

2周波 CW レーダを用いた歩行人物・小動物の特徴量抽出実験

秋田 学[†] 中村 真帆[†] 渡辺 優人[†] 稲葉 敬之[†]

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

E-mail: [†] akita.manabu@uec.ac.jp

あらまし レーダは光学センサにくらべ耐候性、広角視野などの点で有利であり、簡易な構成のレーダを歩行人物と他物体の識別に利用できる可能性が示されれば、今後の実用化に向けた研究の足掛かりとなる。筆者らは、歩行人物と他物体の識別に、人物の動作認識で用いられる Mean Velocity, Step Frequency, Appendage Ratio に新たに Normalized Power を加えた 2周波 CW レーダを用いた特徴量抽出法を提案し、基礎実験により有効性を検証している。本研究では、上記実験と同条件のもと、被験者の年齢層を 10 歳代未満～70 歳代まで幅広くとり、犬の種類を増やして実験を行い、被験者の年齢、犬種による上記 4 つの特徴量の違いについて考察する。

キーワード レーダ, 2周波 CW 方式, 人物歩行認識, 特徴量抽出

Experimental Study on Feature Values of Human and Animals using 2FCW Radar

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

[†] Graduate school of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications 1-5-1 Choufugaoka, Choufu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

E-mail: [†] akita.manabu@uec.ac.jp

Abstract This paper shows the possibility of use of 2FCW radar to distinguish between walking human and other targets. Authors have considered using Normalized Power which is calculated by the received power and the range information associated with the target adding to the conventional feature values for distinguishing targets. We conducted an experiment in which human and dog come close to the radar. The human targets are chosen from wide range of age groups and animal targets are composed of different kind of dogs. The dependence of feature value on the age of human and kind of dog are investigated for the possibility of depict more detail information such as age and species of human and dog targets, respectively.

Keywords 2 frequency CW, human gait analysis, Feature-Extraction

1. まえがき

人物と他物体の識別については、光学センサを用いた研究がなされている。人物と他物体の識別において、光学センサにくらべ耐候性に優れ、広角視野などの点で有利であり、さらにレーダ方式のうち簡易な構成で実現可能なレーダ方式を利用できる可能性が示されれば、今後の実用化に向けた研究の足掛かりとなる。レーダを用いた人物歩行認識、歩行人物（以下、人物）の身長推定、人物と他物体との識別に関して主に無変調 CW を用いた研究成果が報告されている [1]-[6] が、人物と小動物の識別については課題が残るとされている。そこで、距離を測定可能なレーダ方式を用いて、目標からの受信電力と距離から算出される Normalized Power（目標からの受信電力を距離 1m に規格化したもの）が、レーダ反射断面積（RCS）の異なる目標識別に対して有効であると考えられる。観測目標までの距離計測が可能なレーダ方式としてパルスレーダやパルス圧縮レーダなどが挙げられるが、信号処理負荷、またコストの面で課題がある。目標までの距離測定が可

能なレーダ方式のうち低速の信号処理で実現可能かつコストの面で有利なレーダ方式として FMCW 方式と 2周波 CW 方式があげられる。FMCW 方式は複数の目標が存在する環境下ではペアリング誤作動、静止物が多く存在する環境下では目標物以外の静止物による受信電力のスペクトルが目標のスペクトルに重畳するという課題がある [8]。一方、2周波 CW 方式では、静止物によるドップラスペクトルが直流成分となるため静止物と移動物を速度により分離可能なわちクラッタの影響を抑圧でき、またその距離の観測精度が周波数帯域幅ではなく S/N により決まる [9]。静止物が多数存在する環境下で、比較的近距离の範囲を検知対象とした場合のレーダ変調方式として適合性に優れるので、筆者らは、2周波 CW 方式に基づく目標識別法に関する検討を進めており、これまでに基礎実験結果を報告 [10] しており、レーダに対して人物、自転車および犬が直進するという基本的な条件のもとで、1.5 秒程度の観測時間で人と自転車、人と犬ともに 95% 以上の識別結果を得ている。上記基礎実験では、被験者の年齢

構成が 20 歳代に限定されていた。また、犬については一種類のみの計測となっていた。そこで本研究では、上記実験と同条件のもと被験者の年齢層を 10 歳代未満～70 歳代までとし、犬を一種類から小型犬と大型犬に種類を増やして実験を行う。人物の年齢や犬種による特徴量の違いが得られれば、同種の目標についてのさらなる詳細な識別が見込まれるため、本研究では人物の年齢および犬種による特徴量の違いについて考察する。

2. 2 周波 CW 方式を用いた対象物の検知および特徴量抽出法

2.1 2 周波 CW 方式を用いた対象物の検知

2 周波 CW 方式は、まず目標を速度で分離可能であり、本研究で想定される静止物（地面や建物などのクラッタ）が多数存在するという環境下においても、目標の測距測速が可能である。本方式は少しだけ離れた 2 つの周波数 f_1 、 f_2 を周波数切り替え時間 T で時分割にて交互に送信し、観測時間 T_c （1CPI）内で M 回繰り返すシーケンスから構成される。

2 周波 CW 方式では周波数 f_1 の区間では f_1 、 f_2 の区間では f_2 のローカル信号でミキシングし、LPF（Low Pass Filter）通過後のビート信号を得る。周波数 f_1 、 f_2 のビート信号は式(1)、式(2)のようになる。

$$Beat_{f_1}(t) = \exp\left\{j\left[2\pi\left(\frac{2v}{c}f_1t - \frac{2R}{c}f_1\right)\right]\right\} \quad (1)$$

$$Beat_{f_2}(t) = \exp\left\{j\left[2\pi\left(\frac{2v}{c}f_2t - \frac{2R}{c}f_2\right)\right]\right\} \quad (2)$$

ここで、 v はレーダに対する目標の相対速度、 R はレーダと目標の距離、 c は光速、 t は時刻である。ここで、 f_1 と f_2 の差は微小であるため、 $2vf_1/c \approx 2vf_2/c$ である。式(1)、式(2)のビート信号に対し、時間方向に離散フーリエ変換を行い、速度 v を検出し、その位相 ϕ_1 、 ϕ_2 を用いて式(3)より、位相差 $\phi_2 - \phi_1$ から距離 R を求める。

$$R = \frac{c(\phi_2 - \phi_1)}{4\pi(f_2 - f_1)} \quad (3)$$

2 周波 CW 方式の距離視野 R_{\max} （位相のアンビギュエティが発生しない最大距離）は式(3)の位相差が $\phi_2 - \phi_1 = 2\pi$ のときであるので式(4)のようになる。

$$R_{\max} = \frac{c}{2(f_2 - f_1)} \quad (4)$$

また、速度分解能 δV 、速度視野 V_{\max} はそれぞれ観測時間および周波数切り替え時間で決まり、式(5)、式(6)のようになる。

$$\delta V = \frac{c}{2f_1T_c} \left(\cong \frac{c}{2f_2T_c} \right) \quad (5)$$

$$V_{\max} = \frac{c}{4f_1T} \left(\cong \frac{c}{4f_2T} \right) \quad (6)$$

本実験では、筆者らの研究グループが開発し、総務省が定める 24GHz 特定小電力無線局規格に準拠し、ソフトウェアにより任意の送信波形を生成することが可能なソフトウェアレーダを使用し、2 周波 CW 方式のレーダパラメータは文献[10]と同一とする。

2.2 2 周波 CW 方式を用いた対象物の特徴量抽出

人物の歩行時は胴体と脚、肩、腕などの各部位からの反射波が複雑に重なり合う多重波として計測される。そこで 2 周波 CW レーダ方式を用いて得られた観測時間 T_c の計測区間の計測信号が N 個から構成される総観測時間 $N \cdot T_c$ の f_1 、 f_2 の計測データ $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ は式(7)で表される。

$$x_1(t) = \sum_k A_k \exp\left\{j\left[2\pi\left(\frac{2v_k(t)}{c}f_1t - \frac{2R_k(t)}{c}f_1\right)\right]\right\} \quad (7)$$

$$x_2(t) = \sum_k A_k \exp\left\{j\left[2\pi\left(\frac{2v_k(t)}{c}f_2t - \frac{2R_k(t)}{c}f_2\right)\right]\right\}$$

ここで、 $x(t)$ は周波数 f_1 または f_2 における人物の各部位の多重反射波であり、 k は体の各部位の番号、 A_k は k 番目の部位の振幅、 $R_k(t)$ と $v_k(t)$ はそれぞれ k 番目の部位の時刻 t における距離、速度を表し、同一の CPI では一定であると仮定する。

計測データ $x(t)$ について時間ドップラ周波数解析を行うために、本論文では式(8)に示す短時間フーリエ変換（STFT：Short-Time Fourier Transform）を採用する。

$$\text{STFT}(t, f_d) = \int x(\tau)w(\tau - t)\exp(-j2\pi f_d \tau) d\tau \quad (8)$$

f_d はドップラ周波数, $w(t)$ は窓関数であり, 本論文では窓関数としてハミング窓を採用する. ここで, τ は窓関数内の時刻である. 周波数 f_1 および f_2 のビート信号に対して式(8)の STFT を適用すると, 図 1 のように横軸が時間, 縦軸がドップラ周波数 (速度), 色の電力を表すスペクトログラムを得る. 図 1 は人物歩行および犬の歩行時の計測データのスペクトログラム ((a)10 歳未満男性, (b)30 歳代男性, (c)70 歳代女性, (d)大型犬) であり, 胴体や手足の各部位の規則的な周期信号から構成されてい

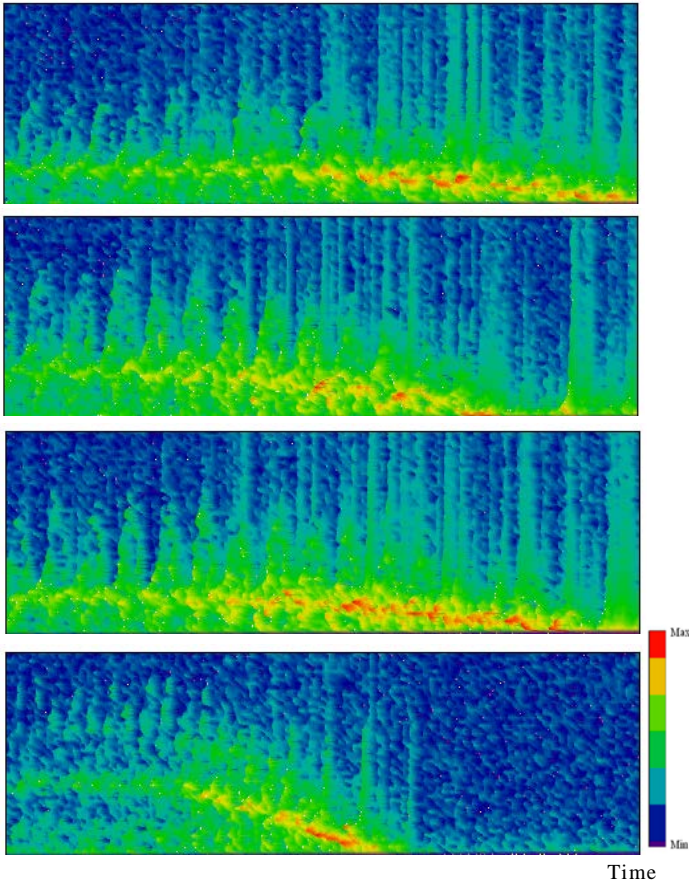


図 1. スペクトログラムの例

((a)10 歳未満男性, (b)30 歳代男性, (c)70 歳代女性, (d)大型犬))

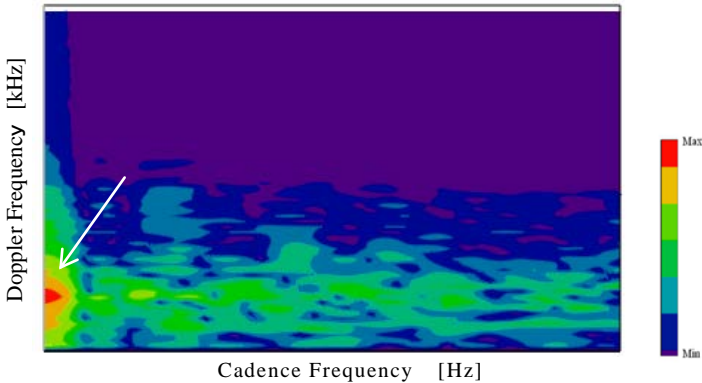


図 2. 歩行人物のカデンス-ドップラ周波数マップ

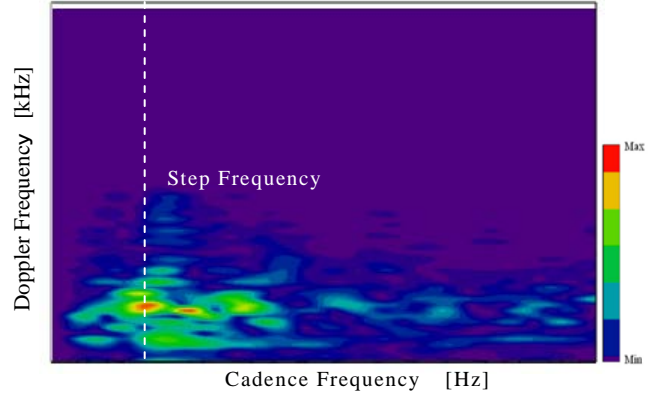


図 3. 平均電力減算処理後の振幅マップ

ることが確認される.

2.2.1 Mean Velocity

式(9)に従い, 図 1 のスペクトログラムの各ドップラ周波数に対して時間方向に離散フーリエ変換を行い, 出力される振幅マップの出力を振幅で色付けして図 2 示す.

$$AMP(f_c, f_d) = \int STFT(\tau, f_d) \exp(-j2\pi f_c \tau) d\tau \quad (9)$$

図 2 の縦軸は図 1 と同様にドップラ周波数, 横軸は: Cadence Frequency となる. ここで Cadence Frequency とはある速度成分の単位時間当たりの発生数である. Cadence Frequency 軸 0Hz での最大電力となるドップラ周波数 から得られる目標の速度を Mean Velocity (MV) として抽出する (図 2 中の矢印). これは, 観測目標の各部位のうち, 周期的な速度変化がなく一定速度である部分の速度に対応する (歩行人物のケースでは主に胴体部分).

$$MV = \arg \max_{f_d} |AMP(0, f_d)| \quad (10)$$

ここで, 誤検知を防ぐために (誤検知率 10^{-6} 以下), ノイズレベルより 13dB 以上大きいときのみ抽出を行う [11].

2.2.2 Step Frequency

Step Frequency (SF) とは単位時間あたりの手足等各部位 (人物の歩行時では主に大腿部) の速度の発生数である. 図 2 から Cadence Frequency の 0Hz 付近は電力が高いため, 図 1 のスペクトログラムにおいて各ドップラ周波数における平均電力を減算後, 時間方向に離散フーリエ変換すると平均電力減算処理後の振幅マップ $AMP_w(f_c, f_d)$ (図 3) を得る. 図 3 において縦軸のドップラ周波数 (速度) 軸の式(10)で算出した Mean Velocity を除いたドップラビンを加算し, 最大電力となった Cadence Frequency f_c を

Step Frequency (SF) とする.

$$SF = f_{c,SF} = \arg \max_{f_c} \left(\sum_{m \neq MV} |AMP_w(f_c, f_d(m))| \right) \quad (11)$$

2.2.3 Appendage Ratio

Appendage Ratio(AR)とは胴体と手足等各部位の電力の比である. 胴体の電力は Mean Velocity に対応するドップラ周波数における電力, 手足等の電力は Step Frequency を用いてドップラ周波数 (速度) 軸の Mean Velocity を除いたドップラビンを加算し電力とした. よって Appendage Ratio(AR)は以下の式(12)のようになる.

$$AR = 10 \log \left[\frac{|AMP(0, MV)|}{\sum_{m \neq MV} |AMP(SF, f_d(m))|} \right] \quad (12)$$

2.2.4 Normalized Power

Normalized Power (NP) とは 2 周波 CW 方式から得られる距離情報を用いることで距離 1m に規格化した最大受信電力 (胴体の電力) である. レーダ方程式はより受信電力は式(13)のように表される.

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (13)$$

ここで P_r は受信電力, P_t は送信電力, G はアンテナ利得, σ はレーダ反射断面積, R はレーダと目標間の距離, λ は波長である. ここで, 2 周波 CW 方式から得られる推定距離 R_{est} を式(3)により算出し, 式(13)の受信電力を距離 1m に規格化する.

$$NP = 10 \log(P_r \cdot R_{est}^4) = 10 \log \left[\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3} \right] \quad (14)$$

3. 実験と考察

本実験では, 文献[10]における実験と同様に地面からの高さ 0.45m に設置したホーンアンテナを使用する. 表 1 に示すような年齢層および性別の内訳で男性と女性の合計 49 人の人物に対して各 5 回ずつ(合計それぞれ 245 データ)距離約 10m からレーダ装置に向かって等速で直線的に歩いて近づく条件で計測した. なお, 計測にあたり, 被験者には「普通に」歩くよう指示している. また犬については, 大型犬, 小型犬ともに距離 10m から同様にレーダ装置に向かって近づく状

表 1. 実験における被験者の年齢構成

年齢層	被験者数
10 歳未満	3 名 (男性 1 名, 女性 2 名)
10 歳以上 19 歳以下	4 名 (男性 2 名, 女性 2 名)
20 歳以上 29 歳以下	4 名 (男性 2 名, 女性 2 名)
30 歳以上 39 歳以下	8 名 (男性 4 名, 女性 4 名)
40 歳以上 49 歳以下	4 名 (男性 2 名, 女性 2 名)
50 歳以上 59 歳以下	7 名 (男性 6 名, 女性 1 名)
60 歳以上 69 歳以下	9 名 (男性 7 名, 女性 2 名)
70 歳以上 79 歳以下	10 名 (男性 3 名, 女性 7 名)

況で各 20 回ずつ計測した. 犬のケースでは人物のケースと比較して直線的でない動きと等速でない運動が含まれている. 人物および犬の各特微量は, アンテナ設置高とビーム幅, マルチパスの影響を考慮して目標がアンテナから距離 7.0m の地点を通過後の 1.5 秒間の観測データを用いて算出する[10][12]. 表 2 に, 人の各年代別および犬の犬種別の MV, SF, AR, NP を算出した結果の平均値および標準偏差を示す. 図 4 に, 10 歳未満, 30 歳代, 60 歳以上の人の各特微量, 図 5 に犬の犬種別の各特微量のヒストグラムをそれぞれ示す.

Mean Velocity について, 人において, 年齢が高くなるにつれて平均値が大きくなり, 30 歳代をピークに, その後は年齢が上がるにつれて減少する傾向があることが確認される. これより, 人の年代を判別するのに有効な特微量のひとつであると思われるまた, 犬の Mean Velocity は人に比べて, 全体的に大きい値をとつ

表 2. 各年代別および犬の犬種別の MV, SF, AR, NP

目標種別	内訳	MV [km/h]	SF [Hz]	AR [dB]	NP [dB]
人	10 歳未満	3.64 (0.65)	2.29 (0.26)	18.73 (3.09)	-14.37 (1.32)
	10 歳代	3.82 (0.48)	1.96 (0.44)	18.57 (2.85)	-14.47 (0.97)
	20 歳代	4.02 (0.52)	1.93 (0.18)	18.93 (3.42)	-14.41 (0.97)
	30 歳代	4.21 (0.44)	1.97 (0.28)	19.24 (3.08)	-13.65 (0.80)
	40 歳代	4.17 (0.52)	1.93 (0.25)	18.54 (2.86)	-14.38 (1.31)
	50 歳代	3.89 (0.39)	1.89 (0.29)	19.31 (3.40)	-14.00 (2.15)
	60 歳代	3.76 (0.44)	1.97 (0.30)	19.55 (3.84)	-14.43 (1.63)
	70 歳代	3.93 (0.38)	2.12 (0.36)	18.67 (3.69)	-14.45 (0.90)
犬	小型	5.77 (1.94)	1.49 (0.14)	13.54 (2.82)	-31.23 (1.97)
	大型	5.61 (0.84)	1.94 (0.49)	14.33 (3.39)	-25.82 (1.44)

ていることが分かる。したがって、人と犬の分離に有効な特徴量となりうるということがわかる。

Step Frequency について、人において、10歳未満が他の年代と比較して、大きい傾向が見られ、10歳代以降は全年齢を通して大きな差は見られない。これより、

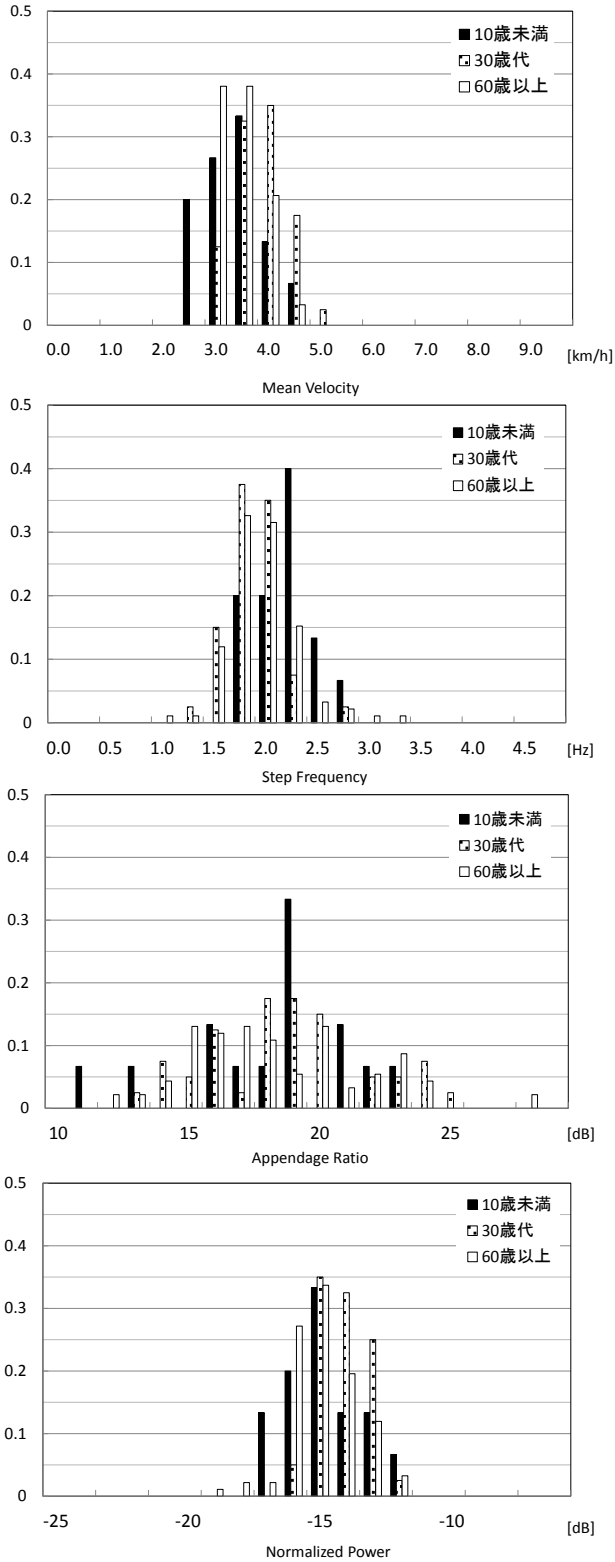


図 4. 10歳未満, 30歳代, 60歳以上の各特徴量のヒストグラム

人の年代(子供)を判別するのに有効な特徴量であることが示唆される。

Appendage Ratio について、人の平均値が 18.9dB であるのに対し、大型犬で 14.3dB, 小型犬で 13.5dB と有意な差が見られる。一方で、人の年代別の平均値に

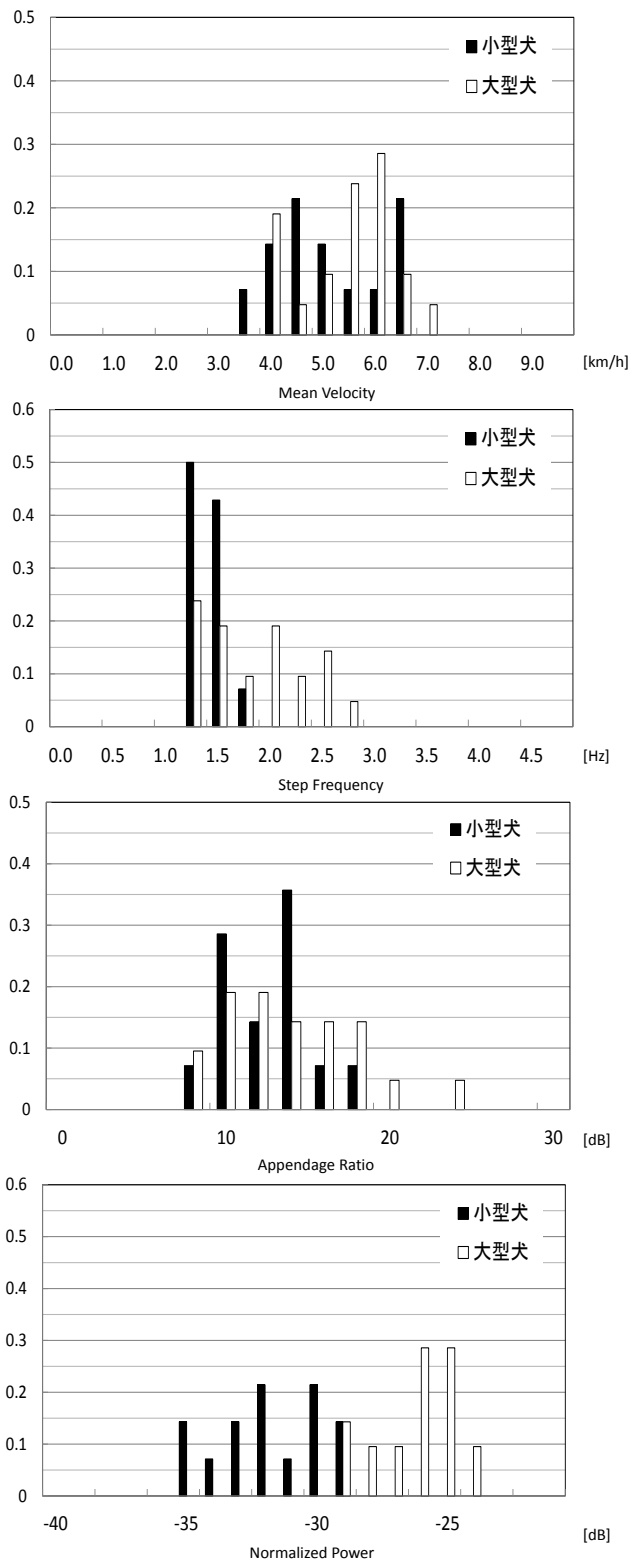


図 5. 犬種別の各特徴量のヒストグラム

は大きな差は認められず、また小型犬と大型犬の差も 0.8dB にとどまっている。Appendage Ratio は胴体と手足等の電力の比である。人と犬では、胴体と手足等の部位の大きさの比が異なるため、これが差となって表れることが実験的にも確認される。このため、Appendage Ratio は目標の種別の判別に有効であると思われる。

Normalized Power については、人において、30 歳代が最も大きな値となっている。犬においては、大型犬と小型犬で 5.4dB の差が確認される。これより、犬の犬種を判別するのに有効な特徴量であると思われる。また、人と大型犬で約 10dB、人と小型犬では、約 17dB の差があることが確認される。文献[10]でも示されるように、NP は人と犬の分離において有効な特徴量であることが本実験においても確認される。

4. まとめと今後の課題

筆者らが提案し、基礎実験において有効性を示している 2 周波 CW 方式に基づく特徴量抽出について、文献[10]における基礎実験では、被験者の年齢構成が 20 歳代に偏った構成であり、犬についても一種類のみの計測となっていた。そこで本研究では、同条件のもと被験者の年齢層を 10 歳代未満～70 歳代まで幅広くとり、犬に関しては小型犬と大型犬を目標として人物の年齢分布、犬種による特徴量の違いについて考察した。

その結果、Mean Velocity について、人においてはその均値は年齢が高くなるにつれて大きくなり、30 歳代をピークに、その後は年齢が上がるとともに減少する傾向となる結果が得られた。人の年代を判別するのに有効な特徴量のひとつとなりうることが考えられる。Step Frequency について、人において、10 歳未満が他の年代と比較して、大きい傾向が見られ、人の年代（子供）を判別するのに有効な特徴量であることが示唆される Appendage Ratio について、人と犬で 5dB と有意な差が見られる一方で、人の年代別の平均値に大きな差は見られず、小型犬と大型犬の差も 0.8dB にとどまっており、Appendage Ratio は目標の種別の判別に有効な特徴量であることが実験的に確認された

Normalized Power については、大型犬と小型犬で 5.4dB の差が確認される。これより、犬の犬種を判別するのに有効な特徴量であると思われる。今後の課題として、これらの特徴量を用いて、同種の目標内におけるさらに詳細な識別（人の年代や犬の犬種）を行うことがあげられる。

謝辞

本稿に示す研究内容は、科研費 A「自立型・協調型統合化自動走行システムの基盤技術に関する研究」により実施されたものである。

文 献

- [1] B. Lyonnet, C. Ioana, M.G.Amin, "Human gait classification using microDoppler time-frequency signal representations", Proceedings of Radar Conference 2010 IEEE, pp.915-919, Washington DC, U.S.A., 2010
- [2] S. Bjorklund, T.Johansson, H.Petersson, "Evaluation of a micro-Doppler classification method on mm-wave data", Proceedings of Radar Conference 2012 IEEE, pp.0934-0939, Washington DC, U.S.A. 2012
- [3] F.H.C. Tivive, A.Bouzerdoum, M.G.Amin, "Automatic human motion classification from Doppler spectrograms Cognitive Information Processing", 2010 2nd International Workshop on Cognitive Information Processing, pp.237-242, Elba, Italy, 2010
- [4] C. Hornsteiner and J. Detlefsen "Characterisation of human gait using a continuous-wave radar at 24 GHz", Advances in Radio Science, 6, pp.67-70, 2008
- [5] T. Dogaru, C. Le, and Getachew Kirose, "Time-frequency analysis of a moving human Doppler signature", U. S. Government, 2011
- [6] M. Otero "Application of a continuous wave radar for human gait recognition" Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition XIV, vol.5809, pp.538-548, 2005
- [7] 稲葉敬之, 平井俊, "FMICW レーダにおける移動目標検出法", 電子情報通信学会論文誌(B), vol.J88-B No.4, pp.795-803, 2005.
- [8] 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, 2006
- [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
- [11] 稲葉敬之, 柳沢基, 荒木純道, "車載レーダのための 2 段階測角方式", 電子情報通信学会論文誌(B), vol.J86-B, No.8, pp.1652-1658, 2003.
- [12] 稲葉敬之, 荒木純道, "マルチパス環境での空間・周波数最大比合成法", 電子情報通信学会論文誌(B), vol.J85-B, No.12, pp.2280-2289, 2002