

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2013

課題番号：21246065

研究課題名(和文) 少数アンテナを用いたUWBレーダー高次イメージング手法の開発

研究課題名(英文) Development of higher order imaging methods for UWB radars with small number of antennas

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) 34,600,000円、(間接経費) 10,380,000円

研究成果の概要(和文)：自動車やロボットなど移動体の周囲環境認識やセキュリティシステムなどにおいて、UWB(超広帯域)レーダーは室内計測に不可欠なcm級の高分解能を提供する点で注目される。本研究では、従来はイメージングの障害となっていた周囲からの反射波や、目標との相対運動に伴うドップラー効果を積極的に利用し、1本もしくは少数のアンテナのみを用いて、目標の位置や距離にとどまらず形状や運動までの高次の情報を得るイメージング手法を開発した。特に、歩行人体の各部が異なる速度を有することを用いて、3次元形状や歩幅、歩行形態などの高次情報を高い精度で得ることに成功した。

研究成果の概要(英文)：UWB (Ultra WideBand) radars have gathered attention in various applications including environmental recognition in cars and robots because of their very high resolutions on the order of cm. We made positive use of undesired natures of the reflected signals such as multiple reflections from walls and Doppler effects of body parts with relative motions, and have developed high-resolution imaging algorithms for UWB Doppler radars with a single or small-numbered antennas. Especially, we succeeded to precisely image a walking human body and to classify groups of pedestrian movements.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：レーダー 超広帯域 イメージング

1. 研究開始当初の背景

レーダーは目標までの距離を正確に計測できる特長を持つが、光学的手法に比べて分解能の点で決定的に劣っており、室内計測には不利であった。しかし、ここ数年の UWB (超広帯域) 信号の規格制定により、距離分解能については数 cm が得られるようになって、地下探査や災害現場の計測、生体計測など、応用分野が急速に広がっている。申請者らは、この UWB 信号の性質を最大限に利用した 3 次元高速イメージング手法として SEABED 法を開発し、改良を重ねて波長の 1/100 程度という超高分解能を持つことを実証してきた。

ただし、これらの手法は、

- ・広範囲のアンテナ走査または大規模アンテナアレイを必要とすること
- ・目標形状が比較的単純なものに限られること

が大きな制約であった。このうち前者については、UWB 通信の分野で最近提唱された、室内の壁面などからの反射波を利用して波源位置を決定する手法が応用可能である。申請者らはこの原理を用いて、単一のアンテナを送受信に利用して目標位置を特定する手法を考案している。また後者については、目標の運動に伴うドップラー効果を用いて目標の各部位を分離・識別する手法が目玉されている。

2. 研究の目的

本研究においては、上述の各手法を SEABED 法に統合することで、高解像度のイメージングに必要なアンテナ本数 (またはアンテナ走査点数) を削減し、システムの小型化・低コスト化を実現すると同時に、イメージング可能な物体形状の複雑化と目標運動の詳細な解析による目標識別 (人間と動物など) 能力の向上を目指す。研究期間の具体的な目標を以下に示す。

- (1) 単一アンテナによる点状物体の位置計測手法の確立

図 2 に示す仮想的ランダム配置アンテナ群に対する SEABED 法を開発する。特に目標位置と同時に、任意の壁面形状を未知量として反復学習により決定する手法を確立する。

- (2) ドップラー効果を用いた目標分離による人体形状推定

人間の頭、腕、胴、足をそれぞれ楕円体または円柱で近似し、3 素子アレイにより個別に 3 次元位置と運動を推定して分離識別した上で、それらに SEABED 法を適用することで、人体の高度なイメージングを実現する。

- (3) 少数アンテナによる任意形状移動物体のリアルタイムイメージング法の開発

上記の 2 手法を統合し、3 素子程度の少数アンテナ素子を用いた室内移動物体のイメージング技術を開発する。目標とレーダーの両方が独立に移動する場合を想定し、そのそれぞれを推定することで仮想アンテナ配置を

稠密化して分解能を向上させる。

これらのいずれについても、FDTD 等を用いた数値シミュレーションと室内実験の両方によって性能を定量的に評価し、実時間処理の可能なアルゴリズムとすることを目指す。

3. 研究の方法

研究目的に示した 3 つの具体的課題を順次解決することとした。平成 21 年度は、課題 (1)、(2) について、数値シミュレーションと室内実験の環境を整備し、これと並行して基本的イメージングアルゴリズムの開発を進めた。特に人体について、既存の数値人体モデルを分割して各部を独立に動かすことのできる簡易なシミュレーション用モデルを作成し、基礎実験との整合性を検証した。平成 22 年度、23 年度はこれらに基づき、上記 2 課題について実用レベルの実時間アルゴリズムを開発し、その性能を検証した。課題 (3) については、研究協力者の所属するパナソニック先端技術研究所で開発された 26GHz 帯の 3 素子アンテナを有するドップラーレーダーシステムの貸与を受け、これを用いて平成 23 年度より歩行者の識別と歩行形態の認識を行う処理システムの開発に着手し、最終年度である平成 24 年度に完成させることを目指した。ただし、歩行者識別システムを作成し評価した結果、病院内で想定される歩行種別について期待を上回り実用性能を有することが判明した。この実証のため、歩行パターン再策定、エコー取得、システム最適化を行うことが必要となったため、研究の一部を平成 25 年度に繰り越すこととした。

4. 研究成果

初年度となる平成 21 年度は、まず単一アンテナによる点状目標のイメージング技術を開発した。まず、UWB 電波伝搬の計算手法を本研究課題に適するように高度化し、任意形状の壁面を持つ室内を想定した電波伝搬を高速かつ正確にシミュレートした。本研究において開発する手法は比較的低周波の GHz 帯などにおいても利用可能である。この場合には目標形状により反射波形が変化することを考慮する必要がある。FDTD 法を規範として伝搬計算手法の精度を検証しつつ高速化を実現した。

次に多重反射波の分離技術を開発した。実際の受信信号は複数の散乱波が重ね合わさったものであり、多重反射波の干渉が生じる。これらを分離することは SEABED 法においても不可欠な要素技術である。既開発の手法を数値実験に基づき定量的に比較し、最適な手法を定めた。

第二に、ドップラー効果を用いた目標分離による人体形状推定技術の開発を行った。まず、単純な形状の人体モデルを想定し、これを 3 素子アレイで観測する場合のシミュレーションを行い、分解能や虚像抑圧性能を定量的に評価した。

最後に、ドップラーレーダー実験環境を整備した。申請者らの研究室では、平成 20 年度までの基盤研究 A により、3~10GHz および 26GHz 帯においてアレイアンテナとスイッチアレイを用いた UWB レーダー実験環境を構築してきた。これを本研究課題で必要とする 2 素子送受信および 3 素子受信の実験に適用できるように受信機を 2 セット追加し、位相校正などを行ってドップラーレーダーシステムとしての基本性能を確認した。

第 2 年度となる平成 22 年度には、それぞれの課題について以下の成果を得た。

・単一アンテナによる点状物体の位置計測手法の確立

壁面形状が既知であれば、鏡像点位置が決定できるため未知目標が直接イメージングできるが、これは現実的な仮定ではない。本研究では目標と壁面の両方の形状を推定することを最終的な目標とする。最初の段階としては、送受信アンテナに対する相対位置が正確に計測できる参照用目標を移動させて学習的にイメージングを行い、壁面形状を決定することに成功した。

壁面が局所的に平面で構成されている場合には、目標の移動に伴い鏡像点はある期間安定に存在し、不連続に移動する。個々の局所平面に対応する鏡像点を自動的に分離識別するアルゴリズムを開発した。

・ドップラー効果を用いた目標分離による人体形状推定

点状目標が異なるドップラー偏移を持つ場合には、3 素子の干渉計で直接目標点位置が決定できる。雑音環境下のこの手法による分解能を、数値実験と室内実験により検証した。

前年度に構築した人体モデルを用いたシミュレーションにより、目標のイメージングを行った。自由空間に人体が存在する場合と反射壁に囲まれた室内を平行移動する場合を比較し、遅延して到達する反射波を利用して送受信点からは直接に見えない背面を含めたイメージングを行い、壁面形状や目標と壁の相対位置に対するイメージングの精度の変化を定量的に評価した。

第 3 年度となる平成 23 年度には、それぞれの課題について以下の成果を得た。

・単一アンテナによる点状物体の位置計測手法の確立

前年度までは、あらかじめ送受信アンテナに対する位置が既知と仮定した参照用目標を移動させることで壁面形状を推定したが、参照用目標が滑らかに移動するモデルを仮定すれば、計測する各点において、直達波と少なくとも一つの反射波の遅延時間より一つの鏡像点位置が決定できる。追尾レーダーにおいて利用されるカルマンフィルターアルゴリズム等を利用して参照用目標位置を決定する手法を開発した。

・参照用目標を必要としない計測法の開発
本研究では、最終段階では事前学習なしに未知物体を計測することを目指している。この

場合の主な問題は、壁面形状と目標の位置に加えて、目標形状をも同時に推定する点にある。増大する自由度を拘束しつつ安定に収束されるアルゴリズムを開発した。

・ドップラー効果を用いた目標分離による人体形状推定

前年度では人体各部を固定して平行移動することを想定したが、今年度は実際的な頭、腕、足が周期的に揺動する人体モデルを用いてイメージングを行った。この課題の最終段階として、歩行に際して各部分の上で反射点が移動することを利用し、SEABED 法の原理を適用して高解像度化した。

・少数アンテナによる任意形状移動物体のリアルタイムイメージング法の開発

3 素子アレイに鏡像を統合した分解能向上記 2 課題を統合して、移動する任意形状物体のイメージング法の開発を進めた。最初にドップラー効果を用いた 3 素子干渉計法に、壁面反射による鏡像を加えた多点推定を行い、解像度を向上させた。既知形状の壁面の利用、学習による壁面形状推定、学習なし推定の 3 段階を試み、いずれも良好な結果を得た。

また上記の逆として、移動ロボットの周囲環境モニターを想定した移動観測点による壁面測定を行う。最初に移動体自身が環境に与える影響を無視した点状送受信体を想定して動作を確認し、次に有限形状の移動体の影響を評価した。

第 4 年度(当初計画の最終年度)となる平成 24 年度には、これまでに開発してきた単一アンテナと壁面の鏡像アンテナとで構成される干渉計による有限形状物体のイメージング手法に、ドップラー効果を用いた目標分離の手法を融合させ、これにより複数歩行者を分離識別すると共に、それぞれの目標の移動速度ベクトルを決定する手法を開発し、その性能を数値シミュレーションにより検証した。ドップラー分離干渉計法によるイメージング手法の実験検証については、目標点の 3 次元分布を代表するパラメータを適切に選定することで、荷物を持っているかどうかなどの歩行形態の違いを確実に識別できることが明らかとなった。特に病院内で想定される歩行種別については、当初の期待を上回り、実用性能を有することが判明した。この実証のため、歩行パターン再策定、エコー取得、システム最適化を行うことが必要となったため、研究の一部を平成 25 年度に繰り越して研究を継続した。その結果、通常歩行、松葉杖についての歩行、車椅子での独立運行、補助者が車椅子を押す運行のそれぞれを、十分な精度で分離識別できることを検証した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 22 件)

1. 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, 査読有, accepted for publication, 2014.
2. 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., 査読有, Vol.E96-B, No.10, pp.2563-2572, 2013, http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e96-b_10_2563.
3. T. Sakamoto, Y. Matsuki, and T. Sato, Method for the Three-Dimensional Imaging of a Moving Target Using an Ultra-Wideband Radar with a Small Number of Antennas, IEICE Trans. Commun., 査読有, Vol.E95-B, No.3, pp.972-979, 2012, http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e95-b_3_972.
4. S. Kidera, T. Sakamoto and T. Sato, Extended Imaging Algorithm Based on Aperture Synthesis with Double Scattered Waves for UWB Radars, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 査読有, Vol.49, No.12, pp.5128-5139, 2011, DOI: 10.1109/TGRS.2011.2158108.
5. T. Sakamoto, and T. Sato, Two-Dimensional Ultra-Wide-Band Radar Imaging of a Target with Arbitrary Translation and Rotation, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 査読有, Vol.49, No.11, pp.4493-4502, 2011, DOI: 10.1109/TGRS.2011.2146261.

〔学会発表〕(計 44 件)

1. T. Sakamoto, T. Sato, P. Aubry, and A. Yarovoy, Texture-Based Algorithm to Separate UWB-Radar Echoes from People in Arbitrary Motion, Proc. 2013 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Montbeliard, France, 28-31 Oct. 2013.
2. T. Sakamoto, T. Sato, P. Aubry, and A. Yarovoy, Target Speed Estimation Using Revised Range Point Migration for Ultra Wideband Radar Imaging, Proc. European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2013, Gothenburg, Sweden, April 2013.
3. K. Saho, T. Sakamoto, T. Sato, K. Inoue, and T. Fukuda, Experimental Study of Real-Time Human Imaging Using UWB

- Doppler Radar Interferometry, Proc. The 6th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2012), Congress Centre, Prague, Czech Republic, 26-30 Mar. 2012.
4. T. Sakamoto, Y. Matsuki and T. Sato, Three-Dimensional Imaging of a Moving Target using an Ultra-Wideband Radar with Five Antennas, Proc. 2011 IEEE International Conference on Ultra-Wideband, Royal Hotel Carlton, Bologna, Italy, 14 September 2011.
5. T. Sakamoto and T. Sato, A target tracking method with a single antenna using time-reversal UWB radar imaging in a multi-path environment, Proceedings of the 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp.3319-3322, Hilton Hawaiian Village, Honolulu, Hawaii, USA, July 25-30 2010.

〔産業財産権〕

取得状況(計 1 件)

名称: レーダイメージング装置、イメージング方法及びそのプログラム

発明者: 福田健志、井上謙一、佐藤亨、阪本卓也、佐保賢志

権利者: パナソニック株式会社

種類: 特許

番号: 特許第 4977806 号

取得年月日: 平成 24 年 4 月 20 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.asp.cce.i.kyoto-u.ac.jp/~tsato/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 亨 (SATO, Toru)

京都大学・大学院情報学研究科・教授

研究者番号: 60162450

(3) 連携研究者

阪本 卓也 (SAKAMOTO, Takuya)

京都大学・大学院情報学研究科・助教

研究者番号: 30432412