超広帯域マルチレーダによる位置速度情報の統合による 歩行人体の運動推定

伊藤 薫 版本 卓也^{++,+++}

† 大阪大学大学院 情報科学研究科 コンピュータサイエンス専攻 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘1 - 1
 †† 兵庫県立大学 大学院工学研究科 電子情報工学専攻 〒 671-2280 姫路市書写 2167
 ††† 京都大学 情報学研究科 通信情報システム専攻 〒 606-8501 京都市左京区吉田本町

あらまし 従来の超広帯域レーダによる人体を対象とした研究の多くは、システムの複雑度やコストなどの理由によ リ、単一のレーダのみによる技術が主流であった.本研究では、複数のモノスタティックレーダを用いて、歩行中の 人体を異なる角度から同時に測定する.超広帯域信号を用いることで受信データの強度情報から目標とレーダ間の距 離が得られ、複数レーダ間を十分広くすることで三角測量の原理によって人体の位置を決定できる.一方で、人体か らの反射信号から位相情報を取り出すことにより、人体の運動により生じるドップラー偏移が観測でき、複数のレー ダの信号を統合することで速度の大きさと向きを高精度に測定することができる.本稿ではこれらの位置と速度の情 報を統合することで高精度な人体の運動を推定する手法を提案する.提案手法の特性は様々な軌道に沿った歩行運動 を仮定した数値シミュレーション及び実際の測定データにより詳細に検討する.

キーワード 超広帯域,マルチレーダ,運動推定,ドップラー,人体

Estimation of pedestrian motion using the combination of position and velocity information of ultra-wideband multi radar data

Kaoru ITO[†] and Takuya SAKAMOTO^{††,†††}

† Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, 1-1 Yamadaoka, Suita 565-0871,

Japan

†† Graduate School of Engineering, University of Hyogo, 2167 Shosha, Himeji 671-2280, Japan
††† Graduate School of Informatics, Kyoto University, Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan

Abstract Most of conventional studies use only a single radar system for the measurements of a human body because of the system cost and the complexity. We use multiple ultra-wideband radar sytems to form a radar network to measure the same target person from different angles. The use of ultra-wideband signals allows us to measure the range of the target using the signal intensity, and we can determine the position of the target using data from multiple radar systems. In contrast, the phase of the received signals contains the information of Doppler shift, from which we can estimate the Doppler velocity of the target for each radar system. By combining the Doppler velocities of the multiple radar systems, the velocity vector can be accurately estimated. This study combines the position information and velocity information of the received signal, and achieves accurate estimation of walking human trajectories.

Key words ultra-wideband, multi radar, Doppler, motion estimation, human

1. はじめに

超広帯域レーダは高い距離分解能を有し,屋内などの人の生 活スケールに適用可能な性能を有する.昨今,車載レーダの普 及により,近距離用の超広帯域レーダの低価格化が進んでおり, それを受けて,様々な分野での超広帯域レーダの応用が進んで いる.特に,超広帯域レーダによる人体の測定に関しては単一 のレーダのみを用いた運動推定[1]などに注目が集まっている. レーダにより目標までの距離は測定できるが,さらに目標方位 を測定するためには複数の受信素子を用いたアレイ処理などを 用いる必要があるが,依然として単一レーダのみの使用に限定 されている.

一方,前述のとおり超広帯域レーダの低価格化に伴い,複数 のレーダを同時に用いてレーダネットワークを構成するマルチ レーダ測定は単一のレーダとは本質的に異なる情報を得ること ができる.特に,人体の測定の場合には異なる角度から測定す ることで人体の異なる部位をそれぞれ測定でき,高次の情報を 得ることができる[2].そこで,本研究では,複数のレーダを用 いて人体を測定することで高精度な位置推定を実現する手法の 開発を行う.

本研究における簡易な測定については既に[3] において報告 している.本研究では,マルチレーダを用いることで得られる 情報のうち,主に信号の位相情報により得られる目標速度と信 号の振幅情報から得られる目標位置の両方を適切に統合するこ とにより,従来技術よりも高精度での人体位置推定を実現する. 提案手法の特性を数値シミュレーションおよび測定データへの 適用を通じて明らかにし,速度推定と位置推定による従来手法 との定量的な比較を行う.

2. システムモデル

本研究では 2 系統のレーダシステムを用いる. 各レーダは送 信アンテナと受信アンテナ各 1 個を用い,アンテナ間隔を狭く することで近似的にモノスタティックレーダを構成する.計4 個のアンテナは全て同じ直線上に配置し,これを x 軸とする. 目標として床上を歩行する人体を想定するため,2次元問題と して床面と平行な xy 平面上での位置推定を対象とする.2 組の 送受信素子 R_{x1} , T_{x1} , R_{x2} , T_{x2} を,x = -0.045m,0.045m, 0.793m,0.883m に設置する.レーダの送信信号の中心周波数 は 4.2GHz,帯域幅は 2.2GHz で,受信信号の時間方向のサン プリング間隔は 5.0 ms,距離方向のサンプリング間隔は 9.15 mm とする.

歩行人体を目標とし,図1に示すような正方形の軌道に沿った歩行を行わせる.軌道は始点を(-0.28 m, 2.00 m)とし,一辺が1.40mで中心が(0.42 m,2.70 m)の正方形上を反時計回りに運動するものとする.ただし,レーダで測定される人体表面の反射点は軌道と一致しない.以後の議論で真の運動として表示するものは胴体を楕円筒で近似して,幾何光学的に散乱中心を求めることで計算する.

3. 受信信号の位置・速度情報を統合した歩行人 体の位置推定技術

既存の手法としてそれぞれ,速度情報として時間周波数解析 により求まるドップラー速度情報が,位置情報として逆伝搬法 による二次元の信号分布をもとにしたものが存在する.

まず,逆伝搬法による位置情報の取得について述べる.複数 のレーダで同一の目標からの反射信号を測定した場合,遅延時 間を復元して重畳することで位相が一致する場所からの反射信 号は強調され,強度の高い場所に目標があると推定できる.し かし,本稿では扱うレーダの数を二つとしているため,この方 法では十分に信号が強調されない.そこで,時間 t,受信遅延時



図1 本稿で想定する人体の運動軌跡(左下頂点より反時計回りに歩行)

間 τ のレーダ 1 の受信信号を $s_1(t,\tau)$, レーダ 2 の受信信号を $s_2(t,\tau)$, 目標とレーダ 1, レーダ 2 との距離をそれぞれ $R_1(t)$, $R_2(t)$, 目標の xy 平面における座標を (x_a, y_a) として,以下 の式を用いて二次元の信号分布を取得する.ただし,アンテナ と対象物との距離は式 (2) で表される.ここで, $\phi_1(t), \phi_2(t)$ は 各レーダの受信信号の位相であり, c は光速である.

$$I(x, y, t) = \left| s_1\left(t, \frac{2}{c}R_1(t)\right) s_2\left(t, \frac{2}{c}R_2(t)\right) \right|^2 \cos\left(\phi_1(t) - \phi_2(t)\right)$$
(1)

$$\begin{cases} R_1(t) = \sqrt{(x(t) - x_a)^2 + (y(t) - y_a)^2} \\ R_2(t) = \sqrt{(x(t) - (d - x_a))^2 + (y(t) - y_a)^2} \end{cases}$$
(2)

この式では,信号強度の乗算を行うため,どちらかの受信信 号で信号がない部分は強度が0になる.また,二つの受信信 号の位相差の余弦を乗算することで,位相が一致しているもの がより強調される.ただし,各時刻で距離方向に複数のピーク があるような信号の場合,二次元的なピークが複数生じる.一 部のピークは実際には物体の存在しない位置に虚像として生じ る.次に,各時刻で信号強度が最大の点x(t)を式(3)を用いて 選び,それらを時系列データとすることで対象の運動軌跡が推 定できる.推定した軌跡 $\tilde{x}(t)$ は,式(1)で計算されたI(x, y, t)を用いて以下の式で求めることができる.

$$\tilde{\boldsymbol{v}}(t) = \operatorname{argmax}_{(x,y)} |I(x,y,t)|^2 \tag{3}$$

ピークが複数生じた場合でも,多くの場合,レーダ散乱断面積 の大きい胴体からの信号が最大となるため,信号の最大値を求 めることで安定した処理が可能である.

また,速度情報の取得方法について述べる.時間に対する速度ベクトルv(t)を用いることで,開始位置が得られれば運動軌跡がわかる.これは,位置x(t)の時間微分が速度であることに起因しており,数式で表現すると式(4)となる.

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{x}(t) = \boldsymbol{v}(t) \tag{4}$$

式 (4) を有限差分で近似することで,時刻 t での位置 x(t) = (x(t), y(t)) は微小時間 Δt として以下の式で求めることができる.

-2 -

$$\boldsymbol{x}(t) = \boldsymbol{x}(t - \Delta t) + \boldsymbol{v}(t)\Delta t \tag{5}$$

上記の式は初期座標に対して速度ベクトルを時間で積分した値 を加えるのと等価である.

原理的には前述したそれそれの手法で運動推定が可能だが, 実際の測定では雑音が受信信号に重畳している.そのため,速 度情報を用いる方法では,雑音成分の影響により時間経過に応 じて誤差が拡大する.また,位置情報を用いる方法では,各時 刻において二つのレーダの強度の高い信号が交差する点で強度 が最大となる.運動推定ではその最大値を用いるため,実際の 対表面の反射点よりもレーダから遠い位置に推定される.そこ で,それらの情報を統合し,それぞれの手法の誤差を修正する 方法を提案する.αを比率,各時刻tで推定し直した位置を *û* として,以下の式により振幅情報と位相情報の組み合わせを 行う.

$$\hat{\boldsymbol{x}}(t) = \alpha(\hat{\boldsymbol{x}}(t - \Delta t) + \boldsymbol{v}(t)\Delta t) + (1 - \alpha)\tilde{\boldsymbol{x}}(t)$$
(6)

第一項は式 (5) に示すとおり,信号の位相情報から得られる速 度ベクトルを積分することで目標位置の推定を行う.一方,第 二項は式 (3) で求めた振幅情報により得られた推定目標位置 $\hat{x}(t)$ である.

数値シミュレーションによる提案法の性能 評価

幾何光学近似を用いたシミュレーションにより受信信号を生 成する.受信信号は胴体と腕からのエコーのみを考慮する.加 法的白色雑音を想定し,信号対雑音電力比は S/N=20dB とす る.目標の重心の移動速度の大きさを常に 1.0m/s として生成 した信号強度を時間距離領域にて図 2,図 3 に示す.強度は最 大が 0 dB となるように正規化している.この図では明瞭に胴 体の信号と腕の信号を分離して確認することができる時間が存 在する一方で,これらが重畳して分離できない時間も存在する. 次に,生成信号から計算したスペクトログラムを図 4,5 に示 す.全体のオフセットが胴体からのエコーのドップラー偏移で あり,その周囲で広い周波数帯に分布している弱い成分が腕の ドップラー偏移である.正の周波数がアンテナへ近づく向きと して定義している.

次に,時間距離領域図とスペクトログラムから計算した各 レーダの各アンテナと目標の距離を図6に,それぞれのドップ ラー速度を図7に示す.図6では,腕が胴体よりもアンテナに 近い場合に距離が誤って短く計算されている.また,図7では 腕の信号に影響をあまり受けることなく主に胴体のドップラー 速度が推定されていることがわかる.さらに,逆伝搬法により 作成した画像を図8,9に示す.白線は真の軌跡であり,画像 ピークが真の軌跡に沿って移動しているが,その他に不要応答 も確認できる.画像が *x* 軸方向に広がっているのはアンテナ ベースラインに比べて目標のレンジが大きいために誤差楕円が 横長になっているためである.

これらの情報を元に運動軌跡の推定を行う.逆伝搬により生成した画像のピークから決めた軌跡,スペクトログラムにより



図 2 レーダ 1 で得られた時間距離領域での信号強度 $|s_1(t,r)|^2$



図 3 レーダ 2 で得られた時間距離領域での信号強度 |s₂(t, r)|²

得た速度ベクトルを積分して得た軌跡,およびこれら両者を統合した提案手法による軌跡を真の軌跡と重ねて図 10 に示す. ただし提案法で用いる係数 $\alpha = 0.985$ とする.速度ベクトルを積分する方法は dead-reckoning 法と原理的に同一であり,速度推定精度が高くてもわずかに含まれる誤差が蓄積し,大きな誤差が生じる.これはいわゆる random walk 過程と同じ長期記憶過程の一種であり,積分時間を長くするほど誤差は大きくなる.さらに,初期位置の推定で生じた誤差が全時間に影響を及ぼすことも問題となり,これは不定積分で生じる積分定数の不確定性と同じである.逆伝搬により生成した画像のピークから決めた軌跡と提案手法はいずれも同程度の精度で軌跡を推定できていることがわかる.

超広帯域マルチレーダ測定による提案法の性 能評価

アンテナはリッジドホーンアンテナ,ビーム幅は E 面 34 度, H 面 32 度のドップラーレーダである.送信波形は M 系列符号 変調連続波とする.その他のパラメータはシステムモデルで示 したとおりである.使用したレーダを図 11 に示す.また,実 験の測定の様子を図 12 に示す.測定における被験者は 23 歳の 男性で,身長は 170cm である.上着などは着衣しておらず,長



図 4 レーダ 1 で得られたスペクトログラム $|S_1(t, v_D)|^2$



図 5 レーダ 2 で得られたスペクトログラム $|S_2(t, v_D)|^2$



図 6 レーダ 1 および 2 により推定されたアンテナと目標の距離の時 間変化

袖のシャツとズボンのみを着衣していた.

図1に示す運動について信号の測定実験により提案手法の性 能評価を行う.図13から図20にシミュレーションと同様の結 果の図を示す.図13,14では,腕の信号が信号強度の強い区 間で微弱な存在が確認できる程度である.シミュレーションで の図2,3と比較すると,よく似通っている.しかし,もっと も遠方,つまり正方形の上辺を歩いている場合で最も差異が存



図 7 レーダ1および2により推定されたドップラー速度の時間変化



図 9 t = 5 s の修正逆伝搬法による信号分布の画像化

在し,測定データではシミュレーションよりも丸みを帯びている.これは正方形の頂点での運動方向の時間変化の急峻さに起因しており,実際はより緩やかな動きとなっていることがわかる.そのため,図16についても,傾向は近いもののより周波数成分が滑らかにつながっている.また,測定データの方がシミュレーションよりも歩く速度が遅いため,腕の運動によるスペクトルの広がりの回数が多い.図17と図18を図6と図7と見比べると,どちらにおいても非常に類似した運動になってい



図 10 最大干渉点を振幅情報に用いた場合



図 11 使用したレーダ



図12 実験風景

ることがわかる.

実験データでの推定運動軌跡を図 21 に示す.図 10 と比較す ると,測定データの速度情報での推定軌跡はシミュレーション の場合と同様 y = 0 方向にずれている点で似通っているが,よ り x 軸方向の誤差が大きくなっている.さらに,位置情報のみ を用いる場合はシミュレーションよりも真の軌跡と重なった軌 跡が推定されている.また,軌道の左半分,つまりアンテナに 向かって運動している場合で,アンテナから遠ざかっている場 合と比較して、波打ちが大きい.このことから,腹部よりも背 面で信号を反射する場合により推定精度を向上することができ るとわかる.既存の手法と比較しすると、位置情報のみを用い た場合に非常に大きく波打っているが、提案手法では大きくそ れを抑制できていることがわかる.



図 13 レーダ1 で得られた時間距離領域での信号強度 $|s_1(t,r)|^2$



図 14 レーダ2 で得られた時間距離領域での信号強度 |s₂(t, r)|²



図 15 レーダ1 で得られたスペクトログラム $|S_1(t, v_D)|^2$

謝 辞

本研究の一部は文部科学省 革新的イノベーション創出 (COI) プログラム,日本学術振興会 科学研究費補助金 基盤研究 (A)25249057,若手研究(B)15K18077,国際共同研究加速基 金(国際共同研究強化)15KK0243,公立大学法人兵庫県立大学 特別研究助成金(若手研究者支援),京都大学融合チーム研究プ



図 16 レーダ2 で得られたスペクトログラム $|S_2(t, v_D)|^2$



図 17 レーダ1および2により推定されたアンテナと目標間の距離の 時間変化



ログラム(SPIRITS),ならびに総務省 電波資源拡大のための 研究開発「140GHz 帯高精度レーダーの研究開発」の助成を受 けて実施された.関係各位に心より感謝申し上げます.

献

文

- Y. Kim and H. Ling, "Human activity classification based on micro-doppler signatures using a support vector machine", IEEE Trans. geos. remote sens., vol.47, no.5, 2009.
- [2] B. Gulmezoglu, M. B. Guldogan, and S. Gezici, "Multiper-



図 19 t = 0 の修正逆伝搬法による信号分布の画像化



図 20 t = 5 の修正逆伝搬法による信号分布の画像化



図 21 最大干渉点を振幅情報に用いた場合

son tracking with a network of ultrawideband radar sensors based on gaussian mixture PHD filters", IEEE Sens. journal, vol.15, no.4, pp. 2227-2237, 2015

[3] 伊藤薫,阪本卓也,"超広帯域マルチレーダの強度・位相情報の 統合による歩行人体軌跡の高精度推定",電子情報通信学会 2016 年総合大会講演論文集,2016