

多周波ステップ CPC レーダ及び機械学習アルゴリズムを用いた 車両と歩行人物認識のための短時間特徴量

中村 真帆[†] 渡辺 一宏[†] 秋田 学[†] 渡辺 優人[†] 稲葉 敬之[†]

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

E-mail: [†]nakamura.maho@inabalab.ee.uec.ac.jp

あらまし 多周波ステップ CPC(complementary phase code) レーダによる極短時間 (1CPI~30ms x 8CPI) の高分解能計測から車両及び歩行人物の認識技術の開発のために特徴量の検討を行ったので報告する. 開発中の特定小電力規格である多周波ステップ CPC レーダ計測により高分解能な距離-速度マップが得られ, 従来のレーダに比較して車両や歩行人物目標のより詳細な運動特徴や強度特徴を得ることができる. 本研究では歩行人物目標及び車両目標の距離-速度マップ形状や強度分布等から複数の短時間特徴量を開発した. 本技術により, 悪天候や暗闇等の環境変化に左右されずかつ動画等と比較して極短時間で計測を行える高分解能レーダを用いた歩行者と車両の分離認識が可能となるなどの応用が考えられる.

キーワード ミリ波レーダー, 車両認識, 歩行者認識, 機械学習アルゴリズム

Study on very short time feature quantities for the pedestrian recognition with cars using Multiple Frequency Stepped Radar with Complementary Phase Code and machine learning algorithms

Maho NAKAMURA[†] Kazuhiro WATANABE[†] Manabu AKITA[†] Masato WATANABE[†] and Takayuki INABA[†]

[†]The University of Electro-Communications 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585 Japan

E-mail: [†]nakamura.maho@inabalab.ee.uec.ac.jp

Abstract We report about a study on very short time feature quantities for the pedestrian recognition with cars using Multiple Frequency Stepped Radar with Complementary Phase Code and machine learning algorithms. The features are calculated from the features of shapes on Range-doppler velocity (RV) maps and the power distributions of RV maps and so on. This study will provide applications for the short time radar recognition even in the bad weather or dark place comparing with recognitions using cameras or movies.

IEICE (The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers) provides a word template file for the Technical Report of IEICE.

Keywords Millimeter-wave radar, Recognition, Machine learning, Support vector machine

1. ミリ波レーダによる目標計測

1.1. 多周波ステップ CPC レーダ

多周波ステップ CPC レーダ[1][2]は特定小電力規格に適合する小型レーダでありながら Complementary Phase Code (CPC) で符号化した 8 ステップの周波数変調された信号を送信に用いており, 受信信号にパルス圧縮及びパルスドップラフィルタを施すことで遠距離性を確保しつつ, 高分解能な距離・速度 (RV) 計測を行うことを可能にした. 本レーダの諸元及び計測時の距離, 速度の分解能は以下の通りである.

表 1 レーダ諸元

周波数 f [GHz]	60.5
ステップ間周波数差 Δf [MHz]	26.25
周波数ステップ数 N	8
Tchip [nsec]	12.5
符号長	16
パルス幅 T_p [μ s]	0.2
パルス数 M	512
ベースバンド信号帯域幅	80

B[MHz]	
観測時間 (1CPI) Ts [msec]	28.672
距離分解能 [m]	0.117
速度分解能 [kph]	0.311

1.2. 距離-速度ドップラー (RV) マップ

前節に示した信号処理により、距離 (Range) と速度ドップラー (Doppler Velocity) の計測から、高分解能な RV マップを得ることができる。多周波ステップ CPC レーダによる RV マップは目標からの多数の反射点を含んでおり、目標の運動や剛体性などの特徴が距離やドップラー速度の広がり方によって得られる。このような目標に特有の形状や強度情報などを数値化して特徴量として用いることで機械学習アルゴリズム (サポートベクターマシン[3], アンサンブル学習等[4]) を用いた認識技術に応用することができる。

2. 特徴量

RV マップの形状特徴や強度特徴は目標毎に異なるため、全体が剛体的特性を持つ車両と部位ごとに速度の異なる歩行人物を分離するための良い特徴量となることが期待できる。以下に、特に車両目標と歩行人物目標について、RV マップに現れる各特徴を述べる。

2.1. RV マップ 形状特徴 (車両)

RV マップに現れる目標の反射形状は、同じ目標であっても目標の進行方向によって異なってくる[5]。ここでは路上での代表的な条件として、車両がレーダに向かって対向してくる場合と、レーダの正面方向に対して横切る場合の二つの条件について考える。二つの条件の大きな違いとして注意しなければならないのは、対向条件の場合では計測される速度ドップラー (軸線方向の相対速度) は、目標が車両かどうかの重要な情報となる一方で、横切り車両の場合には相対速度の値が、例えば対向で歩いてくる歩行人物と同程度になってしまうという点である。そこでドップラー速度そのものに依存しないような特徴量を開発する必要がある。ここではまず車両の運動特徴からどのような RV マップ形状となるかを考える。

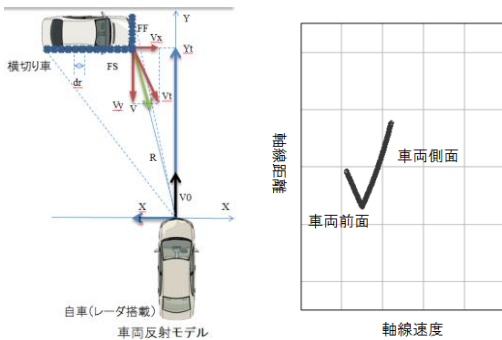


図 1 横切り車両の場合に期待される RV マップ形状

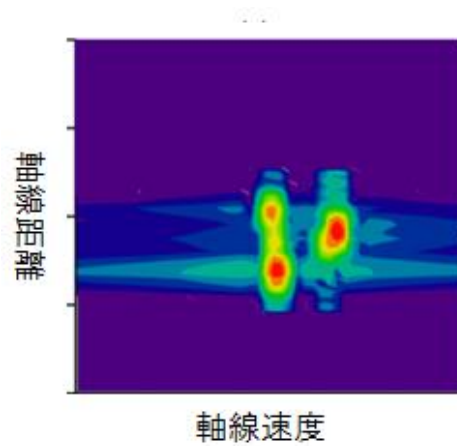


図 2 車両 RV マップの一例

車両からの反射を車両側面からと全面からの二つの反射面を考えると、計測によって得られる RV マップは横切り車両の場合に図 1 右のような形状となることが期待される。図 2 に実際の横切り車両計測 (レーダは車載とする) による RV マップの一例を示す。

ドップラー速度の広がりには相対速度に依存するものの、一般的には逆レ点のような形状となることがわかる。また車両はある程度の大きさ (~数 m) を持つため距離方向の広がりも大きい。

2.2. RV マップ 形状特徴 (歩行人物)

歩行人物の場合の RV マップ形状は、目標の進行方向での差が特に顕著となる[6][7][8][9]。車両と同様に代表的な条件として、歩行人物がレーダに向かって対向してくる場合と、レーダの正面方向に対して横切る場合の二つの条件について考える。特に対向条件のときには腕や足の振りの方向が、レーダの視線方向に近づくため、とくにドップラー速度の広がりが大きくなり、反対に横切り方向では視線方向の速度変化が小さくなるためにドップラー速度の広がりほとんどなくなってしまふという特徴がみられる。特徴的である対向条件においても、計測の瞬間の歩行ポーズによってはドップラー広がり期待できない場合もあり、単純ではない[10][11]。なお、対向と横切り方向の間の角度のある進行方向の場合、ドップラー広がり形状が横切り方向に近づくにしたがって徐々に広がり少ない形状に近づく。

以上の考察より、少なくとも歩行人物の対向条件の場合に重要な特徴量としてドップラー bin 方向の広がり と距離 bin 方向の広がり の比率を (`binwidth_dev_ratio`) として特徴量の一つとする。これを算出するために、まず最大反射強度点を中心として、Rbin 方向及び Vbin 方向のある閾値以上の強度を持つ bin 数を数える (図 3,4 下段)。各 bin の数を plot すると、最大強度点を中心とした bin 数の分布とみることができる。そこでこ

の分布を確率分布とみなし、正規分布からの隔たりを数値化できる標準偏差、尖度、歪度を算出し特徴量とする (Rbin_width_dev, Rbin_width_kurt, Rbin_width_skew 等). またドップラー方向の bin 数, Rbin 方向の bin 数そのものの標準偏差、尖度、歪度も特徴量として扱う. 表 2 に上記の考えによって考案した特徴量の一覧を示す.

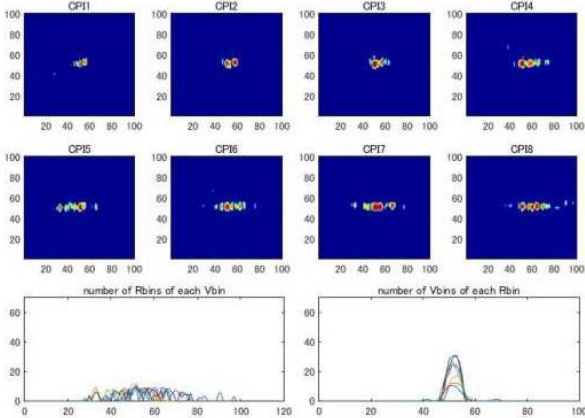


図 3 歩行人物 (対向方向) の一回の計測 (240ms) から得られる 8cpi 分の RVmap の変化 (上 2 段) と最大強度点での Rbin 方向 (下段左) 及び Vbin 方向 (下段右) の 8cpi 分の反射点数

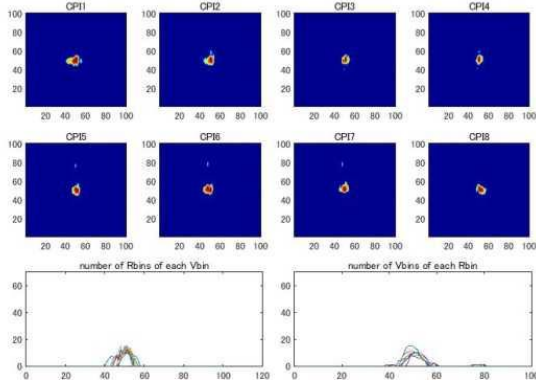


図 4 歩行人物 (横切り方向) の一回の計測 (240ms) から得られる 8cpi 分の RVmap の変化 (上 2 段) と最大強度点での Rbin 方向 (下段左) 及び Vbin 方向 (下段右) の 8cpi 分の反射点数

2.3. RV マップ 強度分布

目標の運動特徴を表す形状のみでは、前節で述べたように進行方向の依存性等があるため、どのような条件においても有効な特徴として、RV マップ形状における距離方向、速度方向の目標の反射強度[12]の分布特徴についても前節と同様に強度の頻度分布統計量 (標準偏差や尖度、歪度) を算出し、これらも特徴量とする.

前節で示した bin 数のかわりに各 bin の強度を plot す

ると、最大強度点を中心とした Rbin 方向、Vbin 方向の強度の分布を得ることができる. そこでこの分布を前節と同様に確率分布とみなし、正規分布からの隔たりを数値化できる標準偏差、尖度、歪度を算出し特徴量とする (R_power_dev, R_power_kurt, R_power_skew 等). 形状に関連した特徴量とともにこれら強度分布に関連した特徴量についても表 2 に一覧を示す.

表 2 形状及び反射強度特性に関する開発特徴量

主要特徴量	説明
Vbin_num_dev Vbin_num_kurt Vbin_num_skew	Vbin 数の標準偏差 同尖度 同歪度
Rbin_width_dev Rbin_width_kurt Rbin_width_skew	Rbin の幅標準偏差 同尖度 同歪度
Rbin_num_dev Rbin_num_kurt Rbin_num_skew	Rbin 数の標準偏差 同尖度 同歪度
Vbin_width_dev Vbin_width_kurt Vbin_width_skew	Vbin の幅標準偏差 同尖度 同歪度
binnum_dev_ratio binnum_kurt_ratio binnum_skew_ratio	ビン数標準偏差比 同尖度比 同歪度比
binwidth_dev_ratio binwidth_kurt_ratio binwidth_skew_ratio	ビン幅標準偏差比 同尖度比 同歪度比
R_power_dev R_power_kurt R_power_skew	Rbin 強度標準偏差 同尖度 同歪度
V_power_dev V_power_kurt V_power_skew	Vbin 強度標準偏差 同尖度 同歪度
Rpower_width_dev Rpower_width_kurt Rpower_width_skew	Rbin 強度分布標準偏差 同尖度 同歪度
Vpower_width_dev Vpower_width_kurt Vpower_width_skew	Vbin 強度分布標準偏差 同尖度 同歪度
power_dev_ratio power_kurt_ratio power_skew_ratio	強度標準偏差比 同尖度比 同歪度比
powerwidth_dev_ratio powerwidth_kurt_ratio powerwidth_skew_ratio	強度分布標準偏差比 同尖度比 同歪度比

3. 結果

3.1. 計測条件

認識技術の開発を目的として特徴量の開発及び評価を行うために、実機による数回の計測実験 (図 5, 図 6) を行った. 表 3 に今回報告する特徴量の開発に用いた計測の計測条件とデータ数を示す. 計測はレーダを車載した場合 (車載レーダのイメージ) と地面に

据え置いた場合（交差点等見守りレーダをイメージ）に、それぞれ距離 5m-25m 程度の範囲における車両と歩行人物を目標とした。進行方向はそれぞれに対向した場合と横切り方向に移動する場合の計測を行った。



図 5 多周波ステップ CPC レーダ



図 6 計測風景（車両）

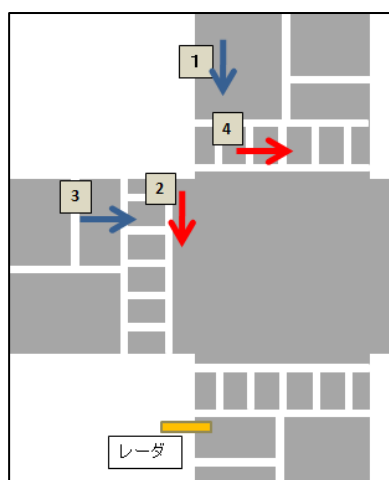


図 7 計測条件のイメージ(1:対向車両, 2: 対向歩行人物, 3 横切り車両, 4: 横切り歩行人物)

以上の計測から、前節で述べた表 2 に示した特徴量を算出する。

表 3 開発に用いた計測条件と計測数 (x8CPI) 一覧

計測条件	目標	距離 [m]	総計測数
レーダ車載	横切り車両	25	7
	対向人物	25	2
	横切り人物	25	2
レーダ静止	対向車両	10,20	6
	横切り車両	10,20	6
	対向人物	5,10,20	43
	横切り人物	10,20	3

3.2. 各特徴量の分離度評価

車両と歩行人物各々から算出される各特徴量について、クラス間の分離度を評価するために、平均値の差分にいくつの標準偏差が入るかを算出する評価指標を σ -index として定義する。 σ -index が 2 前後であればかなり良い分離度であると考えられる。

$$\text{sigma index} = \frac{|\text{ave}(\text{car}) - \text{ave}(\text{human})|}{\text{std}(\text{car}) + \text{std}(\text{human})} \quad (1)$$

表 4 に一例として、本研究での開発特徴量について、横切り車両（車載）と横切り（歩行人物）、対向歩行人物、対向歩行人物（レーダ静止）の組み合わせにおける σ -index の算出結果を示す。

4. 考察

表 4 より、横切り車両（車載）と横切り歩行人物（車載）の組み合わせでは RVmap の形状が似ることなどにより、 σ -index が 2 以上となる特徴量はなかった。横切り車両（車載）と対向歩行人物（車載）の組み合わせでは、Vbin_num_skew (Vbin 数歪度)、R_power_kurt (Rbin 電力尖度) などが、横切り車両（車載）と横切り歩行人物（レーダ静止）の組み合わせでも R_power_kurt (Rbin 電力尖度) などがそれぞれの組み合わせにおいて良い分離度を示した。

今回考案した特徴量の中には、それぞれある計測条件の範囲においては車両と人をよく分離することができるものがあるが、一つの特徴量のみで全ての計測条件において車両と歩行人物を分離できるようなものはなかった。しかし機械学習（サポートベクターマシン等のアルゴリズム）では複数の特徴量を多次元空間として扱えるため、これら全てを入力として用いることで、高い認識率が期待できると考える。

表 4 各計測条件組み合わせにおける各特徴量の σ -index (横切り車両 (車載) との分離度)

特徴量名	σ index 横切り歩行人物 (車載)	σ index 対向歩行人物 (車載)
Vbin_num_dev	0.627	0.228
Vbin_num_kurt	1.004	1.491
Vbin_num_skew	1.202	1.882
Rbin_width_dev	0.757	1.792
Rbin_width_kurt	0.424	0.538
Rbin_width_skew	0.552	0.090
Rbin_num_dev	1.226	1.310
Rbin_num_kurt	0.181	1.565
Rbin_num_skew	0.268	1.588
Vbin_width_dev	1.133	0.249
Vbin_width_kurt	0.086	0.930
Vbin_width_skew	0.199	0.813
binnum_dev_ratio	0.126	2.430
binnum_kurt_ratio	0.365	1.475
binnum_skew_ratio	0.280	2.276
binwidth_dev_ratio	0.513	1.010
binwidth_kurt_ratio	0.114	0.730
binwidth_skew_ratio	0.274	0.283
R_power_dev	0.989	1.621
R_power_kurt	1.442	2.524
R_power_skew	1.299	2.303
V_power_dev	0.330	0.131
V_power_kurt	0.032	0.920
V_power_skew	0.117	0.928
Rpower_width_dev	0.425	1.503
Rpower_width_kurt	0.266	0.125
Rpower_width_skew	0.561	0.018
power_dev_ratio	0.620	1.872
power_kurt_ratio	0.947	0.141
power_skew_ratio	0.871	1.757
Vpower_width_dev	0.408	0.349
Vpower_width_kurt	0.332	0.500
Vpower_width_skew	0.157	0.214
powerwidth_dev_ratio	0.201	1.627
powerwidth_kurt_ratio	0.476	0.167
powerwidth_skew_ratio	0.199	0.134

5. まとめ

多周波ステップ CPC レーダによる高分解能な距離-ドップラー速度計測 (RV マップ) から得られる車両及び歩行人物についての RV マップ形状特徴や強度特徴から特徴量を抽出し、複数の特徴量を入力とする機械学習アルゴリズムでの学習を前提とした評価を行った。評価として特徴量のクラス間の分離度を表す σ -index を定義した。

評価の結果、レーダ車載の場合に横切り車両と歩行人物の対向、横切りとレーダ静止の場合に車両の横切り、対向車両と歩行人物の対向、横切りの条件での計測から抽出した複数の特徴量の分離度を評価したところ、各条件の組み合わせにおいてそれぞれ有効となりうることを確認した。複数の特徴量を多次元空間として機械学習アルゴリズムに適用することで、車両と歩行人物の認識、分類が期待できる。今後はさらに複数の特徴量を検討、開発し、総合的な認識評価を行う。

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, 秋田, 稲葉, 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] 渡辺 優人, 稲葉 敬之, 坪田 光, 矢野 公広, Development of Millimeter wave Radar using Stepped Multiple Frequency Complementary Phase Code Modulation, 信学技報, SANE2011-81, 2011-10.
- [3] Nello Cristianini, John Shawe-Taylor, 大北剛 (訳), サポートベクターマシン入門, 共立出版, 2005.
- [4] C.M. ビンショップ, 元田 浩, 栗田 多喜夫, 樋口 智之, 松本 裕治, 村田 昇 (監訳), パターン認識と機械学習上, 下, 丸善出版, 2012.
- [5] Victor C. Chen, The Micro-Doppler Effects in Radar, Artech House, 2011.

- [6] R. Boulic, N. Thalmann, and D. Thalmann, "A Global Human Walking Model with Real-Time Kinematic Personification," *Visual Computer* 6(6), 1990, pp. 344–358.
- [7] M. Bradley, "A Mathematical Implementation of 'A Global Human Walking Model with Real-Time Kinematic Personification' by Boulic, Thalmann and Thalmann," *Human, Light Vehicle and Tunnel Detection Workshop*, June 16-17, 2009.
- [8] Victor C. Chen, *The Micro-Doppler Effects in Radar*, Artech House, 2011.
- [9] 山田直之, 田中雄一, 西川訓利, "76GHz帯における歩行者の電波反射特性の把握", *信学技報アンテナ・伝播*, 104(203), 1-4, 2004.
- [10] 秋田学, 深町弘毅, 渡辺優人, 稲葉敬之, "2周波CWレーダを用いた歩行人物の特徴量抽出", *電子情報通信学会論文誌 B*, Vol.J97-B, No.8, pp.677-687 (2014年8月)
- [11] 深町弘毅, 稲葉敬之, "2周波CWレーダを用いた人物等の歩行認識", *電子情報通信学会技術研究報告. SANE, 宇宙・航行エレクトロニクス* 111(166), 37-42, 2011-07-22.
- [12] I. Matsunami, R. Nakamura, A. Kajiwara, "RCS Measurements for Vehicles and Pedestrian at 26 and 79GHz" *Proceedings of IEEE International Conference on Signal Processing and Communication Systems, Communication 2012, Australia*, 2012.