

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 車両と歩行人物短時間特徴量と認識評価

中村 真帆[†] 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 レーダによる極短時間 (1CPI=約 30ms, 8CPI) の高分解能計測から得られる車両と歩行人物の短時間特徴量を開発し, 機械学習アルゴリズム (サポートベクターマシン) を用いた認識システムとしての評価を行ったので報告する. 歩行人物目標及び車両目標の距離-速度 map 形状や強度分布の違い等を用いて短時間特徴量を開発したところサポートベクターマシン (2 次カーネル) を用いることで, 実データに対する各条件の組み合わせにおいて 98%以上となる高い識別率を確認した. 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ことを示した.

キーワード ミリ波レーダ, 認識, 機械学習アルゴリズム, サポートベクターマシン

Evaluations of 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 Format of Technical Report (Subtitle) —

Maho NAKAMURA[†] 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 evaluations 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 (support vector machine). 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.

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

1. はじめに

近年, 自動運転の実用化や交差点の見守り等を目的として高性能なレーダ認識技術が求められている. 本研究では, 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て歩行者と車両の分離認識を行うことを目指す. 開発中の特定小電力規格の高分解能レーダである多周波ステップ CPC レーダ[1][2]を用いると極短時間の計測から高分解能な距離-速度ドップラ (RV) map が得られ, 従来のレーダに比較してより目標の性質を表す運動特徴や強度情報を得ることができる. 本研究では RVmap の形状や強度情報などから複数の特徴量を算出し, 機械学習アルゴリズム (サポートベクターマシン[3]) [4]を用いて, 実計測データによって歩行者と車両の分離認識を行い評価する.

2. 多周波ステップ CPC 方式

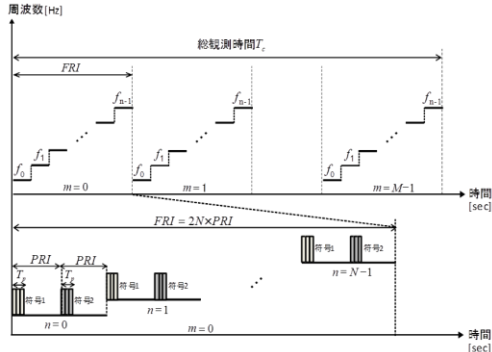
筆者らが提案する多周波数ステップ CPC 方式[1][2]は, CPC パルス圧縮と合成帯域法を複合した新しいレーダ変調方式である[5]. 時分割で2つの相補符号の送信と複数個の送信周波数切り替えを行う. 時分割送信によるドップラシフトに対する位相補正処理を行い, 相補の CPC 受信信号の加算により距離サイドローブを抑圧, さらに, 複数ステップの周波数方向に合成帯域することにより, 送信帯域幅と比較して狭受信機帯域幅で高距離分解能を得る. 図 1(a)に送信シーケンスを示す.

2.1 多周波ステップ CPC 方式の信号処理

図 1(b)にパルス圧縮方式の信号処理ブロック図を示す. 受信信号は, 送信信号とミキシング後 LPF を通過

した後、A/D変換器でサンプリングされる。各PRIの受信信号に対してパルス圧縮方式と同様、パルス圧縮、同一レンジビンに対してパルスドップラフィルタ処理をした後、ドップラによる位相回転を補償する処理、CPCの加算処理を行う。最後に合成帯域処理を施すことにより、狭帯域受信機により送信総帯域幅に相当する距離分解能を有する距離・速度マップを得る。

(a)



(b)

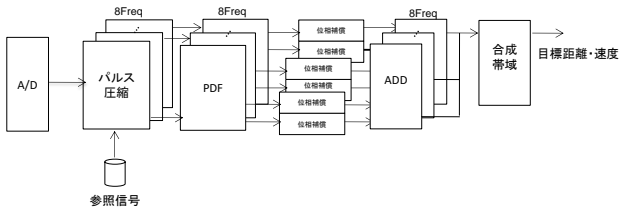


図1. 多周波ステップCPC方式 ((a)送信シーケンスおよび(b)信号処理ブロック図)

2.2 多周波ステップCPC方式の信号処理

2.2.1 パルス圧縮

A/D変換後の受信信号を各CPC符号系列($code=0,1$), 各周波数ステップ($n=0,1,\dots,N-1$), 各パルス($m=0,1,\dots,M-1$), 各レンジビン($s=0,1,\dots,S-1$)に分割された受信信号 $R[code,n,m,s]$ に対して参照信号 $Ref[s]$ (送信パルス波の時間反転複素共役)による畳み込み(パルス圧縮)を行う。

$$PC[code,n,m,s] = \mathfrak{I}^{-1}(\mathfrak{I}(R) \cdot \mathfrak{I}(Ref)) \quad (6)$$

2.2.2 パルスドップラフィルタ

式(6)よりPRI毎に得られるパルス圧縮出力に対して、パルスヒット方向にフーリエ変換を施す。

$$PD[code,n,m,s] = \sum_{k=0}^{M-1} PC[code,n,m,s] \cdot \exp\left(-2\pi j \cdot \left(\frac{m}{M}k\right)\right) \quad (7)$$

2.2.3 位相補償とCPC加算処理

距離サンプル信号に対し、ドップラによる位相回転を補正する位相補償(Phase Compensation)処理を行う。

$$PHC[code,n,m,s] = PD \cdot \exp\left\{2\pi j \frac{m}{2MN \cdot PRI} (s + PRI \cdot (2n + code))\right\} \quad (8)$$

周波数ステップ毎に得られる速度・距離マップについてCPC符号系列の和をとる(CPC加算処理)。

$$ADD[n,m,s] = \sum_{code=0}^1 PHC[code,n,m,s] \quad (9)$$

式(8)および式(9)より、ドップラ位相補償を備えるCPC符号のパルス圧縮より優れた距離サイドローブ特性をもつレンジプロファイルが得られる。

2.2.4 合成帯域処理

CPC加算処理後の距離サンプルについて周波数ステップ方向 n に合成帯域処理(n 方向にIDFT)を行う。

$$SWW[m,s'] = \sum_{n=0}^{N-1} ADD[n,m,s] \exp\left(j \cdot \left(\frac{4\pi \cdot s' \cdot \Delta R}{c} n \cdot \Delta f\right)\right)$$

$$s' = N \cdot s + n \quad (10)$$

ここで、 ΔR は合成帯域後のレンジサンプル幅、 Δf は周波数ステップ幅である。

2.2.5 信号処理利得

多周波数ステップCPC方式はパルス圧縮から合成帯域処理まですべてコヒーレントな信号処理となっており、全処理による信号処理利得 SI (dB)は、

$$SI = 10\log_{10}(P) + 10\log_{10}(M) + 10\log_{10}(2) + 10\log_{10}(N) \quad (11)$$

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 B [MHz]	80
観測時間 (1CPI) T_s [msec]	28.672
距離分解能 [m]	0.117
速度分解能 [kph]	0.311

2.3 距離-速度ドップラ(RV)マップ

前節に示した信号処理により、距離と速度ドップラ計測から高分解能な距離-速度ドップラ(RV)マップを得ることができる。RVマップは目標からの多数の反射点を含んでおり、各反射点の速度ドップラが観測されるため、目標の運動特徴等が距離や速度ドップラの広がり方によって得られる[6][7][8][9]。このような目標に特有の形状や強度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, アンサンブル学習等)を使用した認識技術に応用することができる。

3. 短時間特徴量

3.1 RV マップ形状・強度分布特徴量

著者らはこれまでに RV マップから得られる特徴量としてその形状特徴と強度情報を利用したものを考案した[6][10][11]. とくに歩行人物の対向条件の場合に特徴的となる, 速度ドップラ方向の広がりや距離方向の広がりの比率を主要な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 2 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. また速度ドップラ方向の 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. なおこれらの特徴量は, 1CPI 分の RV マップデータから得られる.

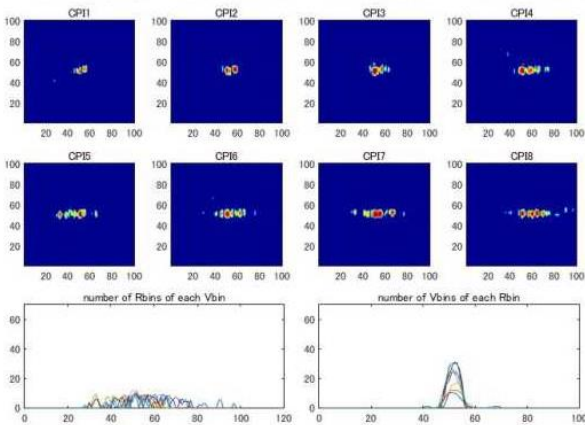


図 2 歩行人物(対向方向)の一回の計測(240ms)から得られる 8cpi 分の RVmap の変化(上 2 段)と最大強度点での Rbin 方向(下段左)及び Vbin 方向(下段右)の 8cpi 分の反射点数

3.2 距離規格化電力(NP), 距離規格化積算電力(NAP)

前節で言及したように, RV マップ形状を利用した特徴量は計測条件に依存する側面がある. そこで RV マップ形状で区別が付きにくい場合にも有効な特徴量として, 反射強度[12][13]に関する特徴量を検討する.

反射強度を距離で規格化したものを距離規格化電力(NP: Normalized Power)として, 特徴量の一つとする[14]. また, すべての反射点について NP を積算したものを距離規格化積算電力(NAP: Normalized Area Power)としてこれも特徴量の一つとする.

$$NP = 10 \cdot \log(Pr \cdot Rest^4) \quad (12)$$

NP は最も強度の強い反射点での算出量であり, NAP は反射点すべての NP の和となる.

NP 及び NAP の算出時には測角によって強度補正を行っている. 受信アンテナは 4 素子から構成されており, これらの位相差からモノパルス測角を行うことでレーダ中心からの距離を推定し, 角度補正する.

$$NAP = 10 \cdot \log \sum_{r=0}^{r \leq Rmax_bin} \sum_{v=0}^{v \leq Vmax_bin} (Pr_{r,v} \cdot Rest_{r,v}^4) \quad (13)$$

$$s.t. \quad 10 \cdot \log(Pr_{r,v}) > NF+13$$

3.3 複数 CPI を用いた特徴量

3.1 節で述べたように, 歩行人物では歩行時のポーズが 1 計測の 8CPI 間でも変化しており, 複数 CPI の時間変化(標準偏差)も特徴量として使用すると, より人間の歩行特徴を表現できる. 本報告では複数 CPI として 3, 5, 8CPI を使用した場合の評価を行う.

3.4 計測条件とデータ

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(図 3)を用いて, 車両及び歩行人物を目標とした計測実験を数回にわたって行った(図 4). 表 2 に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(図 5). 進行方向はそれぞれレーダ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. レーダ中心からの距離はいずれも 6m 以内(25m 地点で視野角 15° 以内)の範囲において移動する瞬間を計測した.



図 3 多周波ステップ CPC レーダ



図 4 計測風景（車両）

表 2. 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

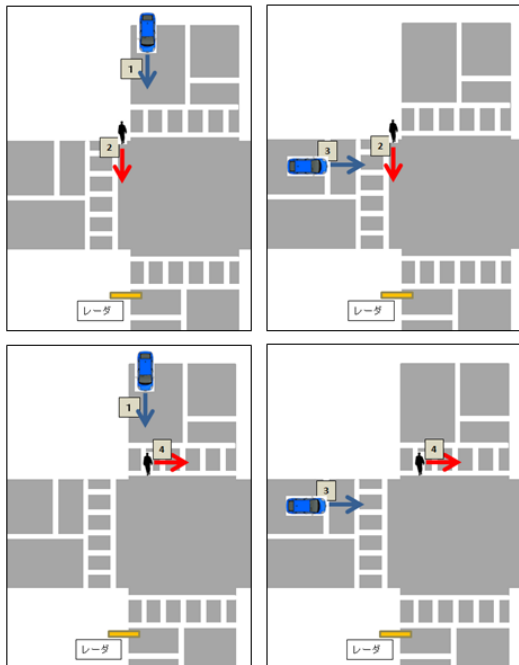


図 5 目標認識において想定する条件の模式図（4パターン）

3.5 機械学習アルゴリズムによる認識処理

3.1~3.4 節で述べた特徴量を用いた学習を行うため

に、認識・分類の得意な機械学習アルゴリズムとして主にサポートベクターマシン[3][4]を用いる。サポートベクターマシンでは多次元空間内のクラス境界である超平面の関数系をカーネル関数という形で定義することができる。カーネル関数はある多次元空間においてクラス間の分類にもっとも適切なものを選べばよい。本研究ではカーネルは 1 次, 2 次, 3 次及び RBF(Gauss 型)カーネル[4]を用いる。

4. 結果

3 節で示した開発特徴量を学習して車両と歩行人物を分類するサポートベクターマシン(Matlab を使用)を用いた認識について表 3~5 に結果を示す。

評価は全データを 5 分割してそのうち 4 つを学習に用いる交差検定を 100 回行い、その平均値を示した。特徴量は 1CPI のみから算出されるもの以外に、3,5,8CPI を用いた特徴量も使用した場合についても学習し、サポートベクターマシンのカーネルは 1 次, 2 次, 3 次及び RBF カーネルを用いた場合の結果をそれぞれ示した。

5. 考察

表 3~5 に示した結果より、単一 CPI のみを使用する場合よりも、複数 CPI を使用する場合のほうが、認識率が 0.5~2% 程度改善することがわかった。

また、横切り車両と横切り歩行人物の条件において RVmap の形状特性などが似るために認識率がやや低い傾向がみられたが、強度特性に関連した特徴量により、そのような場合にもよく認識できている。

6. まとめ

歩行人物目標及び車両目標の距離-速度 map 形状や強度分布の違い等を用いて短時間特徴量を開発したところサポートベクターマシンなどの機械学習アルゴリズムを用いることで、実データに対して 2 次カーネルを用いた場合には全組み合わせで 98% 以上となる高い識別率を確認した。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も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ことを示せたと考える。

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。

表 3. レーダ車載での各計測条件の組み合わせ毎の認識率（レーダ静止）

レーダ静止（計測数）データは計測数*8CPI			使用 CPI 数	線形 SVM	2次 SVM	3次 SVM	RBF SVM
①	対向車両（6）	対向歩行人物（43）	1	99.8	99.8	99.7	99.6
			3	99.9	99.8	99.8	99.6
			5	100	99.8	99.8	99.6
			8	99.9	99.8	99.7	99.6
②	対向車両（6）	横切り歩行人物（3）	1	98.6	98.9	98.9	98.8
			3	99.0	98.9	98.9	98.8
			5	99.5	98.9	98.9	98.8
			8	99.0	98.9	98.9	98.8
③	横切り車両（6）	対向歩行人物（43）	1	97.5	98.6	98.7	98.4
			3	97.5	98.7	98.9	98.6
			5	97.2	98.9	99.0	98.6
			8	98.8	99.2	99.1	98.8
④	横切り車両（6）	横切り歩行人物（3）	1	96.8	97.7	97.9	96.5
			3	97.9	98.3	98.3	96.9
			5	98.3	98.7	99.0	97.0
			8	99.8	100	100	98.3
⑤	対向+横切り車両（12）	対向+横切り人物（46）	1	97.0	98.7	98.6	98.5
			3	96.7	98.9	99.0	98.6
			5	96.9	99.0	99.0	98.5
			8	98.5	99.2	99.1	98.7

表 4. レーダ車載での各計測条件の組み合わせ毎の認識率（レーダ車載）

レーダ車載（計測数）データは計測数*8CPI			使用 CPI 数	線形 SVM	2次 SVM	3次 SVM	RBF SVM
⑥	横切り車両（7）	対向歩行人物（2）	1	100.0	100.0	99.7	99.9
			3	99.8	100	99.8	99.9
			5	99.9	100	100	99.9
			8	100	100	100	99.9
⑦	横切り車両（7）	横切り歩行人物（2）	1	99.6	99.1	97.9	98.8
			3	99.6	99.5	98.8	99.6
			5	99.7	99.8	99.2	98.5
			8	99.8	99.9	99.5	99.8
⑧	対向+横切り車両（9）	対向+横切り人物（4）	1	97.4	98.8	97.6	98.3
			3	98.4	99.0	98.3	98.7
			5	98.8	99.4	99.0	99.1
			8	98.9	99.7	99.4	99.4

表 5. 各計測条件の組み合わせ毎の認識率（レーダ静止+車載）

レーダ静止+車載			使用 CPI 数	線形 SVM	2次 SVM	3次 SVM	RBF SVM
⑨	対向+横切り車両 (21)	対向+横切り人物 (50)	1	96.4	98.0	98.2	98.3
			3	96.4	98.5	98.7	98.7
			5	96.7	98.8	98.9	98.7
			8	97.8	98.9	98.8	98.8

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] 秋田学, 太田裕也, 渡辺優人, 稲葉敬之, 多周波ステップ CPC 方式とパルス圧縮方式の探知距離性能比較実験, 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, SANE2016-49(2016,10).
- [6] 中村真帆, 渡辺一宏, 秋田学, 渡辺優人, 稲葉敬之, 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, 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, 2017, 2月 (発表予定).
- [7] Victor C. Chen, The Micro-Doppler Effects in Radar, Artech House, 2011.
- [8] 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.
- [9] Victor C. Chen, The Micro-Doppler Effects in Radar, Artech House, 2011.
- [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] D. J. Rabideau, "Nonlinear synthetic wideband waveforms," Proceeding of the IEEE International Radar Conference, pp. 212-219, California, USA, Apr. 2002.
- [13] M.I. Skolnik "Introduction to Radar System", McGraw-Hill, New York, 1962.
- [14] 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.