

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

深町 弘毅[†] 渡辺 優人[†] 稲葉 敬之[†] 小菅 義夫[‡]

[†] 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

[‡] 長崎大学大学院 工学研究科 〒852-8521 長崎市文教町 1-14

E-mail: fukamachi.kouki@inabalab.ee.uec.ac.jp

あらまし 高度道路交通システム (ITS) においてミリ波車載レーダを用いた衝突被害軽減ブレーキなどが注目されている。そこで、多周波ステップ CPC 方式を変調方式とし、ミリ波帯の技術適合審査を取得した多周波ステップ CPC ミリ波レーダを開発している。本稿では多周波ステップ CPC ミリ波レーダにより、異なる道路環境において先行車両追従実験を実施し、取得した距離、速度、角度が紐付された検知データに対し、NN(Nearest Neighbor) アソシエーションを用いた先行車両追尾を行う。

キーワード レーダ, NN アソシエーション, 多周波ステップ CPC ミリ波レーダ

Vehicle Tracking Using Nearest Neighbor Association in Automotive Radar

Kouki FUKAMACHI[†] Masato WATANABE[†] Takayuki INABA[†] and Yoshio KOSUGE[‡]

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

[‡] Graduate School of Engineering and , NAGASAKI University
1-14 bunkyo machi, Nagasaki,shi,Nagasaki,852-8521 Japan

E-mail: fukamachi.kouki@inabalab.ee.uec.ac.jp

Abstract In Intelligent Transport Systems, Collision Mitigation Brake System, etc. are drawing attention using Automotive Radar. We are developing Millimeter wave radar using stepped multiple frequency CPC(Complimentary Phase code) ,which meets specified low-power radio station standard of the millimeter wave. This radar obtains ranges, relative velocities, and angles without pairing error. This paper describes experiments of vehicle tracking in different road environments by means of NN(Nearest Neighbor) Association.

Keyword Radar, NN Association, Millimeter wave radar using stepped multiple frequency CPC

1. まえがき

近年、高度道路交通システム (ITS : Intelligent Transport Systems) において各種センサを用いた先進運転支援システム (ADAS : Advanced Driver Assistance Systems) が注目されている。先進運転支援システムの一例として衝突被害軽減ブレーキや車間距離制御などがあり、これらのシステムでは、夜間・逆光・悪天候

下においても高データレートで目標の距離・速度・角度の計測緒元を上位制御システムへ提供するセンサが要求される。これらの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。

一方、ミリ波車載レーダの変調方式として、比較的低速の信号処理で高い距離分解能が得られる FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave)方式が広

く利用されている。FMCW 方式は目標の距離・速度を算出する際に up 掃引と down 掃引の検出ビート周波数のペアリング操作が必要となる。しかし、車載レーダが運用される実環境は多目標環境下であり、ペアリング誤作動が発生するという課題がある [1]。

そこで、筆者らは多周波ステップ CPC 方式を提案している [2][3]。本方式は FMCW 方式とは異なり、多目標環境下においても高い振幅アイソレーションを保持しており、ペアリングなく遠近の複数目標の距離・速度が計測可能であり、送信帯域幅と比較して狭受信機帯域幅で 30cm の高距離分解能が得られる。また、筆者らは多周波ステップ CPC 方式を変調方式としてリアルタイムで計測可能な多周波ステップ CPC ミリ波レーダを開発している [4]。

本稿では高速道路および市街地を想定したフィールドにおいて先行車両追従実験を実施し、多周波ステップ CPC ミリ波レーダの取得した距離、速度、角度が紐付された検知データに対して NN(Nearest Neighbor)アソシエーションを適用した先行車両追尾を行う。

2. 多周波ステップ CPC ミリ波レーダ

多周波ステップ CPC ミリ波レーダの外観図を図 1 に示す。本装置は送受信装置 RF 部、IF 部および信号処理装置から構成され、表 1、表 2 に示すようにミリ波特定小電力無線機規格(送信周波数 60.0~61.0GHz の 500MHz 以内、送信電力 10mW、アンテナ利得 40dBi)を満足する仕様である。RF 部および IF 部は送信アンテナにスロットアンテナ、利得は 22dBi、受信アンテナに 4 素子スロットアレーアンテナを備え、偏波は水平偏波を採用している。IF は周波数ステップを実現するために送信周波数を高速で切り替える構成である。

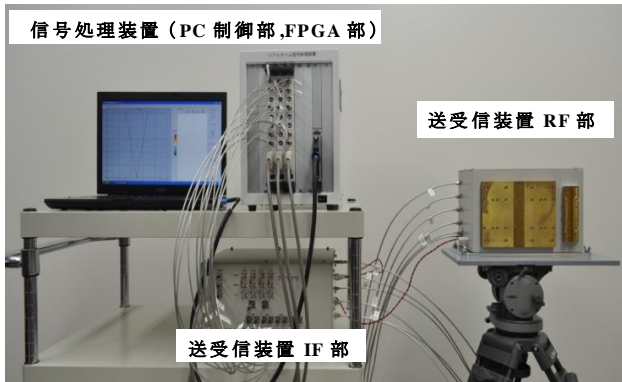


図 1. 多周波ステップ CPC ミリ波レーダ外観図

多周波ステップ CPC 方式の送信シーケンスを図 2 に示す。周波数ステップ数を N とし、これらを観測時間

内で M 回繰り返す送信周波数シーケンスを用いる。本方式は以下に示す(i)(ii)(iii)を特徴とする。

(i) 同じ送信周波数同士の受信信号に対してフーリエ変換を適用することにより、速度分解能の低下なくドップラ周波数(すなわち目標速度)を推定することが可能である。

(ii) CPC 符号(Complimentary phase code)を用いたパルス圧縮、ドップラ補正による高い距離サイドローブ抑圧性能を有する。

(iii) 周波数ステップ方向に受信信号を合成することにより送信帯域幅と比較して狭受信機帯域幅で高距離分解能が得られる。

以上より車載レーダ等で要求される観測時間および周波数帯域幅の制約の中で高い振幅アイソレーションを保持しつつ、ペアリングなく複数目標の距離・速度が計測可能であり、送信帯域幅と比較して狭受信機帯域幅で高距離分解能が得られる。

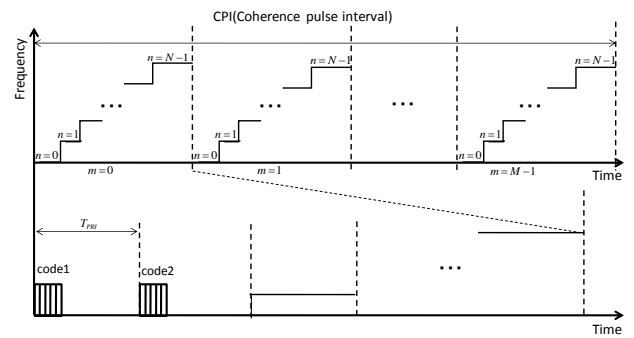


図 2. 多周波ステップ CPC 方式送信シーケンス図

本装置はリアルタイムで信号処理を行うリアルタイムモードと A/D 直後の各アンテナ素子の受信信号を出力するオフラインモードを有する。本装置のリアルタイムモードの信号処理概要を図 3 に示す。

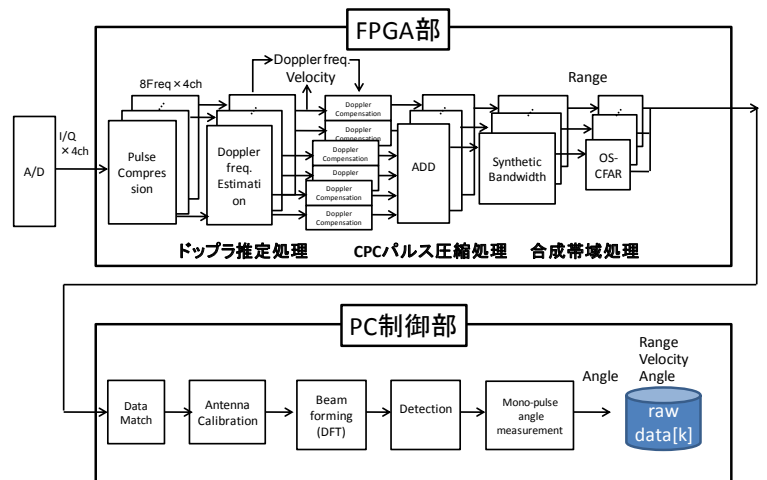


図 3. 多周波ステップ CPC ミリ波レーダ信号処理概要 (リアルタイムモード)

各アンテナ素子の受信信号は A/D 変換され、FPGA 部(Virtex5 FPGA)にて、ドップラ推定処理・CPC パルス圧縮・合成帯域処理を経て、各アンテナ素子ごとに距離-ドップラマップが作成され、ドップラピンをスライドさせながら距離方向に OS-CFAR[5]を行う。全アンテナでしきい値を超えた距離・ドップラピンおよび各アンテナの複素振幅は FPGA 部から PC 制御部へ送られる。PC 制御部ではアンテナ校正、ビームフォーミング、振幅比較モノパルス測角処理、しきい値処理を経て、サンプリング時刻 t_k における距離・速度・角度が紐付された検知データが出力される。

表 1 レーダ装置構成・仕様

送信電力	10mW
切替周波数	8ch
周波数切替時間	100nsec 以下
アンテナ方式	送信：1 素子導波管 スロットアンテナ 受信：4 素子導波管 スロットアレーアンテナ

表 2 レーダパラメータ一覧

送信周波数	60.25-60.75GHz
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	60MHz
周波数ステップ数 N (最大速度視野)	8 (± 79.64 km/h)
送信帯域幅 (距離分解能)	500MHz (0.3m)
観測時間 (速度分解能)	28.6msec (0.311km/h)
A/D サンプリング周波数	160MHz

3.NN アソシエーションを用いた多目標追尾処理

多周波ステップ CPC ミリ波レーダにより距離・速度・角度が紐付された検知データに対する多目標追尾処理の概要を図 4 に示す。代表的なアソシエーション処理として JPDA(Joint Probabilistic Data Association)や MHT(Multiple Hypothesis Tracking)などが知られている[6][7]。本稿では JPDA や MHT と比較して計算負荷が軽く、最も簡易なアソシエーション処理である NN(Nearest Neighbor)法を採用する[8]。

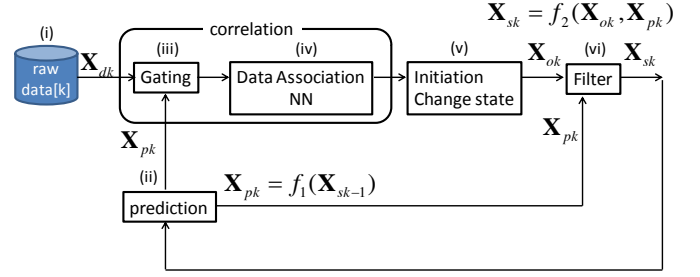


図 4. 多目標追尾処理概要

サンプリング時刻 $t_k = kT_c$ ($k=0,1,2,\dots$) の検知データベクトル \mathbf{X}_{dk} 、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(1)に定義する。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{dk} &= [R_{dk} \ V_{dk} \ \theta_{dk}]^T & \mathbf{X}_{ok} &= [R_{ok} \ V_{ok} \ \theta_{ok}]^T \\ \mathbf{X}_{pk} &= [R_{pk} \ V_{pk} \ \theta_{pk}]^T & \mathbf{X}_{sk} &= [R_{sk} \ V_{sk} \ \theta_{sk}]^T \end{aligned} \quad (1)$$

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 はベクトルの転置を表す。以下、図 4 を用いて処理概要を (i)~(vi) の順序で説明する。

(i) 検知データの入力

サンプリング時刻を $t_k = kT_c$ ($k=0,1,2,\dots$) としたときの検知データベクトル \mathbf{X}_{dk} をゲーティング処理部へ入力する。

(ii) 運動モデルおよび予測値

前サンプリング時刻 t_{k-1} の平滑値ベクトル \mathbf{X}_{sk-1} からサンプリング時刻 t_k の予測値ベクトル \mathbf{X}_{pk} を求める。多周波ステップ CPC ミリ波レーダの観測時間は $T_c = 29$ msec 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式(2)のようになる。

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

(iii) ゲーティング処理

ゲーティング処理は式(2)の予測値を中心としてゲート幅を設け、距離・速度・角度が共にゲート内に存在する検知データのみを観測値の候補とする。

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・角度のゲート幅も同様に S/N の関数と仮定すると、レーダ方程式より、目標の S/N を式(3)により定義する。式(2)において R は目標距離、 μ_0 は式(4)にて定義される定数である。ここで、式(4)において、 R_{reg} は目標距離の規定値、 $(S/N)_{reg}$ は S/N の規定値である。

$$(S/N) = \mu_0 \frac{1}{R^4} \quad (3)$$

$$\mu_0 = (S/N)_{reg} R_{reg}^4 \quad (4)$$

後述する4章の遠距離先行車両追従実験において、多周波ステップCPCミリ波レーダのオフラインモードにより、目標距離100m、目標相対速度9km/hの先行車両に対し合成帯域処理後のS/Nが30dBという実験値を用い、 $(S/N)_{reg} = 30\text{ dB}$ 、 $R_{reg} = 100\text{ m}$ と設定する。この算出したS/Nを用いて距離・角度のゲート幅を式(5)に定義する。ここで、 k_R 、 k_θ は式(6)において定義され、 $R_{G,reg}$ 、 $\theta_{G,reg}$ はそれぞれ、S/Nの規定値 $(S/N)_{reg}$ に対応する距離・角度のゲート幅の規定値である。また、式(3)より、S/Nは距離の関数であることから、距離・角度のゲート幅式(5)も距離の関数となる。

$$R_G = \frac{k_R}{\sqrt{(S/N)}} \quad \theta_G = \frac{k_\theta}{\sqrt{(S/N)}} \quad (5)$$

$$k_R = R_{G,reg} \sqrt{(S/N)_{reg}} \quad k_\theta = \theta_{G,reg} \sqrt{(S/N)_{reg}} \quad (6)$$

本稿では、 $(S/N)_{reg} = 30\text{ dB}$ において、 $R_{G,reg} = 0.8\text{ m}$ 、 $\theta_{G,reg} = 1.2\text{ deg}$ を採用する。

また、速度のゲート幅 V_G は加速度運動を考慮し、 $V_G = 2\text{ km/h}$ の一定値とする。これにより加速度運動の範囲は1sec(=33CPD)において $2 \times 33 = 66\text{ km/h}$ の速度変化に対応する。

(iv) NNアソシエーション

NNアソシエーションは(iii)のゲーティング処理後の観測値の候補の中から予測値に最も近い検知データを観測値として採用する相関処理である。予測値ベクトル \mathbf{X}_{pk} を中心としたゲート内に存在する検知データの総数を m_k とし、 l 番目の検知データのベクトルを $\mathbf{X}_{dk,l} = [R_{dk,l} \quad V_{dk,l} \quad \theta_{dk,l}]^T$ ($l=1,2,\dots,m_k$)とする。

各検知データと予測値ベクトルの計測緒元(距離・速度・角度)の距離を式(7)に定義する。

$$D(\mathbf{X}_{dk,l}, \mathbf{X}_{pk}) = \left| \frac{R_{dk,l} - R_{pk}}{R_G(R_{pk})} \right| + \left| \frac{V_{dk,l} - V_{pk}}{V_G} \right| + \left| \frac{\theta_{dk,l} - \theta_{pk}}{\theta_G(R_{pk})} \right| \quad (7)$$

ここで、 $R_G(R_{pk})$ 、 $\theta_G(R_{pk})$ はそれぞれ、距離の予測値 R_{pk} を式(3)、式(5)に代入することで求まる距離、角度のゲート幅である。また、 V_G は速度ゲート幅である。

式(7)は距離・速度・角度をそれぞれゲート幅で規格化したものである。式(8)に示すように式(7)が最少となる検知データ番号 L を $l=1,2,\dots,m_k$ の中から探索し、観測値として採用する。

$$L = \arg \min_{l=1,2,\dots,m_k} D(\mathbf{X}_{dk,l}, \mathbf{X}_{pk}) \Rightarrow \mathbf{X}_{ok} = \mathbf{X}_{dk,L} \quad (8)$$

(v) 状態遷移およびイニシエーション

追尾対象の状態遷移を図5に示す。入力待ち状態から追尾が開始(イニシエーション)され、不定状態に遷移する。サンプリング不定区間を N 、サンプリング不定区間内にてゲート内に観測値が存在する回数を K

とすると、 K/N 以上で追尾確立状態に遷移し、 K/N 以下で追尾不確立状態に遷移する。また、追尾確立状態に遷移後、連続で M 回観測値が存在しない(ゲート外)のとき、追尾解除状態に遷移する。本稿では、 $N=20$ 、 $K=10$ 、 $M=60$ とした。

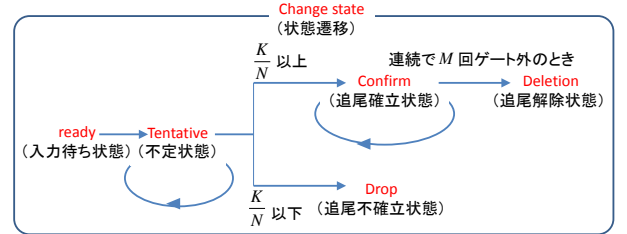


図5. 状態遷移図

(vi) 平滑値

サンプリング時刻 t_k における平滑値ベクトル \mathbf{X}_{sk} は、式(2)により算出した予測値ベクトル \mathbf{X}_{pk} および式(8)により算出した観測値ベクトル \mathbf{X}_{ok} を用いて式(9)のように定義する。

$$\begin{bmatrix} R_{sk} \\ V_{sk} \\ \theta_{sk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{pk} + \alpha(R_{ok} - R_{pk}) \\ V_{pk} + \alpha(V_{ok} - V_{pk}) \\ \theta_{pk} + \alpha(\theta_{ok} - \theta_{pk}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

本稿では、簡単のため $\alpha = 1/2$ を採用する。また、観測値が存在しない場合は $\alpha = 0$ とし、予測値ベクトルを平滑値ベクトルとする。

4. 先行車両追従実験

先行車両追従実験は表3に示すような実験状況で実施した。

表3 先行車両追従実験の実験状況

	中距離先行 車両追従実験	遠距離先行 車両追従実験
自車速度 (レーダ搭載)	30km/h	30km/h
目標速度	20km/h	20km/h
計測開始時の 車間距離	70m	180m
想定した環境	市街地	高速道路

中距離先行車両追従実験は樹木や電柱、建物が多く存在する環境、遠距離先行車両追従実験は高速道路のように開けた道路環境である。中距離先行車両追従実験についてrawデータを図6、多目標追尾処理結果を図7に示す。また、遠距離先行車両追従実験について、rawデータを図8、多目標追尾処理結果を図9に示す。図6、7、8、9は距離、速度、角度、振幅の時間変化である。なお、先行車両追従実験時の多周波ステップCPCミリ波レーダの自動車搭載図・実験風景を図10,11に示す。

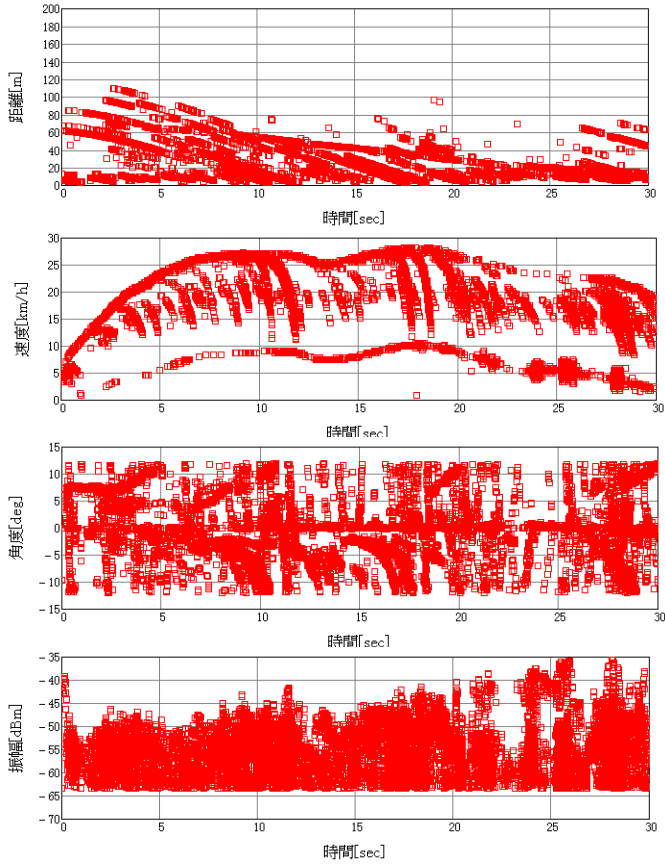


図 6. raw データ (中距離先行車両追従実験)

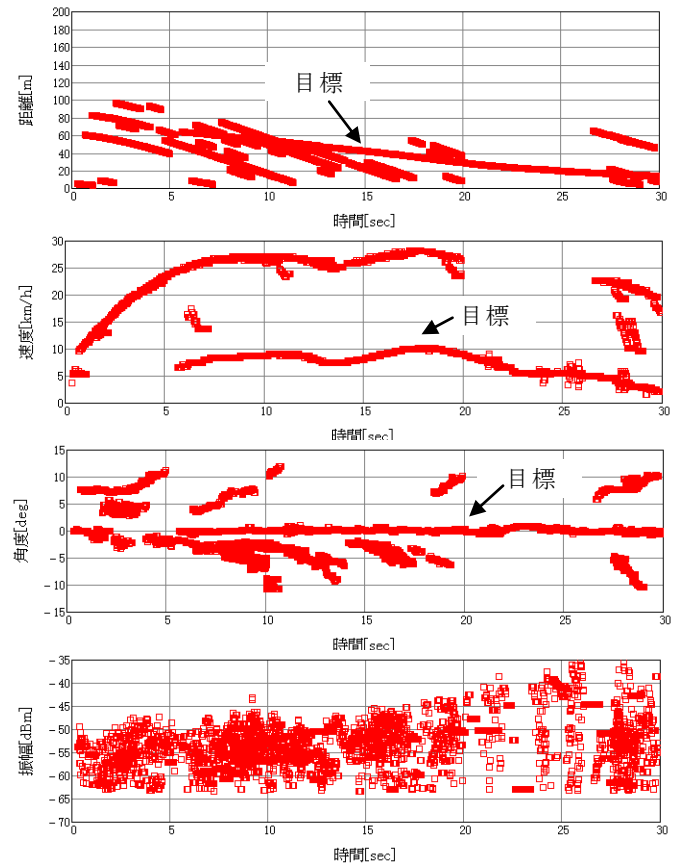


図 7. 多目標追尾処理結果(中距離先行車両追従実験)

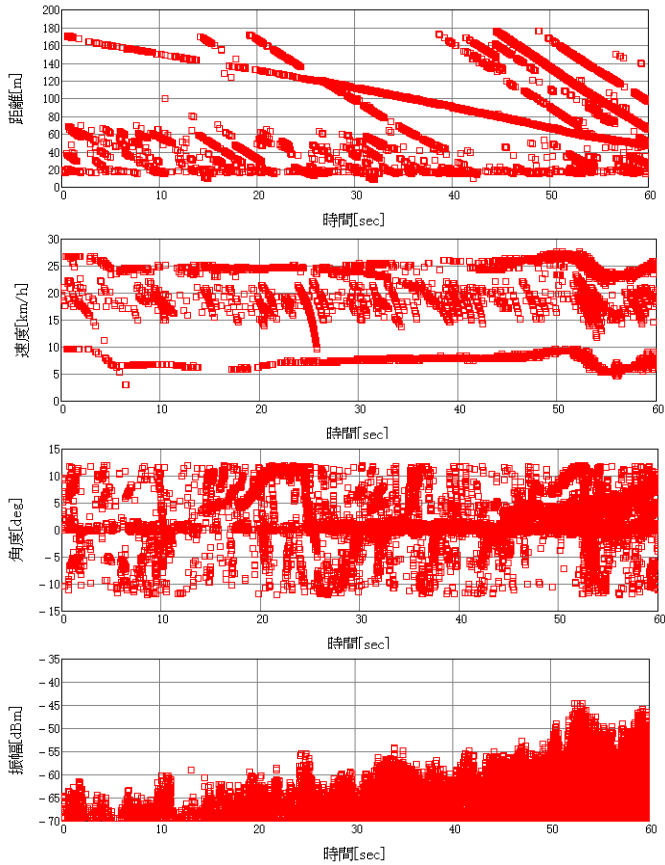


図 8. raw データ (遠距離先行車両追従実験)

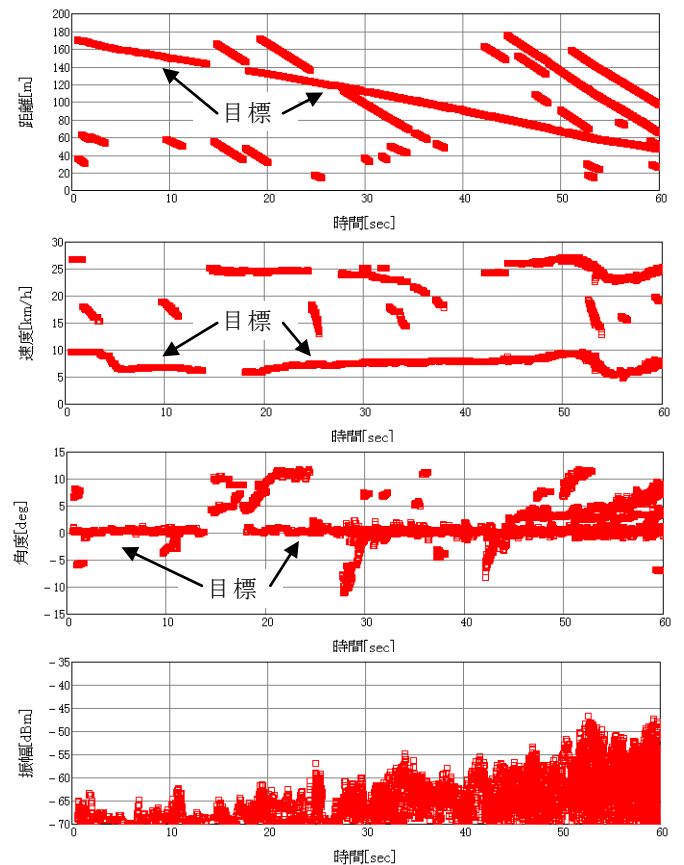


図 9. 多目標追尾処理結果(遠距離先行車両追従実験)



図 10. 自動車搭載図



図 11. 実験風景（中距離先行車両追従実験）

中距離先行車両追従実験および遠距離先行車両追従実験では、自車速度 30km/h、先行車両 20km/h より、レーダで得られる先行車両の相対速度は 10km/h 付近となる。先行車両は自車のほぼ正面を走行しているため、角度は 0deg 付近となる。NN アソシエーションにより雑音など突発的に発生する検知データを除去し、追尾目標の距離・速度・角度を平滑化している。中距離先行車両追従実験では、計測開始距離 70m に対し、65m 付近から追尾している。また、遠距離先行車両追従実験では、計測開始距離 180m に対し、170m 付近から追尾している。

目標以外の反射波は地面や建物などの静止物であり、コヒーレント性が強いことため追尾が確立している。静止物は自車速度付近のドップラ周波数で観測されるため、自車速度が既知であれば、静止物の抑圧はある程度可能である。また、静止物を追尾しても観測される角度が時間推移とともに広がれば、衝突の可能性のない静止物として判断する。しかし、人物や車の横切りを観測する場合は、レーダにより得られる速度が自車速度付近となり誤って静止物と判断する可能性がある。そこで、観測される角度が時間推移とともに狭くなる（正面になる）ときは人物や車の横切りにより衝突の危険があると判断することなどが期待される。

5. むすび

本稿では、多周波ステップ CPC ミリ波レーダを用いて、一般的な市街地・高速道路を想定した道路環境において先行車両追従実験を実施した。多周波ステップ CPC ミリ波レーダより取得した距離、速度、角度が紐付けされている検知データに対し、NN アソシエーションを用いた先行車両追尾を行った。

NN アソシエーションにより、雑音など突発的に発生する検知データを除去し、中距離(65m)および遠距離(170m)の先行車両を計測開始距離相当から追尾することを実験的に確認した。今後の予定としては人物や車などの横切りなどの運動にも対応した目標追尾を行う予定である。

本研究の一部は、鉄道・運輸機構 基礎研究制度 (No.2009.02) により行われた。

文 献

- [1] 稲葉敬之, “多周波ステップ ICW レーダによる多目標分離法”, 電子情報通信学会論文誌(B), vol.J89-B No.3, pp.373-383, Mar. 2006.
- [2] 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
- [3] 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
- [4] Masato Watanabe, Takayuki Inaba, Hikaru Tsybota, Takahiro Yano, “Development of Millimeter wave Radar using Stepped Multiple Frequency Complementary Phase Code modulation”, ICSANE2011-81, Oct.2011.
- [5] Shor, M. and Levanon, N., “Performances of Order Statistics CFAR”, IEEE Trans. on AES, Vol. AES-27, No. 2, pp. 214-223, March 1991
- [6] S.S. Blackman, “Multiple Target Tracking with Radar Applications”, Artech House, Dedham, 1986.
- [7] P.L. Bogler, “Radar Principles with Applications to Tracking System”, John Wiley & Sons, New York, 1990.
- [8] 石井健一郎, 上田修功, 前田英作, 村瀬洋 “わかりやすいパターン認識” オーム社(1998)