モノスタティック超広帯域ドップラレーダと時間領域適応型信号処理を 用いた複数人体の追跡方法

奥村 成皓† 阪本 卓也^{†,††} 佐藤 亨[†]

† 京都大学大学院情報学研究科 〒 606-8501 京都府京都市左京区吉田本町 †† 兵庫県立大学大学院工学研究科 〒 671-2280 兵庫県姫路市書写 2167 E-mail: †sokumura@sato-lab.0t0.jp, ††t-sakamo@i.kyoto-u.ac.jp, †††sato.toru.6e@kyoto-u.ac.jp

あらまし 超広帯域レーダは高い距離分解能を持ち,防犯分野,周辺把握での活用が期待されている.低コストのシ ステムを実現するため,本研究ではモノスタティックレーダを用いた複数人体の追跡方法を提案する.受信信号から 得られる距離時間レーダ画像に適応型信号処理を適用することで,対象のドップラ速度を高分解能に推定し追跡する. 実験の結果,3人が同時に交差する状況下で,追跡に成功した.

キーワード 超広帯域レーダ,モノスタティックレーダ,適応型信号処理

Tracking multiple pedestrians using an ultra-wideband Doppler radar with time-domain adaptive signal processing

Shigeaki OKUMURA[†], Takuya SAKAMOTO^{†,††}, and Toru SATO[†]

† Graduate School of Informatics, Kyoto University Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606–8501 Japan
†† Graduate School of Engineering, University of Hyogo, 2167 Shosha, Himeji, Hyogo 671-2280, Japan
E-mail: †sokumura@sato-lab.0t0.jp, ††t-sakamo@i.kyoto-u.ac.jp, †††sato.toru.6e@kyoto-u.ac.jp

Abstract Ultra-wideband Doppler radar with a high range resolution is promising tool for security and monitoring applications. To realize a low-cost system, we propose a technique for separating and tracking multiple pedestrians using a monostatic radar. The proposed method applied an adaptive Doppler velocity estimation technique to the time-range radar data. The experimental study showed that the proposed method succeeded to separate and track three pedestrians overlapping at the same time and range bin.

Key words Ultra-wideband radar, Monostatic radar, Adaptive signal processing

1. まえがき

ロボット技術や自動運転技術の発展に伴い,周辺認識技術が 求められている.現在,このような用途には光学カメラが多く 用いられている[1],[2].しかし,距離分解能が低いことや,霧 や粉塵など,視界不良の場合周辺認識精度が劣化するという欠 点を持つ.

超広帯域 (Ultra-wideband; UWB) レーダは高い距離分解能 を持ち,周辺環境の影響を受けにくいため,新たな周辺認識技 術として近年注目を集めている [3], [4].本研究では特に人体認 識に焦点を当てる.

UWB レーダを用いた人体イメージング方法として,単一人 体の各部位における Doppler 速度の違いを利用し,各部位から の反射波を分離し,干渉計の原理を用いて散乱位置を推定する 方法が提案された [5]. Doppler 速度を用いた分離を行い,同一 の Doppler 速度を持つ目標は単一であるという仮定を置いたた め、3 次元イメージングを1送信素子、2 受信素子のみを用い て実現した.しかし、この方法は、Doppler 速度を用いた分離 において短時間フーリエ変換 (Short-time Fourier transform; STFT)を用いているため、STFT の分解能以下の速度差を持つ 複数目標が存在する場合に測定できないという問題点があった.

これらを解決するため、複数アンテナを用いて目標を到来方 向によって分離する方法が提案された[6]. 複数アンテナを用 いた空間領域干渉計法 (Spatial Domain Interferometry; SDI) に適応型信号処理を適用することで高分解能に到来方向を推定 し、速度差で分離できないような複数目標が存在する場合にも 高精度なイメージングを達成している.しかし、用いるアンテ ナ数が増えたことによって物理的なコストが増加し、適応型信 号処理によって計算コストも増加した.周辺認識に用いる場 合、コストの低減は重要な課題である.そこで、本研究ではよ り低コストなシステムを実現するため、単一のモノスタティッ クレーダを用いて複数歩行人体の分離と追跡を行う.

到来方向推定には少なくとも2つ以上の受信アンテナが必要 であるため、モノスタティックレーダを用いる場合、レンジ情 報と Doppler 速度情報を用いることができる.そのため、複数 目標が同一のレンジに存在する場合、目標の分離と追跡が難し くなる.本研究では特にこのような状況に焦点を当てる.

阪本ら [7], [8], 佐藤ら [9] は受信信号の時空間画像におけるテ クスチャ情報から目標の時空間画像上で, Doppler 速度を推定 し, 複数目標を分離する方法を提案した. これらの方法は, 目 標の Doppler 速度を数値的に計算するため, Doppler 速度の分 解能, 時間分解能が非常に高いという特徴がある. しかし, 複 数目標, 特に 3 つ以上の目標が干渉する場合に速度推定精度が 悪化する [10].

そこで、本研究では、まず、適応型信号処理方法を時間領域 干渉計法(Time Domain Interferometry; TDI)に適用するこ とで、高分解能に Doppler 速度情報を推定、分離する.本研究 では、Doppler 速度推定に Capon 法を用いた.

Capon 法は,適応型信号処理方法の一つである [11]. 実アレ イ間に到来する平面波の位相回転角が到来方向に依存すること を利用し,測定到来波方向の出力電力を一定に拘束する条件の もと,出力電力を最小化することで,測定方向以外からの信号の 寄与を最小化し,高分解能な到来方向推定を実現していた [6].

各送信パルスに対応する複数受信パルスを仮想アレイに見立 てた場合,複数パルス間には目標の Doppler 速度に応じた位 相回転が生じる.そのため,到来方向推定と同じ原理を用いて Doppler 速度を Capon 法を用いて推定することができる [12]. 本研究では,これらを時空間画像上の各ピクセルで計算するこ とで,Doppler 速度画像を作成する.

さらに、本稿では、複数目標の分離と追跡方法を提案する. 複数目標の分離に、密度情報を利用したクラスタリング方法 である Density-based spatial clustering of applications with noise (DBSCAN)を応用し、目標の初期位置と速度を決定す る[13]. その後、各ピクセルの時空間速度情報を用いてトラッ キングを行う.これらの方法を実験データに適用し、評価した.

SDI を用いた到来方向推定と TDI を用いた Doppler 速度推定の関係

本研究では主に到来方向推定に用いられている Capon 法を Doppler 速度推定に使用するため, SDI と TDI の関係を明ら かにする.

まず SDI で想定するモデルについて述べる. ある到来角度 θ から狭帯域な平面波が 1 波到来することを想定し, 2 素子アレ イを用いて観測した場合, 受信信号は次式で表される.

$$s_2 = s_1 \exp\{-j2\pi f_c d\sin\theta/c\} \tag{1}$$

ただし, *s*₁, *s*₂ はそれぞれ 1 素子目, 2 素子目における受信信 号, *d* はアンテナ間距離, *f*_c は中心周波数, *f*_c は中心周波数, *c* は光速である.

到来角 θ は次式で推定できる.

$$\theta = \sin^{-1} \{ \frac{\arg\{s_1 s_2^*\}c}{2\pi df_c} \}$$
(2)

ここで []* は複素共役を表す.

次に TDI で想定するモデルを次に示す. ある Doppler 速度 v を持つ目標を観測し, 狭帯域信号を仮定した場合, 受信信号 は次式で表される.

$$s(r,2) = s(r,1) \exp\{-j4\pi f_c v T/c\}$$
(3)

ただし, *s*(*r*,1), *s*(*r*,2) はそれぞれ 1 パルス目, 2 パルス目に おける受信信号, *r* はレーダからの距離 (Fast time), *T* はパル ス繰り返し間隔である.よって SDI と同様に速度は次式で推定 できる.

$$v = \frac{\arg\{s(r,1)s(r,2)^*\}c}{4\pi T f_c}$$
(4)

式(2)と式(4)は同様の式で表されており,位相回転角がそれ ぞれ到来角,Doppler 速度に依存していることがわかる.SDI において,複数アレイにこの原理を応用すると,Capon法を用 いて複数の θ を推定することができるため,TDIにおいて複数 パルスを用いて同様の信号処理を行えば,複数のDoppler 速度 vを推定することができる.

Capon 法を用いた時空間画像上における Doppler 速度推定

本研究では、阪本ら [7]、佐藤ら [9] の研究と同様に、時空間 画像上において Doppler 速度を計算し、目標の追跡を行う. こ こでは、各r、nにおける受信信号s(r,n)の絶対値|s(r,n)|を 時空間画像と呼ぶ.

Capon 法は測定 Doppler 速度を持つ目標からの反射波の強 度を保持する拘束条件下で出力電力を最小化することで高分 解能に Doppler 速度推定を行う. Capon 法は次式で定式化さ れる.

$$\min_{\mathbf{w}}(P_{\text{out}}(v, r, n) = \frac{1}{2}\mathbf{w}^{\text{H}}R_{r, n}\mathbf{w}) \text{subject to } \mathbf{a}(v)^{\text{T}}\mathbf{w}^{*} = 1,$$
(5)

$$\mathbf{a}(v) = \left[\exp(-j2\pi f_{c}2vT/c)\dots\exp(-j2\pi f_{c}(N-1)2vT/c)\right]^{\mathrm{T}}$$
(6)

ただし, *P*_{out}(*v*,*r*,*n*) は (*r*,*n*) における Capon 法の出力電力, w はウェイトベクトル, *R* は各パルス間の相関を表す相関行列 である.

Capon 法は到来する信号が無相関であることを仮定しており,相関行列 *R* は一般的に次式で表される.

$$R_{r,n} = E[\mathbf{ss}^{\mathrm{H}}] \tag{7}$$

ここで, sは信号ベクトル, E はアンサンブル平均を表す. SDI に用いる場合,一般的に時間平均が用いられてきた.図1に示 すように,TDIでは時間方向に仮想アレイを構成するため,相 関行列を次式で求める.

$$R_{r,n} = \frac{1}{N_{\text{ave}}} \sum_{k=n-N_{\text{ave}}/2}^{n+N_{\text{ave}}/2} \mathbf{s}(r,k) \mathbf{s}(r,k)^{\text{H}}$$
(8)

-2 -



図 1 TDI を用いた Doppler 速度推定における相関行列の推定

 $\mathbf{s}(r,k) = [s(r,k-N_{\rm sub}/2), s(r,k-N_{\rm sub}/2+1)\cdots s(r,k+N_{\rm sub}/2)]^{\rm T}$ (9)

ただし, N_{ave} は相関行列の平均回数, N_{sub} は相関行列のサイ ズを決定し, SDI における実アレイ数に対応する有効パルス数 である.

Capon 法では、測定 Doppler 速度を持つ信号の強度を保持するため、vを変化させながら、各ピクセルにおいて $P_{out}(v,r,n)$ を計算し、v方向にピークサーチを行うことで、各ピクセルにおける Doppler 速度推定を行うことができる.

出力電力 *P*_{out}(*v*,*r*,*n*) は次式で得られる.

$$P_{\rm out}(v,r,n) = \frac{1}{\mathbf{a}(v)^{\rm H}(R_{r,n}+\eta I)^{-1}\mathbf{a}(v)}$$
(10)

ここで, *I* は単位行列であり, η*I* を印加することで逆行列計算 を安定化させたり, Capon 法の計算精度を調整することができ る [14].

4. 分離追跡方法

ここでは推定された Doppler 速度を用いて目標の分離と追跡 を行う方法について述べる.

4.1 偽推定速度の除去

まず,各ピクセルにおいて計算された Capon 法の出力電力 Pout(v,r,n) でしきい値を超えるものについて,ピーク検出を 行う.これによってある程度,雑音の影響を低減することがで きる.しかし,相関の抑圧が十分でなかった場合などに,偽推 定速度が出現する可能性がある.

そのため、更なる偽推定速度の除去方法を提案する. 図2に 提案法の概要図を示す. 各ピクセルにおいて,速度を計算した 場合,同一の目標からの信号は,時間–レンジ–Doppler速度空 間上で近接して存在すると考えられる. そのため,時間–レン ジ–Doppler速度空間で各推定点間の距離を計算し,ある距離 内に存在する推定点の個数がしきい値を下回る推定速度を偽推 定速度として除去する.

4.2 DBSCAN を用いた目標数と初期位置・速度の推定 次に,目標数の推定方法と,目標の追跡方法について述べる.



図 2 提案する偽推定速度除去方法と追跡方法の概要図

本研究では,第一節で述べたように,特にレンジで目標が分離 できないような環境下で有効な手法を提案することを目標とし ている.歩行人体の追跡を行う場合,そのような状況は長時間 継続しない.そのため,提案法を適用する測定時間内には目標 数の増減がないと仮定する.そこで,まず測定開始時間におい て,Doppler速度-レンジ平面でDBSCANを適用し,目標の初 期位置と速度を推定する[10].

DBSCAN は目標のある平面における密度を計算し,大きい ものを信頼できるクラスタとし,小さいものは雑音であるとし て除去するクラスタリング方法である [13]. DBSCAN はクラ スタ数つまり,目標数の推定も行うことができる.

実際には、まずある推定速度を中心として、距離内に存在す る推定速度を同一のクラスタであるとする.この中心を変化さ せながらクラスタを拡張する.その後、クラスタに存在する推 定速度の数がしきい値以下であるものを雑音として除去する.

4.3 レンジ-Doppler 速度情報を利用した追跡

ここまでに、目標数と、目標の初期位置、速度を推定するこ とができた.次に、目標の追跡と分離を行う.図2に概念図を 示す.歩行人体を仮定した場合に、運動の加速度が小さいと考 えられるため、ある時間内で、等速直線運動を仮定する.等速 直線運動を仮定した場合には、過去の情報を用いて現在の位置 を推定する事ができる.そのため、あるクラスタにおいて、過 去の推定速度における最小・最大の Doppler 速度より v_d の誤 差を許容し、現在のレンジを推定する.推定された範囲内のレ ンジ、Doppler 速度に入る推定 Doppler 速度を同一の目標であ るとして、クラスタリングしていくことで、目標の追跡、分離 を行う.

5. システムモデル

本研究では、中心周波数 4.2GHz, 3.1-5.3GHz の帯域幅を



図 4 実験における時空間画像. |s(r,n)| を表す.

持つ UWB レーダ (PulsOn 400, Time Domain Corporation, AL) を用いた. パルス繰り返し周期は 200Hz である. 送受信 はモノスタティックレーダを仮定した 2 つの近接したホーン アンテナ (model DP240, Flann Microwave Ltd., UK) を用い た[7].

図 3 に実験のシナリオを示す.およそ時間 0.2 秒から 0.4 秒 において 3 目標が同一レンジに存在する.なお,三人の被験者 は異なる速度で等速直線運動を行った.また提案法に使用する 全パルス数 $N_{\text{ave}} + N_{\text{sub}} - 1$ を 24, $N_{\text{sub}} = 8$ とした.信頼す るピクセルを決定する Capon 法の強度を用いたしきい値処理 には,最大推定出力電力の 1/50 を用いた. η は使用する信号 電力の 1/100 とした.追跡に用いる許容速度誤差 v_{d} は 0.2m/s とした.

5. 実験による評価

6.1 実験結果

図4に時空間画像を示す.時空間画像を見ただけでは,3目 標が存在すること,目標それぞれがどのように動いているかを 推定することが難しいことがわかる.

図 5-8 に Capon 法を時空間画像に適用し,各ピクセルにおいて Doppler 速度推定を行った結果を示す. Capon 法では速度推定を行う際に,ピークサーチを行う.同一ピクセルにおい



図 5 各ピクセルにおける Doppler 速度の推定結果-1. 単位は m/s.



図 6 各ピクセルにおける Doppler 速度の推定結果-2. 単位は m/s.

て,複数の速度が検出された場合に,速度が大きい順にピクセルに格納した.図9に時間 0.4 秒,距離 2.7m における Capon 法のスペクトルを示す.低速度箇所に偽推定速度が存在するが,3目標の速度を分離して推定できていることがわかる.

図 5-7 に注目すると,目標が交差する箇所において,複数の Doppler 速度が推定されていることがわかる.図8に示すよう に,目標が3目標にもかかわらず,低速のDoppler 速度が推 定された.これは複数目標が干渉しているために起こった誤推 定または,歩行者の手足から反射波が返ってくることが知られ ているので [],手足の速度を推定したと考えられる.しかし, -2m/s 程度の低速を持つピクセル数は少なく,提案した偽推 定速度除去法によって取り除くことができる.

図 10 に DBSCAN を Doppler 速度,レンジ平面に適用し, 目標の初期速度,初期位置,目標数を推定した結果を示す.図 内で表示される色は目標のラベルを表し,図内で表示される色 は目標のラベルを表し,異なる目標が異なる色で表現されてい る場合,目標の分離に成功したと言える.ラベルの数が3であ ることから,目標数を正確に推定できていることがわかる.

-4 -



図 7 各ピクセルにおける Doppler 速度の推定結果-3. 単位は m/s.



図 8 各ピクセルにおける Doppler 速度の推定結果-4. 単位は m/s.

図 11 に分離・追跡結果を示す. 図 11 に示すように,提案法 は正確に目標の位置を推定し,目標の追跡に成功しており,各 目標がどのような速度で,どのように運動しているかを把握す ることができている.

6.2 考 察

Capon 法の速度推定に用いる式 (6) では、速度が測定中に一 定であること、また振幅が一定であることを仮定している.つ まり、 $N_{\text{ave}} + N_{\text{sub}} - 1$ 回のパルス送信中に速度、信号の強度 が一定であることを仮定している.人体の追跡にこの方法を用 いる場合、目標の速度が変化することを考え、これらの値を小 さくする方が好ましい.しかし、 N_{ave} を小さくした場合、信号 の相関を抑圧することができず、推定精度が悪化し、 N_{sub} を小 さくした場合、分解能が低下するという問題点がある.

加えて、速度を持つターゲットを観測する場合、レンジが移動し、レンジの変化による信号の減衰も考えられる.そのため、 Doppler 速度の推定において、使用するパルス数や、平均回数 を調整することは重要な課題である.

使用する全パルス数 Nave + Nsub - 1 を 24 とし、パルス繰



図 9 時間 0.42 秒, 距離 2.7m における Capon 法のスペクトル



図 10 DBSCAN を用いた初期位置・速度推定結果

り返し周期が 200Hz であるため 0.12 秒の間に目標が等速運動 するとした.人間の運動を考えると現実的な時間である.また この時間は計算コストを無視した場合のシステムの遅延時間と なる.今後の課題として使用パルス数の最適化,低減,また方 法の修正に取り組む.加えて,本研究では,様々なしきい値処 理を行ったため,これらの最適化にも取り組む.

7. まとめ

本稿ではモノスタティックレーダを用いた複数歩行人体の追 跡・分離方法を提案した.まず時空間画像上において, Capon 法 を用いて Doppler 速度を推定した.その後,推定した Doppler 速度が距離-時間-Doppler 速度空間で密集することを利用し, 虚像除去や初期位置推定を行った.初期位置推定にはクラスタ リング方法の一つである DBSCAN を用いた.その後,歩行人 体は短時間の間に等速直線運動を行うと仮定し追跡を行った. その結果,3人が同一レンジ,同一時刻に交差するような環境下 においても目標の分離・追跡に成功した.今後はパラメータの 最適化や、リアルタイムアプリケーション化について取り組む.



図 11 提案法による追跡と分離の結果. 色はターゲットのラベルを 表す.

謝辞 本研究の一部は科学研究費補助金特別研究員奨励費 15J05687・基盤研究 (A)25239057・若手研究 (B)15K18077・ 国際共同研究加速基金(国際共同研究強化)15KK0243,京都 大学 COI プログラム,公益財団法人ひょうご科学技術協会学 術研究助成,平成28年度生体医歯工学共同研究拠点共同研究 プロジェクト,および平成27年度融合チーム研究プログラム (SPIRITS)の助成により実施された.

献

文

- A. Mittal and L. S. Davis, "A General Method for Sensor Planning in Multi-Sensor Systems: Extension to Random Occlusion," Int. J. Comp. Vis., vol. 76, pp. 31-52, 2008
- [2] S. Nobuhara, Y. Tsuda, T. Matsuyama, and I. Ohama, "Multiviewpoint Silhoutte Extraction with 3D Contextaware Error Detection, Correction, and Shadow Suppression," IPSJ Trans. Comp. Vis., vol. 1, pp. 242-259, 2009.
- [3] S.-H. Chang, R. Sharan, M. Wolf, N. Mitsumoto, and J. W. Burdick, "An MHT algorithm for UWB radar-based multiple human target tracking," in Proc. IEEE International Conference on Ultra-Wideband, pp. 459-463, 2009.
- [4] Y. Kim and H. Ling, "Human activity classification based on microDoppler signatures using a support vector machine," IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens., vol. 47, pp. 1328-1337, 2009.
- [5] K. Saho, T. Sakamoto, T. Sato, K. Inoue, and T. Fukuda, "Pedestrian imaging using UWB Doppler radar interferometry," IEICE Trans. Commun., vol. E96-B, pp. 613âĂŞ623, 2013.
- [6] M. Anabuki, S. Okumura, T. Sakamoto, K. Saho, T. Sato, M. Yoshioka, K. Inoue, T. Fukuda, and H. Sakai, "Ultrawideband radar imaging using adaptive array and Doppler separation," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., accepted.
- [7] Takuya Sakamoto, Toru Sato, Pascal J. Aubry, and Alexander G. Yarovoy, "Texture-Based Automatic Separation of Echoes from Distributed Moving Targets in UWB Radar Signals," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 53, pp. 352-361, 2015.
- [8] T. Sakamoto, D. Akiyama, T. Sato, and T. Sato, "Spectrum-Free Estimation of Doppler Velocities Using Ultra-Wideband Radar," IEEE Access 2016.
- [9] T. Sato, T. Sakamoto, S. Okumura, and T. Sato, "Multiple Target Tracking and Separation Technique Based on Texture Information in Range-Time Image using Ultra-

Wideband Radar," Proc. 2016 International Symposium on Antennas and Propagation, no. 20036, 2016.

- [10] S. Okumura, T. Sato, T. Sakamoto, and T. Sato, "Technique of Tracking Multiple Pedestrians Using Monostatic UWB Doppler Radar with Adaptive Doppler Spectrum Estimation," Proc. 2016 International Symposium on Antennas and Propagation, no. 20026, 2016.
- J. Capon, "High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis," Proc. IEEE, vol. 57, pp. 1408-1418, 1969.
- [12] F. Gran, A. Jakobsson, and J. A. Jensen, "Adaptive spectral doppler estimation", IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Control, vol. 56, pp. 700-714, 2009.
- [13] M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander, and X. Xu, "A densitybased algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise," Proc. 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 1996.
- [14] J. Li, P. Stoica, and Z. Wang, "On robust Capon beamforming and diagonal loading," IEEE Trans. Signal Process., vol. 51, 1702-1715, 2003.