

2周波CWレーダを用いた壁越し歩行人物身長推定実験

安藤 嘉章[†] 瀬楽 瑞樹[†] 渡辺 優人[†] 秋田 学[†] 稲葉 敬之[†]

[†]電気通信大学 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

E-mail: [†] ando.yoshiaki @ inabalab.ee.uec.ac.jp

あらまし 筆者らはこれまでに2周波CWレーダを用いた歩行人物の特徴量抽出法について提案している。抽出した特徴量のうち二つの特徴量 (Mean Velocity, Step Frequency) を用いた歩行人物の身長推定について人物がレーダに対して正対直進する条件における基礎実験結果を報告している。上記二つの特徴量は、原理的に壁越しの状況においてもその推定精度に劣化がない。本稿では壁越しで同条件における歩行人物の身長推定実験結果について報告する。

キーワード 2周波CWレーダ, 壁越し, Mean Velocity, Step Frequency, 特徴量

Experiments of Human Height Estimation in a Through-the-wall Environment using Two-Frequency CW Radar

Yoshiaki ANDO[†] Mizuki SERAKU[†] Masato WATANABE[†] Manabu AKITA[†]
and Takayuki INABA[†]

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

E-mail: [†] ando.yoshiaki @ inabalab.ee.uec.ac.jp

Abstract A feature value extraction scheme based on two-frequency CW radar has been proposed by the authors. The initial experimental results on human height estimation using two feature values of them, Mean Velocity, Step Frequency, was also reported. The initial experiment was conducted in the situation where the test subjects came straight to the radar antenna with no object between radar antenna and the test subject. The estimation accuracy of the two feature values is not degraded in the through the wall environment in principle. In this paper, the experimental results conducted in the through the wall environment are shown.

Keywords Two-frequency CW radar, Through-the-wall, Mean Velocity, Step Frequency, Feature Value

1. まえがき

レーダは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る。筆者らの研究グループは、人物と他物体の識別するため2周波CWレーダによる特徴量抽出法を提案している[1]。レーダ変調方式の中で低速の信号処理で実現できかつコスト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。2周波CW方式は静止物によるドップラ周波数が0Hzとなるため、移動物(識別対象)と静止物クラッタを速度により分離可能であり、静止物クラッタの影響を抑圧できることから、2周波CW方式を用いている。2周波CWレーダによる特徴量抽出法において、人物と他物体を識別するための特徴量として、Mean

Velocity (胴体の平均速度)、Step Frequency (単位時間当たりの手足等各部位の速度の発生数) および Appendage Ratio (胴体と手足等各部位の電力比)、目標からの受信電力と推定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) が示されている。これらの特徴量を用いて、人物と他物体を識別し、さらに人物に対しては、過去の歩行人物身長推定に関する研究[2]に基づき、Mean Velocity と Step Frequency の二つの特徴量を用いた歩行人物身長推定の基礎実験結果を報告している。本稿では、屋内壁越し (Through-the-wall) 環境における2周波CW方式による歩行人物身長推定実験の結果について報告する。

2.2 周波 CW 方式を用いた歩行人物の身長推定方法

2.1. 2 周波 CW 方式を用いた人物の検知

前述したように目標を速度で分離可能であり，本研究で想定される壁，構造物などの静止物（建物に起因するクラッタ）が存在する環境下でも，目標の測距測速が可能である．2 周波 CW 方式の送信シーケンスを図 1 に示す．

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 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 の区間ではローカル信号 f_2 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．

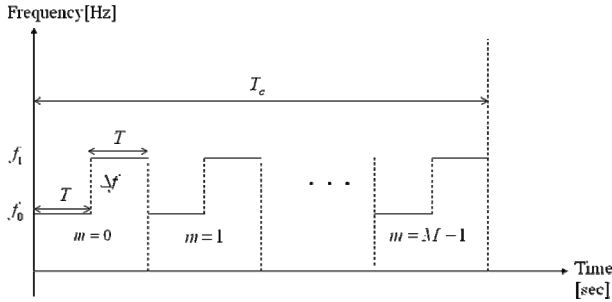


図 1 2 周波 CW 方式の送信周波数シーケンス

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

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

ここで， v はレーダに対する目標の相対速度， R はレーダと対象物の距離， c は光速， t は時刻である．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，位相差 $\phi_2 - \phi_1$ から距離 R を求めると以下の式(3)を得る．

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

2 周波 CW 方式の距離視野 R_{\max} は式(3)の位相差が $\phi_2 - \phi_1 = 2\pi$ のとき式(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，24GHz 特定小電力無線局規格に準拠し，PC から任意の送信波形を送信可能なソフトウェアレーダを用いる [3]．レーダパラメータおよび期待性能を，表 1 および表 2 にそれぞれ示す．

表 1 レーダパラメータ一覧

パラメータ項目	スペック (または設定値)
搬送波周波数	24.15GHz
周波数ステップ数	7.5MHz
サンプリング周波数	10kHz
周波数切替時間 (T)	200 μ sec
各周波数サンプル数 (M)	128
観測時間 (1CPI) (T_c)	51.2msec
送信電力	10mW
ビーム幅 (垂直)	16deg

表 2 期待性能一覧

項目	期待性能
距離視野	20m
速度視野	27.95km/h
速度分解能	0.437km/h

2.2.2 周波 CW 方式を用いた人物の特徴量抽出

人物の歩行は脚，肩，腕，胴体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 $N \cdot T_c$ の計測データ $x(t)$ は式(7)で表される．

$$\begin{aligned} x(t) &= \sum_k A_k \exp\left\{j\left[2\pi\left(\frac{2v_k(t)}{c}f_1t - \frac{2R_k(t)}{c}f_1\right)\right]\right\} \\ &\approx \sum_k A_k \exp\left\{j\left[2\pi\left(\frac{2v_k(t)}{c}f_2t - \frac{2R_k(t)}{c}f_2\right)\right]\right\} \end{aligned} \quad (7)$$

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 は人物の各部位の番号， 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

の計測区間内では一定であると仮定する.

計測データ $x(t)$ を時間ドップラ周波数解析をするために, 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, $w()$ は窓関数であり, 本論文では窓関数として矩形窓を採用する. 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 2 のように横軸が時間, 縦軸がドップラ周波数 (速度), 色の濃さが電力を表すスペクトログラムを得る. 図 2 は人物歩行の計測データのスペクトログラムであり, 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ることが確認される.

2.2.1. Mean Velocity

Mean Velocity (MV) は胴体の平均速度である. 式 (9) に従い, 図 2 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, 図 3 の振幅マップ (AMP: Amplitude) を得る.

$$\text{AMP}(f_c, f_d) = \int \text{DFT}(\tau, f_d) \exp(-j2\pi f_c \tau) d\tau \quad (9)$$

図 3 の縦軸は図 2 と同様にドップラ周波数, 横軸は f_c : Cadence Frequency となる. Cadence Frequency 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 での最大電力なるドップラ周波数 f_d から得られる目標速度を Mean Velocity (MV) として抽出する (図 3 中の矢印). これは観測目標の各部位で周期的で速度変化がなく一定速度である部位に対応し, 歩行人物の場合は主に胴体部分に対応する. ここで, 誤検知率 10^{-6} 以下になるようノイズレベルより 13dB 以上のときのみ抽出を行なう

$$MV = f_{d, MV} = \arg \max_{m=0,1,\dots,M-1} |\text{AMP}(0, f_{d,m})| \quad (10)$$

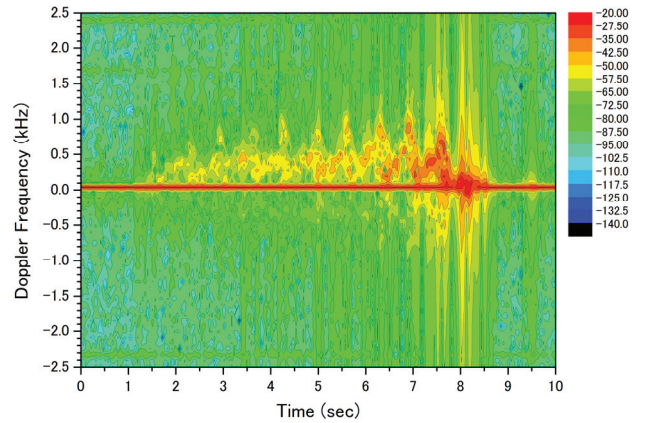


図 2 人物歩行のスペクトログラム

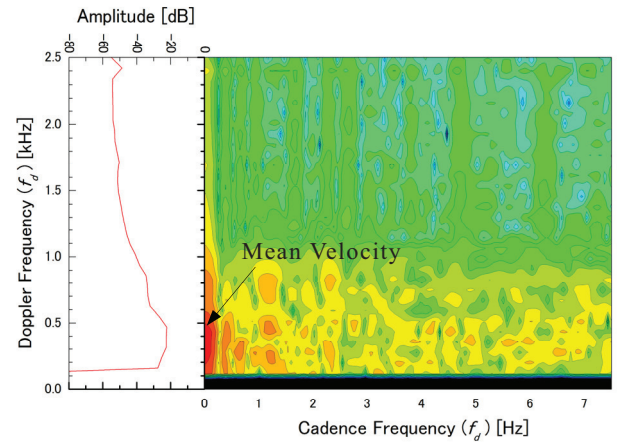


図 3 人物歩行の Cadence frequency-Doppler frequency 電力規格化振幅マップ

2.2.2. Step Frequency

Step Frequency (SF) とは単位時間あたりの手足等の各部位の速度の発生数で, 人物歩行では主に脚(大腿部)である. 図 3 から Cadence Frequency の 0Hz 付近は電力が高いため, 図 2 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後すると平均電力減算後の振幅マップ $\text{AMP}_w(f_c, f_d)$ (図 4) を得る. 図 4 において縦軸のドップラ周波数 (速度) 軸の式 (11) で算出した Mean Velocity を除いた前後の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.

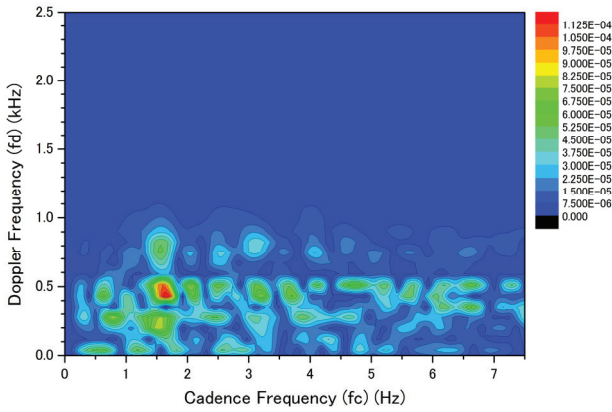


図4 平均処理後の Cadence frequency-Doppler frequency 振幅マップ

$$SF = f_{c,SF} = \arg \max_{n=0,1,\dots,N-1} \left(\sum_{\substack{m=MV-\Delta \\ m \neq MV}}^{MV+\Delta} |CPS_w(f_{c,n}, f_{d,m})| \right) \quad (11)$$

上記の Mean Velocity, Step Frequency の 2 つの特徴量を用いた, 人物の身長 H を推定する実験式(12)が報告されている [1][2]. ここで α は, 身長に対する股下の長さの比である.

$$H = \frac{4MV}{\alpha \times (1.346SF)^2} \quad (12)$$

3. 実験結果と考察

3.1. 実験環境

本実験は図5に示すように, 壁から離れたところに床からの高さ 0.58m に設置したホーンアンテナを使用する。歩行者は右側の壁から 3.5m 離れたレーダに向かってゆっくり歩くことによりデータを取得した。壁厚は 107mm で両側に 21mm (12+9) の石膏ボード (複素比誘電率=2.79-j0.015[4]) の間に 65mm グラスウール (複素比誘電率=1.1-j0.01[5]) を充填した構造である。ホーンアンテナの水平ビーム幅は 30° である。垂直ビーム幅は 8° であり, 身長 1.7m の人物の大腿部が中心に来るように設置した。実験は 20 歳代から 60 歳代までの健常な男性 11 人 (A~K) で, 各 10 回ずつ行われた (合計=110 データ)。

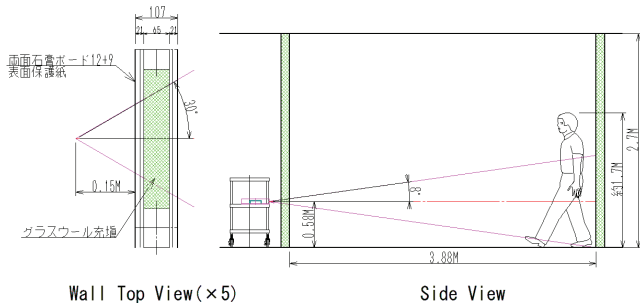


図5 2周波CWレーダによる壁越し人物歩行実験

3.2. 歩行人物の身長推定

図6に人物歩行に対する測定結果の一例(人物Eの1回目の計測データ)を示す。(a)人物歩行のスペクトログラム,(b)Cadence frequency-Doppler frequency 振幅マップ, (c)平均減算後の Cadence frequency-Doppler frequency 振幅マップ, (d) Cadence frequency 0Hzにおける Doppler Frequency, (e) 時間-推定距離である。測定データに対し, 式(8)に示される短時間フーリエ変換を行なうことで得られるスペクトログラムに対し, 式(9)で示される時間方向に離散フーリエ変換を行うことにより Cadence Frequency-Doppler Frequency 振幅マップ(図6(b))が得られる。Cadence Frequency 0Hzで最大となるドップラ周波数(図6(b)中の矢印)から Mean Velocity が得られ, 本事例の場合, 1.856km/h (332.0Hz)となる。次に各ドップラ周波数における平均電力減算後, 時間方向に離散フーリエ変換を行なうことにより, 平均電力減算後の Cadence Frequency-Doppler Frequency 振幅マップ(図6(c))が得られる。図6(c)において Mean Velocity を除いた各ドップラピンを Doppler Frequency 方向に加算し, 最大電力となる Cadence Frequency から Step Frequency が得られ, 本事例の場合, 1.413Hzとなる。得られた Mean Velocity および Step Frequency に対し式(12)を用いることにより, 身長が 172cm (真値 175cm) と推定される。同様にして被験者 11 名 (110 データ) に対する身長推定を行った結果を図7に示す。ここで式(12)の実験式は, 人物が普通に歩くときにおいて, 歩幅は股下の長さと同じであることを仮定しており, 歩幅と股下の長さの比により α は変わる。本稿では, 各人物に対する身長推定値の平均値と真値の差の二乗誤差が最も小さくなる α として, 0.32 を採用している(文献[1]で採用している値の 66%)。図7より, 人物 B と人物 F 以外については, 平均値の差が 5cm 以内, 標準偏差は平均して 15cm 程度である。

3.3. 考察

3.3.1. 実験式のパラメータ α について

図7に示す 11 人の身長推定結果においてその標準偏差は, 過去に報告された屋外における実験結果(標準偏差 9cm 程度)に対して大きい値となっている。上述のように式(12)の実験式は, 人物が普通に一定の歩幅で歩くことを前提にしている。本実験は, 3.2 で示

す Mean Velocity からわかるように屋内において通常よりも低速で歩行している。

$$\alpha = \operatorname{argmin}_{\alpha_1} \sum_{n=0}^9 \left[\left(\frac{4MV_n}{\alpha_1 \times (1.346(SF_n))^2} \right) - \text{Height}_{true} \right]^2 \quad (13)$$

そこで式 (13) に示す評価関数の値を最小とする α から被験者それぞれについて α を求め、その評価関数の値と α の関係を図 8 に示す。各被験者から得られる評価関数の値の最小値をとる α_1 を各被験者に対する α とする。これをもとに身長推定した結果を図 9 に示す。図 9 より、被験者 B と F は他の被験者に比べ、 α が大きい (歩幅の股下の長さに対する比が他の被験者に比べ大きい) ことがわかる。

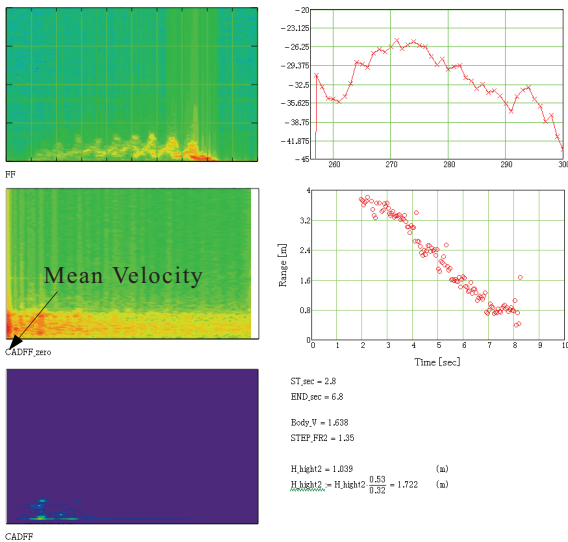


図 6 2 周波 CW レーダによる人物歩行の測定結果 (a) 人物歩行のスペクトログラム, (b) Cadence frequency-Doppler frequency 振幅マップ, (c) 平均減算後の Cadence frequency-Doppler frequency 振幅マップ, (d) 時間-電力, (e) 時間-距離

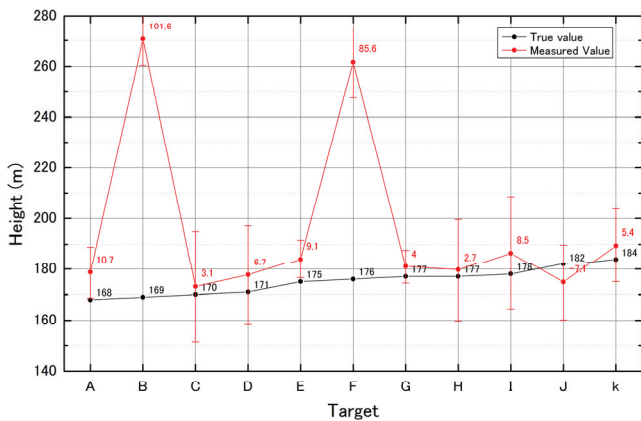


図 7 2 周波 CW レーダによる人物身長推定結果

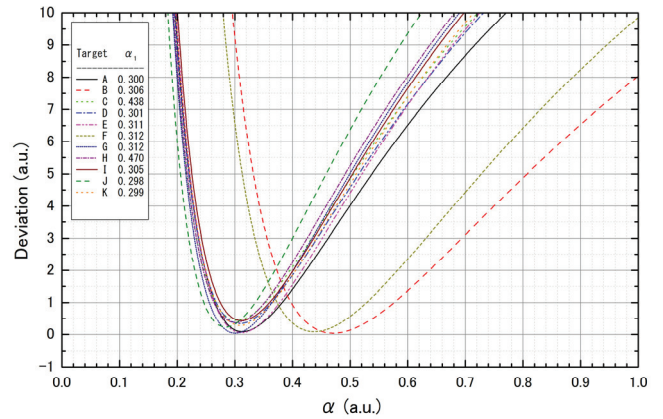


図 8 各被験者の評価関数と α_1 の関係

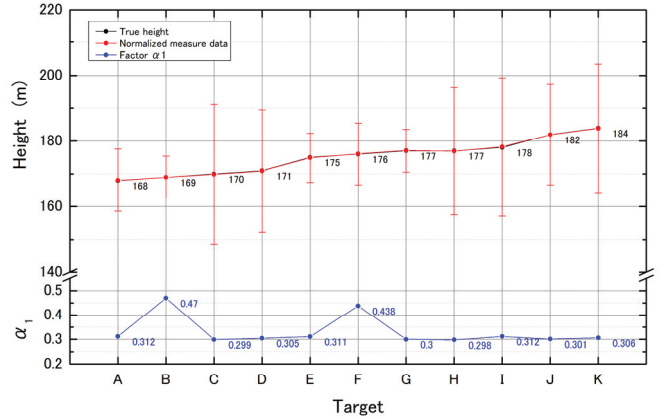


図 9 人物歩行特徴量補正後の人物身長推定結果

次に、図 9 において、身長推定結果の標準偏差の小さい E と標準偏差の大きい被験者 C について、10 回の計測における評価関数の値と α の関係を図 10 に示す。図 10 より被験者 E は 10 回計測における評価関数が最小値をとる α の分布に広がり小さいが、被験者 C は分布に広がりを持っていることがわかる。このことは 10 回の計測で同じ歩き方をするように意識しても、歩き方 (歩幅) が異なることを示唆している。このパラメータは個人差 (年齢層など) のあるものであり、今後人物の認識における特徴量となりうると思われる。

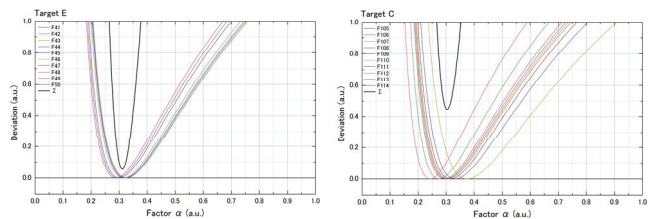


図 10 各被験者 E, C の人物歩行特徴量

3.3.2. 壁の影響について

レーダ送信部から送信された信号が、距離 R の目標から反射して受信される時、その受信信号 $Tx(t)$ は式 (15) で表される。また、壁がないときの受信信号 $Tx2(t)$ は式 (16) で表される。

$$Tx(t) = \exp\left(j2\pi f\left(t - \frac{2(R_0 - Vt)}{c_0} - \frac{2R_1}{c_1}\right) + \phi_0\right) \quad (15)$$

$$Tx2(t) = \exp\left(j2\pi f\left(t - \frac{2(R - Vt)}{c_0}\right) + \phi_0\right) \quad (16)$$

ここで、 R_0 は空気中での距離、 R_1 は壁厚さの合計値、 $R = R_0 + R_1$ 、 c_0 は空気中での電磁波速度、 c_1 は壁内での電磁波速度で、検波するとそれぞれ式 (17)、(18) のようになる。

$$X(t) = \exp\left(j2\pi f\left(\frac{2V}{c}t - \frac{2R_0}{c_0} - \frac{2R_1}{c_1}\right)\right) \quad (17)$$

$$X2(t) = \exp\left(j2\pi f\left(\frac{2V}{c}t - \frac{2R}{c_0}\right)\right) \quad (18)$$

式 (17)、(18) より、ドップラ周波数 $2V/c \cdot t$ は壁の有無にかかわらず不変であることがわかる。それぞれの比透磁率 $\mu = 1.0$ とすると、壁の透過による S/N 劣化は

$$n_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}}, \quad n_2 = \sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon_2}} \quad \text{として式 (19) で求められる。}$$

$$S/N = 10 \log\left(\frac{4n_1n_2}{(n_1 + n_2)^2}\right) \quad (19)$$

図 11 に壁のない環境および壁越し環境における実験データの電力と距離の関係を示す。ここで、電力とは、式(1)でピークとなる周波数に対応する電力である。式 (19) と図 5 に示す壁の構造および各物質の比誘電率より、壁による S/N の劣化は 5dB 程度であると推定され、図 11 において同様の劣化が確認される。2 周波 CW 方式の距離推定精度は、式 (4) に示す通り、位相の観測精度となり、その精度は式 (20) で与えられる。

$$\Delta\Phi = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot 10^{\frac{SN}{10}}}} \cdot \frac{180}{\pi} \quad (20)$$

本報告における身長推定には、壁の影響は少ないと思われるが、特徴量 NP を用いて人物認識を行う場合には式 (17) で表される距離推定結果に与える影響とともに考慮する必要がある。

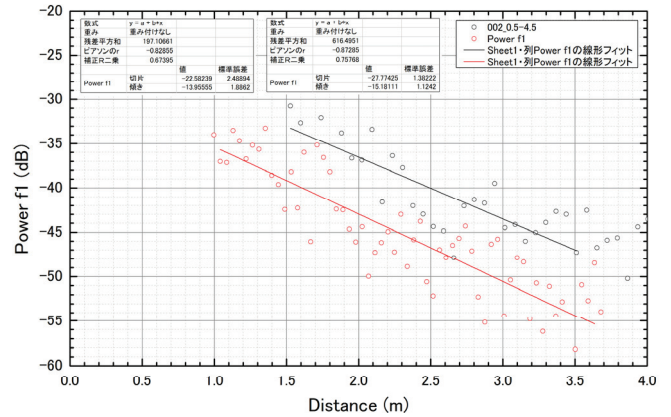


図 11 同一被験者で壁なし／壁越しでの電力比 (黒線：壁なし，赤線：壁越し)

4. まとめ

本稿では 24GHz 2 周波 CW レーダを用いて、壁越しの人物歩行実験を行い身長推定の評価を行った。歩行距離が 3.5m と狭所での実験であったが、本手法が身長推定をするための有用な手段であることが確認された。歩行の個人差を吸収する新たな特徴量として、Mean Velocity, Step Frequency 以外のパラメータを今後検討する必要がある。

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ー技術の研究開発）」により実施されたものである。

文 献

- [1] 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", 信学論(B), vol.J97-B, no.8, pp.677-687, 2014.
- [2] S. Yang and L. Kong, "Research on Characteristic Extraction of Human Gait", Proceedings of 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, 10.1109/ICBBE.2009.5163328, China, 2009.
- [3] 渡辺優人, 稲葉敬之, "レーダ測距方式比較検証のための 24GHz ソフトウェアレーダ", 計測自動制御学会論文集, vol.51, No.2, pp.120-127, 2015.
- [4] 細谷勝宣, 坂井 聡, 柏原一之, 工藤敏夫, "無線 LAN 用電波吸収体と周波数選択膜," 三菱電線工業時報, 第 102 号, pp.37-40, 2005.
- [5] 横川英広, 近藤明日香, 橋本 修, 宋 哲, 小野一則, 豊田 誠, "抵抗皮膜とグラスウールを用いた吸音・電波吸収体に関する基礎検討," 信学論(B), vol.J86-B, no.7, pp.1176-1182, 2003.