

平成 30 年 4 月 19 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2013～2017

課題番号：25249057

研究課題名（和文）UWBレーダードップラー分離干渉計法による人体の高次モニタリング

研究課題名（英文）Precise monitoring of human body with UWB radar Doppler interferometry

研究代表者

佐藤 亨（SATO, Toru）

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号：60162450

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,600,000円

研究成果の概要（和文）：UWB（超広帯域）レーダーを用い、人体各部の動きに伴う微小なドップラー効果を利用して人体形状をイメージングすると共に動作状況を把握する手法を開発した。屋内外の環境を想定した複数歩行人体を分離識別し、個別に追跡することに成功した。また家庭内やオフィス環境において複数の人が存在する状況で、各人の呼吸および心拍に伴う微小な体表面の変位を検出し、遠隔でこれらのバイタル情報をモニターする手法を確立した。

研究成果の概要（英文）：We developed methods for precisely imaging human body and its movement based on micro-Doppler effect due to motion of individual body parts observed with UWB (Ultra Wideband) radar. Assuming various indoor and outdoor environments, multiple walking humans are identified and separately tracked. We also succeeded to establish a vital monitoring algorithm, with which respiration and heartbeat of multiple persons in a home or office can be measured remotely and simultaneously.

研究分野：電波工学

キーワード：UWBレーダー イメージング ドップラー干渉計法

1. 研究開始当初の背景

(1) 社会的背景

わが国は世界でもまれな超高齢化社会を迎えつつあり、医療や介護の領域にとどまらず、人間活動のあらゆる面で、科学技術を駆使した生活支援の社会基盤を構築することが求められている。とりわけ ICT(情報通信技術)の活用による安全・安心な社会の確立に対する社会的要請は強い。

計測・イメージングの分野では、将来におけるロボット技術の普及を見据えて、人間を高速かつ正確に認識することが不可欠である。光学的画像処理技術は、特に顔認識において進歩が著しいが、複雑な背景や距離方向に重なった複数人体の輪郭抽出は依然として困難な課題である。

電磁波を用いた技術では、21世紀に入って UWB(超広帯域)信号の規格が制定され、自動車の衝突防止用途等の高分解能レーダーが実用化されたが、経済的・技術的制約から利用できる帯域幅は 500MHz 程度に制約される。このため、公称距離分解能は 30cm 程度にとどまり、人体の正確なイメージングには不十分であった。

(2) 研究開始までの成果

代表者らは、本研究開始まで UWB レーダーを用いた近距離目標のイメージング手法を開発してきた。その主な成果を以下に示す。

① SEABED 法、ENVELOPE 法等の超高解像度形状推定

受信信号の遅延時間と物体形状の可逆的変換関係に着目した逆問題解法を提案し、波長の 1/100 程度という超高解像度を実現した。

② 壁面反射を利用した少数アンテナによる目標推定

従来は不要信号とみなされていた室内壁面等による反射波を利用し、実アンテナとその鏡像で構成されるアレイを利用することで、数本のアンテナで目標形状や運動を正確に推定することを可能とした。

③ マイクロドップラー効果を利用した運動目標の分離識別

複雑形状物体の各部からの散乱波がわずかに異なるドップラー偏移を持つことを利用し、4本のアンテナのみを用いて、ターンテーブル上の物体形状や歩行人体の概略形状をリアルタイムで推定することに成功した。

2. 研究の目的

人体の各部は、運動中はもちろん就寝時においても、複雑な運動をしている。代表者らは、UWB(超広帯域)パルスレーダーを用いて、目標の運動に伴う微小なドップラー偏移を検出し、時間・周波数領域で複数目標を分離した上で、干渉計法の原理によって、複雑形状物体の位置、形状、運動を把握する手法を開発してきた。本研究では、これらの手法を人体の運動に特化し、実用性能を向上させて、以下の社会的ニーズに対応できるイメージング手法を実現することを目的とする。

(1) 屋内および建物周辺における侵入者を正確に検知し、その動作を把握する。

(2) ショッピングモール等において複数歩行者の運動を把握し、カート等の走行を支援する。

(3) 家庭内における家族のそれぞれを同定し、遠隔で呼吸や心拍などのバイタルモニターを行う。

3. 研究の方法

上記の各研究目的を達成するため、本研究ではそれぞれ以下の要素技術を開発した。

(1) UWB ドップラーレーダー干渉計法

背景に述べた技術を基に、運動する人体のイメージングに特化して、観測者から見た視線方向速度の違いにより身体各部を分離した上で、それぞれの部位の方向を干渉計の原理で特定する。これに高精度距離推定法を組み合わせて正確な 3次元人体イメージングを可能とする。

(2) 相関抑圧アダプティブ方向推定

複数の歩行者が並行する場合など、ドップラー速度のみでは十分な分離が得られない場合に、アダプティブアンテナの手法で不要波を抑圧し、所望信号の到来方向推定精度を向上させる。この際、異なる目標の信号が相関を有することが分離の障害となるので、適切な時間および周波数平均により分離性能を向上させる。

(3) トポロジー相関法による心拍推定

レーダーを用いた遠隔バイタルモニターにおいては、体表面の微小変位から呼吸と心拍成分を抽出する必要がある。特に心拍による変位は 0.1mm 程度と呼吸成分より 1桁小さく、抽出が困難である。隣接する心拍サイクルにおいて信号の特徴点を抽出し、それらの間のトポロジー相関を評価することで高精度の心拍推定を実現する。

4. 研究成果

上述の開発技術を、シミュレーションモデル実験と、パナソニック社との共同開発によるミリ波帯ドップラーレーダーを用いた実験データに適用し、以下の成果を得た。

(1) 高分解能歩行人体イメージング

送信 1 素子、受信 3 素子という最小構成のアンテナを用いて人体の概略形状をイメージングすることに成功した。図 1 に 2 秒間の歩行人体を正面からイメージングした結果の例を示す。図中の各点の色は視線方向速度を表し、紫色から黄色までが -2m/s から 0m/s に対応する。左図は単純な干渉計法の結果を示し、人体各部からの多数の散乱点が混在して人体の外周が漠然と見えるのみであるが、右図の提案法では頭や手足が明確に分離され、その速度も正しく表現されている。これにより外形のみでなく歩幅や方向周期なども計測可能である。さらに、松葉杖についての歩行や車椅子での移動など、病院内を想定した環境での移動形態の分類を可能とした。

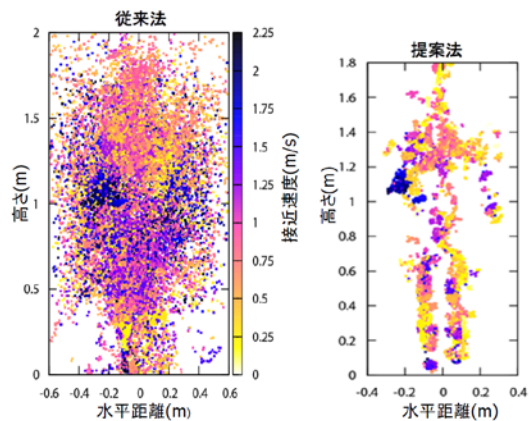


図 1. 歩行人体のイメージング結果

(2) 複数歩行人体の分離識別と追跡

3~4素子の小規模アレイを用いて、並んで歩行する人体からの多数の反射点をグループ化し、正しく分類することに成功した。さらに天井にレーダーを設置した屋内環境を想定して、複数歩行者を個別に追跡することを可能とした。図2は、モーションキャプチャにより作成した歩行人体モデルを118点の点目標として表現し、これらからの散乱信号をレイトラッキングしたシミュレーションデータに基づき、クラスタリングアルゴリズムを用いて分離識別した結果を示す。左図は人体モデル、右図は推定された目標散乱点を示し、色は分類結果を表す。近接した3人の歩行者各部からの散乱点が正しく分類されていることがわかる。

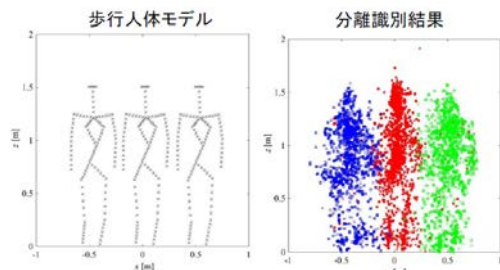


図 2. 複数歩行人体の分離識別

(3) 心電計に匹敵する精度の遠隔バイタル計測

装着型の心電計による心拍計測結果の比較により、ミリ波ドップラーレーダーを用いてこれに匹敵する精度での心拍計測が可能であることを実証した。図3は被験者の胸に装着した心電計と、開発した79GHzレーダーにより約70cmの距離から測定した瞬時心拍間隔(連続する2拍動の時間間隔)の時間変化を示す。両者が5.1msの誤差という高い精度で一致していることがわかる。図に見られる約5秒周期の変動は、呼吸に伴う心拍周期変動を表し、リラックス時の特徴である。この成分の大きさがストレス状態に応じて変化することが知られており、これを計測する

ためには50ms程度以下の誤差で瞬時心拍間隔を計測することが要求される。上の結果は本手法がこの要求を十分に満たすことを示している。

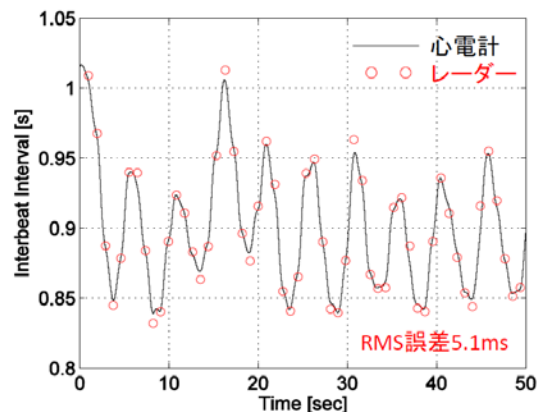


図 3. レーダーと心電計で計測された瞬時心拍間隔の時間変化

これらの成果は、いずれも国際学術誌や国際会議で発表し、高い評価を受けている。特に遠隔バイタル計測については、世界最高の精度を達成し、関連分野のトップジャーナルに掲載された他、報道発表も行い、世界各機関から問い合わせを受けるなど注目されている。今後は共同研究先であるパナソニック社を中心に商品化を進める計画であり、病院や保育所などでの活用が期待される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計19件)

- (1) T. Sakamoto, P. Aubry, S. Okumura, H. Taki, T. Sato, and A. Yarovsky, Noncontact Measurement of the Instantaneous Heart Rate in a Multi-person Scenario Using X-band Array Radar and Adaptive Array Processing, IEEE J. Emerg. Sel. Topics Circuits Syst., Vol. 8, DOI: 10.1109/JETCAS.2018.2809582, 2018.
- (2) A. Rahman, V. Lubecke, O. Boric-Lubecke, J. Prins, and T. Sakamoto, Doppler radar techniques on accurate respiration characterization and subject identification, IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, Vol. 8, DOI:10.1109/JETCAS.2018.2818181, 2018.
- (3) T. Sakamoto, D. Akiyama, T. Sato, and T. Sato, Spectrum-free estimation of Doppler velocities using ultra-wideband radar, IEEE Access, vol. 5, pp. 3240-3249, DOI:10.1109/ACCESS.2016.2614824, 2017.
- (4) M. Anabuki, S. Okumura, T. Sakamoto, K. Saho, T. Sato, M. Yoshioka, K. Inoue, T. Fukuda, and H. Sakai,

- Ultra-Wideband Radar Imaging using Adaptive Array and Doppler Separation, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Vol. 53, pp.190-200, DOI:10.1109/TAES.2017.2649798, 2017.
- (5) Y. Sasaki, F. Shang, S. Kidera, T. Kirimoto, K. Saho and T. Sato, Three-dimensional Imaging Method Incorporating Range Points Migration and Doppler Velocity Estimation for UWB Millimeter-wave Radar, *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, Vol. 14, pp.122-126, DOI: 10.1109/LGRS.2016.2628909, 2017.
- (6) T. Sakamoto, A. Matsuoka, and H. Yomo, Estimation of Doppler velocities from sub-Nyquist ultra-wideband radar measurements, *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, pp. 8557-8565, DOI: 10.1109/JSEN.2016.2615074, 2016.
- (7) S. Okumura, T. Sakamoto, T. Sato, M. Yoshioka, K. Inoue, T. Fukuda and H. Sakai, Comparison of clutter rejection techniques for measurement of small displacements of body surface using radar, *Electronics Letters*, Vol. 52, pp.1635-1637, DOI: 10.1049/el.2016.1461, 2016.
- (8) T. Hashimoto, K. Nishimura, and T. Sato, Adaptive Sidelobe Cancellation Technique for Atmospheric Radars Containing Arrays with Nonuniform Gain, *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E99-B, pp. 2583-2591, DOI:10.1587/transcom.2016EBP3047, 2016.
- (9) T. Sakamoto, T. Sato, P. Aubry, and A. Yarovoy, Fast Imaging Method for Security Systems using Ultra-Wideband Radar, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Vol. 52, pp.658-670, DOI: 10.1109/TAES.2015.140167, 2016.
- (10) T. Sakamoto, R. Imasaka, H. Taki, T. Sato, M. Yoshioka, K. Inoue, T. Fukuda, and H. Sakai, Feature-based Correlation and Topological Similarity for Interbeat Interval Estimation using Ultra-Wideband Radar, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 63, pp. 747-757, DOI:10.1109/TBME.2015.2470077, 2016.
- (11) H. Yamazaki, T. Sakamoto, H. Taki, and T. Sato, False image suppression in two-dimensional shape estimates of a walking human using multiple ultra-wideband Doppler radar interferometers, *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E99-B, pp.134-142, DOI:10.1587/transcom.2015ISP0024, 2016.
- (12) T. Sakamoto, S. Okumura, R. Imanishi, H. Taki, T. Sato, M. Yoshioka, K. Inoue, T. Fukuda, and H. Sakai, Remote heartbeat monitoring from human soles using 60-GHz ultra-wideband radar, *IEICE Electronics Express*, vol. 12, pp. 20150786, DOI:10.1587/elex.12.20150786, 2015.
- (13) T. Sakamoto, T. Sato, P. Aubry, and A. Yarovoy, Ultra-Wideband Radar Imaging using a Hybrid of Kirchhoff Migration and Stolt F-K Migration with an Inverse Boundary Scattering Transform, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 63, pp. 3502-3512, DOI:10.1109/TAP.2015.2431725, 2015.
- (14) T. Sakamoto, H. Yamazaki, and T. Sato, Two-dimensional imaging of a pedestrian using multiple ultra-wideband Doppler interferometers with clustering-based echo association, *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E98-B, pp. 1795-1803, DOI:10.1587/transcom.E98.B.1795, 2015.
- (15) T. Sakamoto, R. Imasaka, H. Taki, T. Sato, M. Yoshioka, K. Inoue, T. Fukuda, and H. Sakai, Accurate heartbeat monitoring using ultra-wideband radar, *IEICE Electronics Express*, Vol. 12, pp. 20141197, DOI:10.1587/elex.12.20141197, 2015.
- (16) T. Sakamoto, T. Sato, P. J. Aubry, and A. 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, DOI:10.1109/TGRS.2014.2322438, 2015.
- (17) K. Saho, H. Homma, T. Sakamoto, T. Sato, K. Inoue, and T. Fukuda, Accurate Image Separation Method for Two Closely Spaced Pedestrians Using UWB Doppler Imaging Radar and Supervised Learning, *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E97-B, pp. 1223-1233, DOI:10.1587/transcom.E97.B.1223, 2014.
- (18) K. Saho, T. Sakamoto, T. Sato, K. Inoue, and T. Fukuda, Accurate and Real-Time Pedestrian Classification Based on UWB Doppler Radar Images and Their Radial Velocity Features, *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E96-B, pp. 2563-2572, DOI:10.1587/transcom.E96.B.2563, 2013.
- (19) K. Saho, T. Sakamoto, T. Sato, K. Inoue, and T. Fukuda, Pedestrian Imaging Using UWB Doppler Radar, Interferometry, *IEICE Trans. Commun.*,

[学会発表] (計 33 件)

- (1) (Invited) T. Sakamoto, K. Konishi, M. Muragaki, S. Okumura, and T. Sato, Adaptive array radar imaging of moving human body for measurement of vital signs, Proc. the 40th Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Toyama, Japan, August 1-4, 2018.
- (2) (Invited) T. Sakamoto, K. Konishi, K. Yamashita, M. Muragaki, S. Okumura, and T. Sato, Adaptive array radar imaging of a human body for vital sign measurement, Proc. 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, Boston, Massachusetts, July 8-13, 2018.
- (3) (Invited) T. Sakamoto, P.J. Aubry, A.G. Yarovoy, S. Okumura, H. Taki, and T. Sato, Super-resolution array radar imaging of human bodies for heartbeat monitoring, Proc. XXXIInd International Union of Radio Science (URSI) General Assembly & Scientific Symposium, Montreal, Canada, 19-26 August, 2017.
- (4) (Invited) T. Sakamoto, T. Sato, K. Iwasa, and H. Yomo, Frequency-domain interferometric imaging and velocity vector estimation using networked ultra-wideband 80-GHz array radar systems, Proc. 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, San Diego, CA, USA, 9-14 July, 2017.
- (5) M. Anabuki, S. Okumura, T. Sakamoto, K. Saho, T. Sato, M. Yoshioka, K. Inoue, T. Fukuda, and H. Sakai, High-resolution Imaging and Separation of Multiple Pedestrians Using UWB Doppler Radar Interferometry with Adaptive Beamforming Technique, Proc. The 11th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Paris, France, 19-24 March, 2017.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 亨 (SATO, Toru)

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号：60162450

(2) 研究分担者

阪本 卓也 (SAKAMOTO, Takuya)

兵庫県立大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30432412