. However, the proposed method has track maintenance capability for any target motion model. Moreover, in the proposed method, the tracking accuracy becomes better when using additional velocity estimate as compared with using only position estimate.

Keywords TSOA, Range Sum, Doppler Sum, Taylor Series Estimation, Target Tracking, Non-filter Tracking Method

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するとともに、注目を集めている。これらのシステムに用いられるセンサには、逆光・夜間・雨天等の悪天候下においても、高データレートで目標の距離・速度・角度が計測可能であることが要求される。そこで、当研究室では、送信帯域幅に比べ狭受信機帯域幅で高距離分解能および高い振幅アイソレーションを達成可能である多周波ステップ CPC(Complimentary Phase Code)方式[1]を使用したミリ波レーダを開発している[2]。当研究室では、高精度の距離

及びドップラーが得られるとの本レーダの特長を活かした、交差点での目標追尾法の開発を目指している。

目標追尾では、図1に示すように、追尾目標が存在すると予測される範囲にゲートを形成し、ゲート内の観測値を追尾維持に使用することで、目標の航跡を維持する[3]。そのゲートは算出された予測値のまわりに作られるため、継続して追尾するためには、高精度の予測値を算出する必要がある。また多目標追尾や、単一目標から複数反射点が検出される場合は、このゲート内に複数の観測値が存在する可能性がある。その際の相関処理の一例として、ゲート中心に最も近い観測値を採用する NN(Nearest Neighbor)法が挙げられる[3]。

本稿では、この目標追尾をマルチスタティックレーダから得られる距離和・ドップラー和観測値に適用することを考える。これらの観測値からの目標の位置・速度推定にはテイラー級数推定法[4]を使用した。

ところで、従来追尾法の代表例であるカルマンフィルタは、等速直線運動を行う航空機等の目標に対して高い平滑効果を有する。しかし自動車などの運動変位が大きな目標に対しては、この平滑効果がかえって追従精度を劣化させてしまい、追従することが困難になる場合があると想定される。そこで新たな目標追尾法として、Non-filter 追尾法を提案する。Non-filter 追尾法は直近の観測値のみを使用するため、急な運動変化に対しても航跡維持の観点で有利であると予想される。本稿ではシミュレーションにより、距離和及びドップラー和観測値から求められた推定値に対して、カルマンフィルタ追尾法と Non-filter 追尾法を適用して予測値を算出し、ランダム誤差、バイアス誤差からそれぞれの追尾性能を評価する。

2. 距離和・ドップラー和観測値による目標追尾法

2.1. マルチスタティックレーダ

マルチスタティックレーダは、送信機に対して受信機を全て異なる位置に設置したものをいう。このとき観測される信号は、送信機と目標間、受信機と目標間の距離の和及びドップラーの和である。この観測情報から目標の測位・測速を行う。本稿ではこれにテイラー級数推定法を使用し、高精度の推定値を求めた。

2.2. カルマンフィルタ追尾法

本稿では、目標位置を観測値とし、等速直線運動モデルを使用したカルマンフィルタを従来法とする。なお、この目標追尾法を K-L (Kalman-filter_Location) 法と呼ぶ。K-L 法では、現在及び過去の観測値全てを追尾に使用する。

2.3. Non-filter 追尾法

右折や緊急停止及び急発車などの運動を行う目標に対しては、新たな運動を開始した時刻以降のみの観測値を使用した追尾法が航跡維持の観点で有利であると予想される。このため、追尾に使用する過去の観測値の影響を軽減する特徴を有する Non-filter 追尾法を提案する。

提案法のうち位置情報のみを使用する方式では、現在及び 1 サプリング前の観測値を使用して速度を求め、位置及び速度の予測値を算出する。この追尾法を N-L (Non-filter_Location) 法と呼ぶ。また、位置と速度情報を使用する方式では、現在の観測値を使用して位置・速度の予測値を算出する。この追尾法を N-LV (Non-filter_Location, Velocity) 法と呼ぶ。

3. シミュレーションによる評価

計算機シミュレーションにて、3 方式の目標追尾法による予測値を評価する。本シミュレーションでは、交差点における車両監視を想定し、送信機 1 機、受信機 4 機をそれぞれ異なる位置に設置して固定し、点目標を 1 つ定める。図 2 に、模擬した交差点の平面図を示す。この環境下に、直進・右折・緊急停止と急発進（以下、Stop & Go）を想定した単一点目標から距離和・ドップラー和を観測し、テイラー級数推定法により目標の位置・速度を推定する。この時、初期値に目標の真値を使用し、10 回の初期値更新処理を施すことで、精度の高い推定値を得ることができる[5][6]。その推定値から 3 方式の目標追尾法 K-L 法、N-L 法、N-LV 法を用いて予測値を算出する。このシミュレーションを 50 回繰り返す、推定値対

する予測値の誤差平均、誤差標準偏差を算出し、ランダム誤差とバイアス誤差からそれぞれの目標追尾法の追尾性能の評価を行う。その際、それぞれの目標追尾法に入力する推定値は全て等しいものを用いる。ただし、受信アンテナそれぞれの観測雑音標準偏差は全て同一、観測雑音の平均は 0 とし、距離和とドップラー和の観測雑音に相関はないものとする。表 1 に、シミュレーションパラメータと送受信機の配置位置を示す。

表1. シミュレーションパラメータ

距離和観測雑音標準偏差[m]		0.3	
ドップラー和観測雑音標準偏差[km/h]		0.036	
サブリング時間[s]		0.029	
送信機位置[m]		(0 -6 7)	
受信機①位置	(4 4 5)	受信機③位置	(-4 -4 9)
受信機②位置	(4 -4 2)	受信機④位置	(-4 4 12)

3.1. 直進目標

表 2 に直進目標の条件を、図 3.1~3.6 に、ケーススタディの K-L、N-L、N-LV 法による結果を、図 3.7~3.8 に誤差平均値、誤差標準偏差を示す。図 3.1~3.2 より K-L 法は、殆どが推定値（測位値）に近い値となっている。図 3.3~3.4 より N-L 法は、速度成分が推定値（測速値）に対して誤差が大きくなっている。これは、短いサブリング間隔毎の平均速度を算出しているためである。図 3.5~3.6 より N-LV 法は、位置・速度成分ともに推定値に近い値となっている。図 3.7~3.8 より、どの方式もバイアス誤差が小さく、ランダム誤差は N-L 法、N-LV 法、K-L 法の順に小さくなるのがわかる。故に、直進目標に対しては全ての方式で追従性能を有し、かつ K-L 法の平滑効果が確認できた。

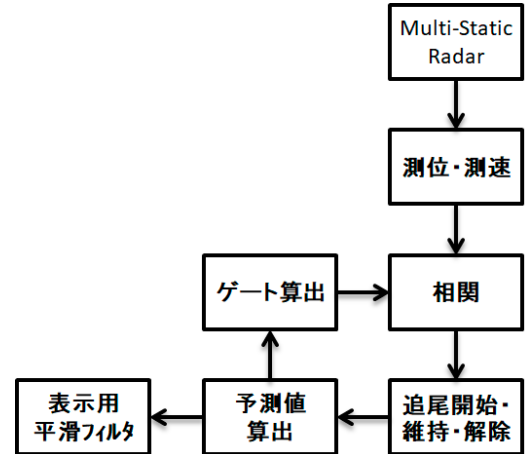


図1. 目標追尾法の処理ブロック図

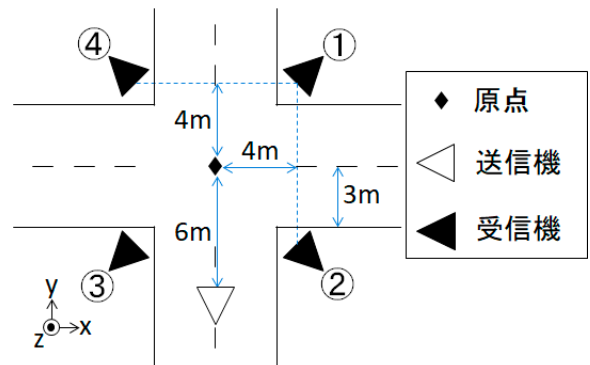


図2. 目標と送受信機の xy 平面位置

表 2. 直進目標

時間[s]	目標初期位置[m]	目標速度[km/h]
0~1.45	(-1.5 -4.35 3)	(0 21.6 0)

3.2. 右折目標

表 3 に右折目標の条件を、図 4.1~4.6 に、ケーススタディの K-L, N-L, N-LV 法による結果を、図 4.7~4.8 に誤差平均値、誤差標準偏差を示す。図 4.1~4.2 より K-L 法は、右折した直後から位置・速度両成分とも推定値に対して遅れている。図 4.3~4.6 より N-L, N-LV 法はともに、右折前後で遅れることはなく、位置・速度両成分において直進目標の時と同等の追従性能を有すると言える。図 4.7~4.8 より、バイアス誤差は K-L 法のみが右折直後から大きくなり、ランダム誤差は直進目標の際と順番が変化していないことがわかる。故に K-L 法は平滑効果が高いものの、追従性能が悪いと言える。

表 3. 右折目標

時間[s]	目標初期位置[m]	目標初期速度[km/h]
0~0.986	(-1.5 -4.35 3)	(0 21.6 0)
0.986~1.972	(-1.5 1.5 3)	(21.6 0 0)

3.3. Stop & Go 目標

表 4 に Stop & Go 目標の条件を、図 5.1~5.6 に、ケーススタディの K-L, N-L, N-LV 法による結果を、図 5.7~5.8 に誤差平均値、誤差標準偏差を示す。図 5.1~5.2 より K-L 法は、停止直後から y 方向の位置・速度成分に関して遅れが発生し、またその状態で目標が再び発進するため、更に遅れが生じていることがわかる。図 5.3~5.6 より N-L, N-LV 法は、停止前後、発進前後で予測値が遅れることはなく、直進目標の時と同等の追従性能を有すると言える。図 5.7~5.8 より、バイアス誤差は K-L 法のみにおいて停止直後・発進直後から大きくなり、ランダム誤差は順番が変わらないことがわかる。故に、K-L 法に関して右折目標の時と同様のことが言える。

表 4. Stop & Go 目標

時間[s]	目標初期位置[m]	目標初期速度[km/h]
0~0.725	(-1.5 -4.35 3)	(0 21.6 0)
0.725~3.712	(-1.5 0 3)	(0 0 0)
3.712~4.437	(-1.5 0 3)	(0 21.6 0)

4. むすび

本稿ではシミュレーションにおいて、直進・右折・Stop & Go の3つの運動モデルで動く単一点目標を、高精度の距離和・ドップラー和観測値から求めた推定値を使用し、K-L 法、N-L 法、N-LV 法の3方式による目標追尾法の追尾性能の評価

を行った。K-L 法は現在から過去までの全ての観測値を用いるため、予測値の平滑効果が高くなる反面、急な運動変化に対応することができない。それ故、直進のような等速直線運動に対しては追従性能を有していたが、右折や Stop & Go など急な変化に対して追従性能が低い結果となった。N-L 法は現在と1サンプル前の観測値を用いて速度を求め、予測値を算出するため、平滑性能を持たない反面、急激な運動変化にもすぐに対応することができる。それ故、どの運動モデルに対しても追従性能を有していた。N-LV 法は速度情報を含めた現在の観測値のみを用いるため、N-L 法よりも速度のランダム誤差が発生せず、より急激な運動変化にも対応することができる。なお、衝突予測や交通流の測定に重要な諸元である速度の追尾精度の確保も重要である。この観点からは、N-LV 法が優れている。表 5 に、それぞれの目標追尾法の特徴と追尾性能をまとめたものを示す。ランダム誤差が小さいほど予測値のばらつきが小さいことを示す。

謝 辞

本研究開発は総務省 SCOPE(受付番号 175003002)の委託を受けたものです。

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] M. Watanabe, T. Inaba, H. Tsubota, T. Yano, "Development of Millimeter wave Radar using Stepped Multiple Frequency Complementary Phase Code modulation", ICSANE2011-81, 2011.
- [3] 大内和夫, 平木直哉, 木寺正平, 松田庄司, 小菅義夫, 小林文明, 松波 勲, 佐藤源之, “レーダの基礎 —探査レーダから合成開口レーダまで—”, コロナ社, 東京, 2017.
- [4] W. H. Foy, “Position-location Solutions by Taylor-series Estimation”, IEEE Trans. Aerosp. & Electron.Syst. vol.12, no.2, pp.187-194, March 1976.
- [5] 佐々木裕央, 藤村嘉一, 秋田 学, 小菅義夫, 稲葉敬之, “マルチスタティックレーダにおける距離和単独とドップラー和併用方式の目標位置推定精度の比較”, 信学総大, B-2-54, March.2017.
- [6] 佐々木裕央, 角田智広, 秋田 学, 小菅義夫, 稲葉敬之, “距離和とドップラー和観測値を用いたテイラー級数推定法による目標の位置及び速度推定における初期値更新処理の評価”, 信学技報, vol. 117, no. 403, SANE2017-100, pp. 83-88, 2018年1月.

表 5. 目標追尾法の追尾性能まとめ

目標追尾法	特徴 使用する観測値	追尾性能					
		バイアス誤差				ランダム誤差	
		直進目標		右折, Stop & Go 目標			
		位置	速度	位置	速度	位置	速度
K-L 法	現在から過去まで全て	小	小	大	大	小	小
N-L 法	現在と1サンプル前のみ	小	小	小	小	小	大
N-LV 法	現在のみ	小	小	小	小	小	小

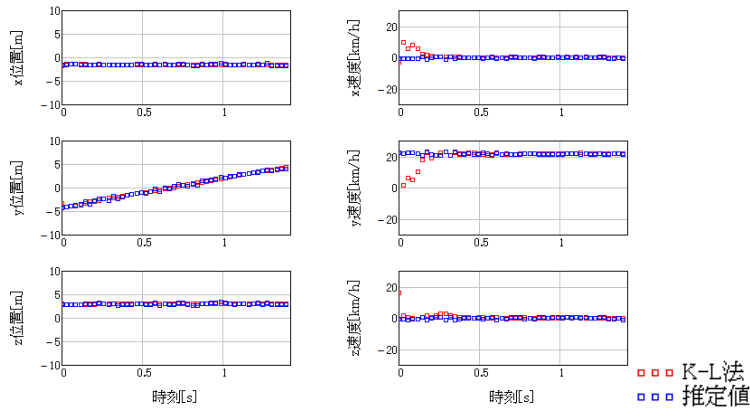


図3.1. K-L法の予測値出力図 (時系列データ)

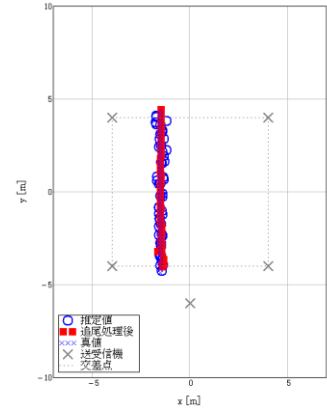


図3.2. K-L法の予測値出力図 (xy平面図)

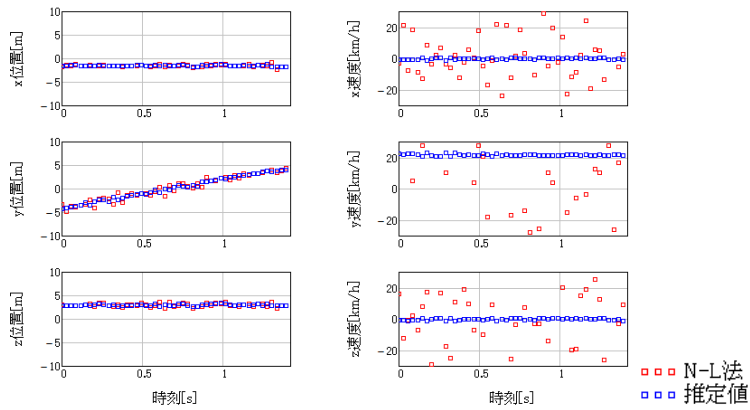


図3.3. N-L法の予測値出力図 (時系列データ)

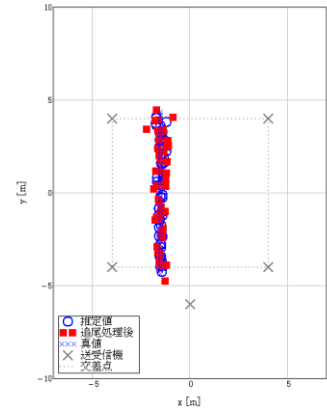


図3.4. N-L法の予測値出力図 (xy平面図)

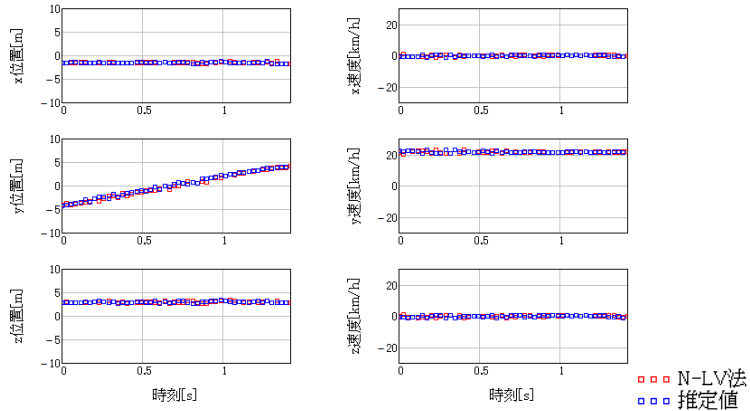


図3.5. N-LV法の予測値出力図 (時系列データ)

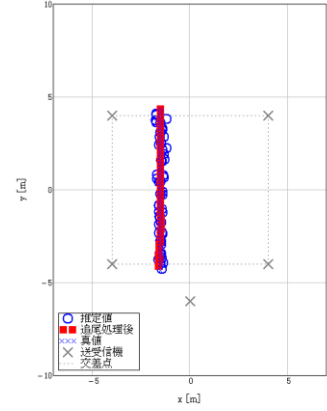


図3.6. N-LV法の予測値出力図 (xy平面図)

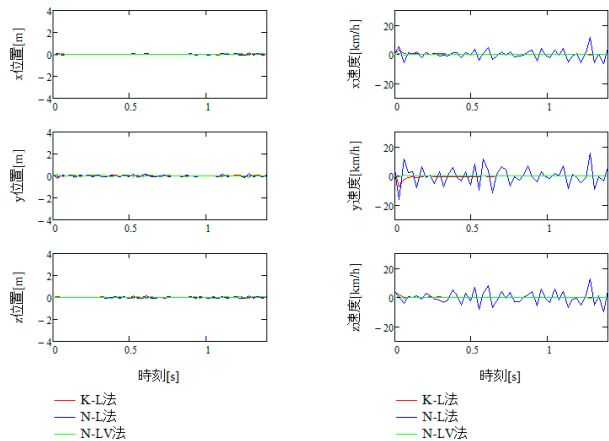


図3.7. 目標追尾法の予測値誤差平均

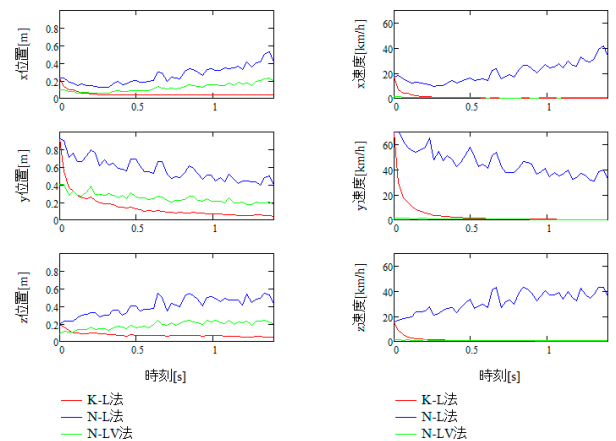


図3.8. 目標追尾法の予測値誤差標準偏差

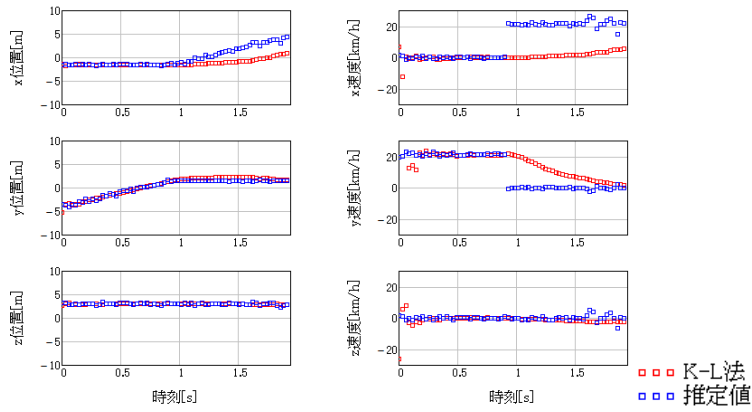


図4.1. K-L法の予測値出力図 (時系列データ)

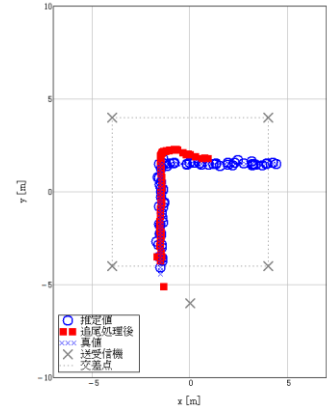


図4.2. K-L法の予測値出力図 (xy平面図)

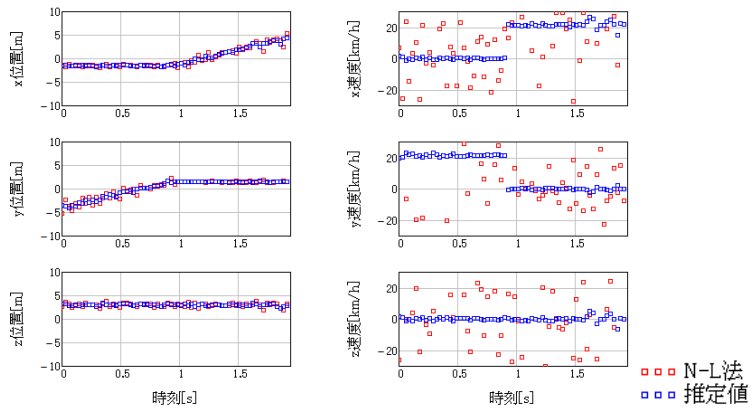


図4.3. N-L法の予測値出力図 (時系列データ)

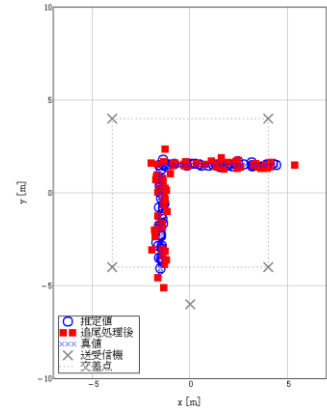


図4.4. N-L法の予測値出力図 (xy平面図)

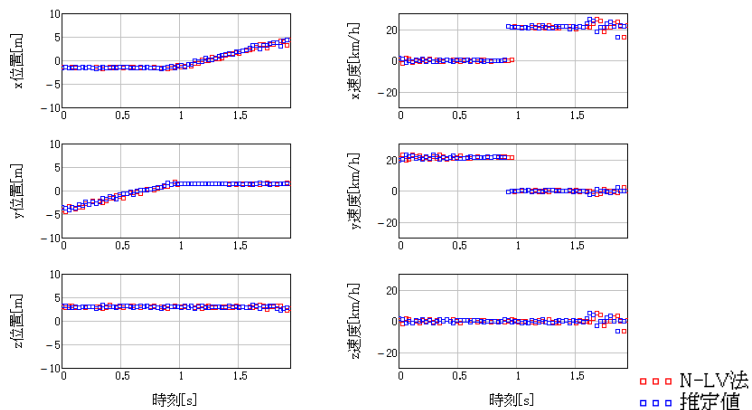


図4.5. N-LV法の予測値出力図 (時系列データ)

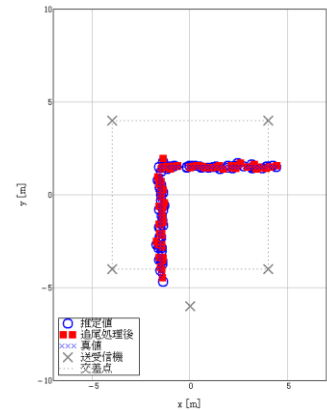


図4.6. N-LV法の予測値出力図 (xy平面図)

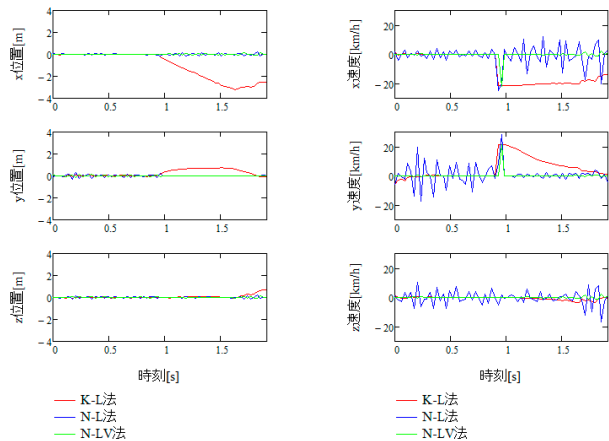


図4.7. 目標追尾法の予測値誤差平均

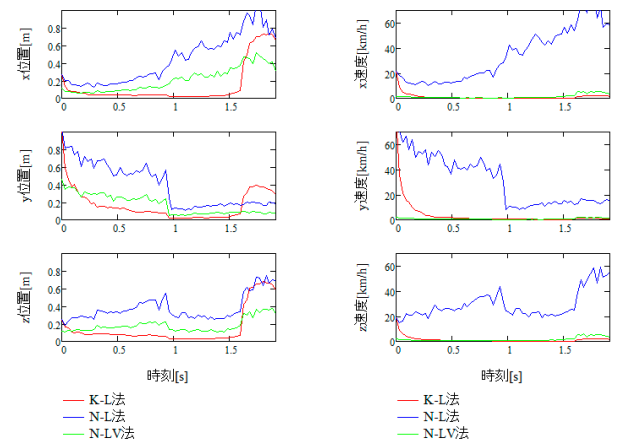


図4.8. 目標追尾法の予測値誤差標準偏差

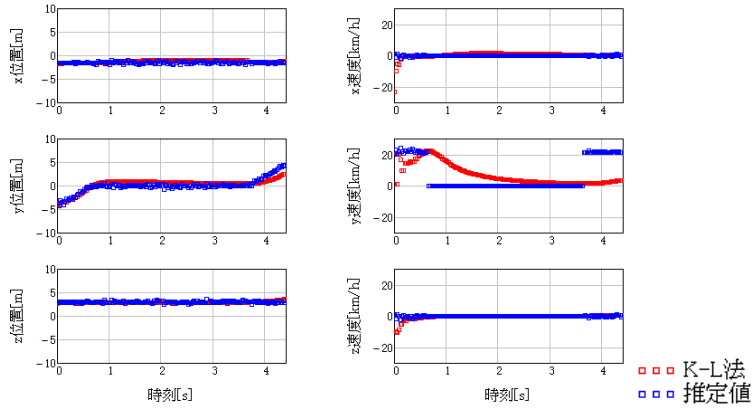


図5.1. K-L法の予測値出力図 (時系列データ)

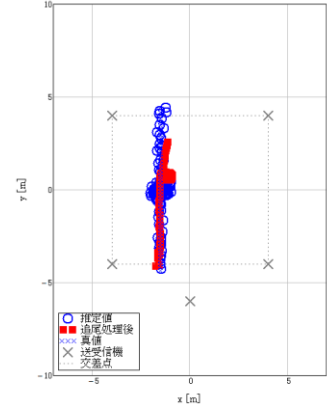


図5.2. K-L法の予測値出力図 (xy平面図)

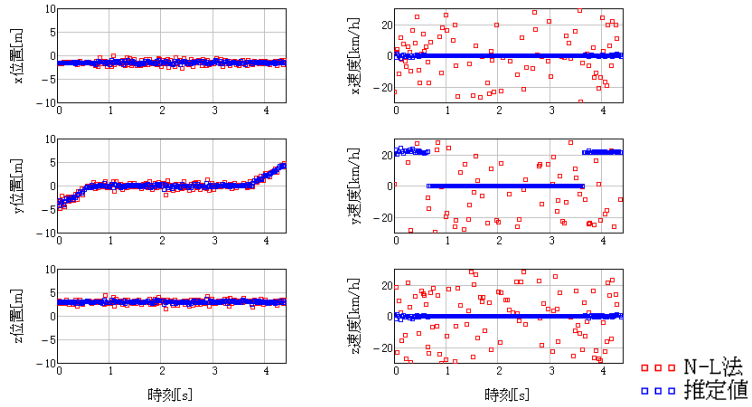


図5.3. N-L法の予測値出力図 (時系列データ)

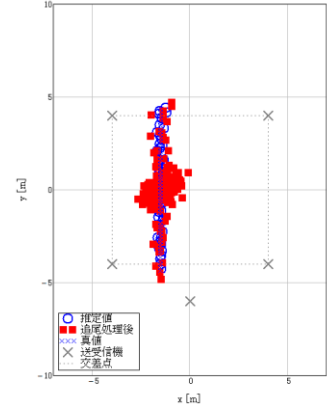


図5.4. N-L法の予測値出力図 (xy平面図)

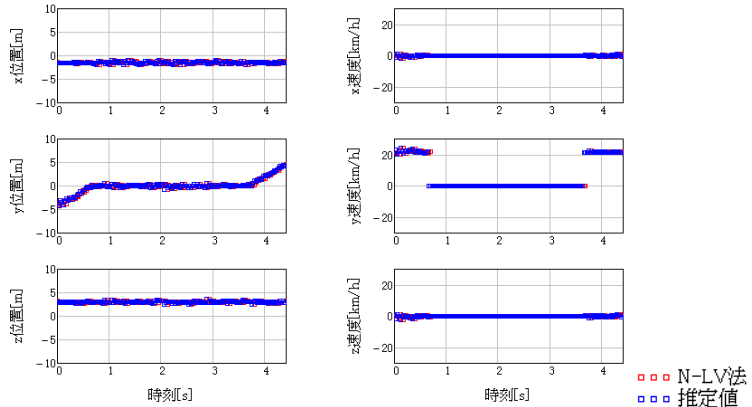


図5.5. N-LV法の予測値出力図 (時系列データ)

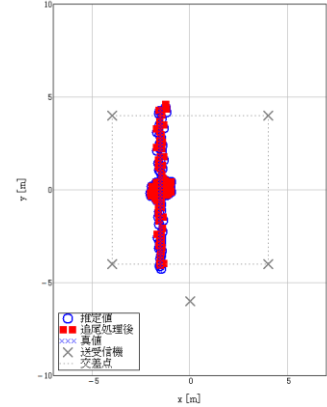


図5.6. N-LV法の予測値出力図 (xy平面図)

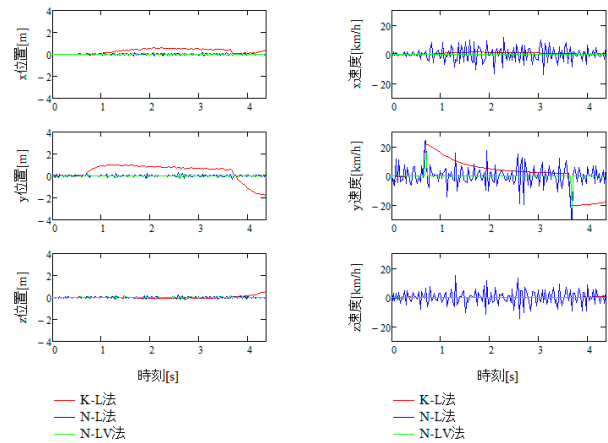


図5.7. 目標追尾法の予測値誤差平均

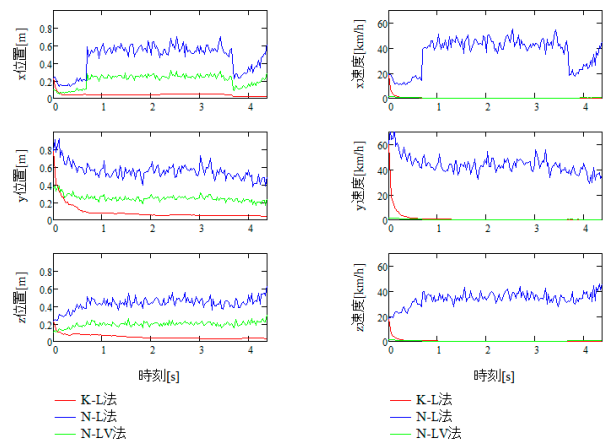


図5.8. 目標追尾法の予測値誤差標準偏差