

# 博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

SUWA Kei

|        |   |
|--------|---|
| 氏名     | 諏訪 啓  |
| 学位の種類  | 博士（経営情報科学）  |
| 学位記番号  | 博 乙 第 6 号   |
| 学位授与   | 令和 7 年 9 月 19 日   |
| 学位授与条件 | 学位規定第 3 条第 4 項該当  |
| 論文題目   | A Study on Signal Processing Algorithms for Multi-Channel Imaging Radar<br>(複数チャネル画像レーダの信号処理アルゴリズムに関する研究) |
| 論文審査委員 | (主査) 教授 内藤 彩乃 <sup>1</sup><br>(審査委員) 教授 梶 克彦 <sup>1</sup> 教授 伊藤 暁浩 <sup>1</sup> 客員研究員 水野 忠則 <sup>1</sup>  |

## 論文内容の要旨

### A Study on Signal Processing Algorithms for Multi-Channel Imaging Radar (複数チャネル画像レーダの信号処理アルゴリズムに関する研究)

国際情勢の緊迫化、自然災害の激甚化、パンデミックの流行などによる社会的な不安が増大している今日、安全・安心な社会の実現に向けて、地球環境や社会情勢を俯瞰的に見守るためのリモートセンシング技術の重要性が増している。中でも、画像レーダは昼夜、天候を問わず高精細な常時監視を可能にする技術として注目されている。本研究では、画像レーダ(合成開口レーダ (SAR; Synthetic Aperture Radar)、逆合成開口レーダ (ISAR; Inverse Synthetic Aperture Radar))のさらなる進化を目指し、複数チャネル化、分散化による新しいシステムコンセプトの創出を狙った信号処理アルゴリズムを提案する。特に、監視の対象として自動化が進む交通・物流システムに焦点を当て、人工衛星、航空機、船舶、車両などを検知し、形状、位置、動きを高精度に計測する技術の開発を目指す。本研究では、複数チャネル化によって増やすことのできる信号の 3 つの次元(偏波、時間、空間)に対応して、(1)

偏波の次元における複数チャネル化：ポラリメトリック SAR による目標形状、特性の詳細観測、(2)時間の次元における複数チャネル化：小型 SAR 衛星フォーメーションフライトを想定した SAR-GMTI(Ground Moving Target Indication)による移動目標検出・速度推定、(3)空間の次元における複数チャネル化：分散配置型の ISAR による目標の運動・3 次元形状同時推定、の 3 つのテーマに取り組んでいる。

ポラリメトリック SAR では、偏波情報を活用することで分解能向上を図る信号処理手法を開発し、データ量を削減しながら高精度な画像再構成を可能にした。特に、帯域幅を半減しても地上処理によりほぼ原画像と同等の品質を復元できることを確認した。これは、衛星搭載時のデータ量制約を克服する有用な技術となる。SAR-GMTI では、小型 SAR 衛星のフォーメーションフライトを前提に、低速移動目標の検出精度、速度推定精度を向上する決定論的なアルゴリズムを開発した。さらに、小型 SAR 衛星のフォーメーションフライトによる実用化に向け、衛星間の最適配置の設計法を含めた提案を行っている。分散配置型 ISAR では、ターゲットの三次元形状を推定するアルゴリズムを提案した。ISAR は通常、数秒間にわたって同一目標を継続的に観測し、得られる ISAR 動画は異なる投影面の画像の

集合体である。本研究では、この原理を利用し、ターゲットの運動を推定するアルゴリズムを開発した。

本論文は全6章で構成される。第1章で研究の背景と目的、第6章で結論をまとめる。また、第2章～第5章の概要は次のとおりである。

第2章では、本論文の技術的な基盤となる画像レーダ技術の概要についてまとめた。画像レーダは、合成開口レーダ(SAR)と逆合成開口レーダ(ISAR)の2種類に分類される。SARは衛星や航空機に搭載しレーダ装置によって地表面を観測するための技術であり、災害監視や環境監視に広く活用されている。一方、ISARは移動目標の識別・追跡に用いられ、特に航空機や人工衛星の監視技術として重要性が増している。近年、これらの技術は、衛星コンステレーションや機械学習を活用したデータ解析と融合し、より高度な監視システムへの発展が期待されている。本研究では、特に複数チャネル化・分散化による精度向上を目指し、新しい信号処理アルゴリズムを提案する。

第3章では、ポラリメトリック SAR の分解能向上アルゴリズムに関する研究の成果をまとめた。ポラリメトリは直交2偏波を送受信してターゲットの散乱の偏波特性を観測する。ターゲットの詳細な形状や反射特性の分析に役立つとともに、異なる偏波チャネルで計測した画像を重ね合わせて疑似カラー表示することで視認性を格段に改善することができる。しかし、送受偏波の組み合わせ4通りでターゲットの散乱特性を詳細に観測するため、データ量は従来の単偏波 SAR の4倍になる。衛星搭載の場合は特に、データ量の増加は運用制約に繋がるため回避したい問題である。そこで、観測時には分解能を下げてデータ量を低減し、地上システムの処理で分解能を向上するための信号処理アルゴリズムを開発した。ポラリメトリック SAR の実画像を用いた評価を行った。原画像の帯域幅を1/2に制限したものに提案アルゴリズムを適用して再び原画像の帯域に戻して得られる画像と、原画像とを比較したところ、相関係数は0.97であり、ほぼ原画像に迫る画像を再現できることを確認した。帯域幅を1/2に制限してデータ量を1/4に削減しつつ、提案アルゴリズムによって地上処理においてほぼ分解能を回復することが可能になる。

第4章では、SAR-GMTIによる移動目標の検出と速度推定アルゴリズムに関する研究の成果をまとめた。SAR-GMTIの基本原理は、わずかな時間差をもって同じ場所から撮像された複数枚のSAR画像の差分や位相差を求めて静止背景信号を抑圧し、移動目標の検出、速度推定を行うもので

ある。この時、SARに特有の現象である「アジマスアンビギュイティ」が消え残る問題が大きな課題である。本研究では、このアジマスアンビギュイティが消え残るメカニズムを明らかにして信号モデルを定式化した上で、静止背景信号とアジマスアンビギュイティを同時抑圧する決定論的なアルゴリズムを提案する。航空機 SARによる実験では、約5m/sで移動する目標の速度推定誤差が0.1m/sであり、高精度な移動体監視の実現性が確認された。また、3機の小型衛星フォーメーションフライトを想定した場合、最適なベースライン長を設定することで、±1m/sの低速移動目標を高精度に検出可能であることを確認した。

第5章では、分散配置型 ISARによる3次元形状推定アルゴリズムに関する研究の成果をまとめた。ISARの動画解析を活用し、移動目標の3次元形状と運動を同時に推定するアルゴリズムを提案する。点目標で構成されるターゲットに対する理論解析および数値シミュレーションによる評価を行った。その結果、例えば、中心周波数33GHz、レンジ分解能1.5m、ベースライン長2mのシステムを使用し、ターゲット距離5km、SNR 30dB以上の条件下で、1.28秒の観測時間を持つISAR動画の5フレーム(フレームレート0.64秒)を解析した場合、1m未満の位置推定誤差(レンジ分解能に匹敵)が達成できることが分かった。この評価条件は、ヘリコプタ搭載ISARで海面上の船舶を観測する場面を想定したものだが、推定誤差が1m程度であれば、船舶の形状推定としては十分に有用な精度と言える。

## 論文審査の結果の要旨

リモートセンシング技術は、遠隔地からの観測を通じて地球環境や社会状況を広域かつ継続的に把握する手段として、その重要性を増している。特に、昼夜や天候の制約を受けずに高精細な観測を行えるイメージングレーダ技術は、災害監視、安全保障、交通制御などの分野で不可欠な基盤技術とされている。近年は、定常的な地表観測にとどまらず、監視対象領域内で移動する物体の動態把握を含む、動的センシングへの応用が活発に進められている。

本論文では、合成開口レーダ(SAR: Synthetic Aperture Radar)および逆合成開口レーダ(ISAR: Inverse Synthetic Aperture Radar)を対象とし、それらの性能限界を打破するための信号処理アルゴリズムを開発している。具体的には、異なる偏波、時間、空間の次元に着目し、信号処理の

複数チャネル化と測定システムの分散化による新たなシステムアーキテクチャを提案した。特に、自動化が進展する交通・物流インフラに着目し、人工衛星、航空機、船舶、車両といった移動体を対象に、形状、位置、速度といった物理パラメータを高精度に推定する技術の確立を目的とする。本研究は、(1)偏波次元における多チャネル処理による形状識別精度の向上(ポラリメトリック SAR)、(2)時間次元における多チャネル SAR による移動体検出と速度推定(SAR-GMTI)、(3)空間次元における分散 ISAR による三次元形状および運動推定、という 3 つの要素技術を柱とする。

ポラリメトリック SAR に関しては、送受信偏波の組み合わせから得られる複数チャネルの信号情報を活用し、分解能の向上と視認性の強化を両立する信号処理アルゴリズムを開発した。本手法は、衛星搭載時に課題となる通信帯域や記録容量の制約を克服する手段であり、帯域幅を  $1/2$  に制限して得られた画像から、地上における後処理により原画像と相関係数 0.97 の高品質な画像を再構成可能であることを実証した。これにより、衛星観測の高分解能化とデータ量削減を両立させる新たな技術の方針が提示された。

SAR-GMTI については、将来的な小型 SAR 衛星のフォームーションフライト運用を想定し、静止背景に対する移動体の高精度検出および速度推定を実現するための決定論的アルゴリズムを開発した。アジマスアンビギュイティに起因する残留誤差のメカニズムを明確化し、それを除去可能な数理モデルを構築した。実機 SAR による評価では、約 5 m/s で移動する車両に対して 0.1 m/s の速度推定誤差を達成した。

また、3 機編成の衛星フォームーションにおいて最適な観測配置を導出し、 $\pm 1$  m/s の低速移動体の検出が実現可能であることを示した。

分散配置型 ISAR に関する研究では、ISAR 動画を活用し、目標物の三次元形状と運動の同時推定を実現する新たなアルゴリズムを提案した。複数観測点によるデータ統合を通じ、点群モデルによるターゲット形状の復元を理論解析および数値シミュレーションにより検証した。例えば、中心周波数 33 GHz、距離分解能 1.5 m、ベースライン 2 m のシステムを用い、距離 5 km、SNR 30 dB 以上の条件下で得られた 5 フレームの ISAR 動画から、レンジ分解能に相当する 1 m 未満の三次元位置推定誤差を実現した。この結果は、海上移動体に対する航空機搭載 ISAR の実装を視野

に入れたものであり、実用に足る精度であると評価される。

本論文は全 6 章で構成される。第 1 章で研究の背景と目的、第 6 章で結論をまとめた。また、第 2 章～第 5 章の概要は次のとおりである。

第 2 章では、SAR および ISAR に代表される画像レーダ技術の基礎理論および応用動向を整理し、本研究が対象とする技術的領域の全体像を示す。まず、合成開口技術の原理と、距離・アジマス方向の分解能に関する基本的な設計論を紹介し、SAR における信号処理基盤を明確化する。続いて、ISAR における合成開口の原理と、観測角度変化を活用した三次元構造推定の技術的可能性を論じる。

第 3 章では、ポラリメトリック SAR (PolSAR) における観測データ量の削減と分解能の維持を両立する信号処理手法を提案する。ポラリメトリック SAR では、直交 2 偏波の送受信組み合わせにより、物体の電磁散乱特性を高次元で取得可能となるが、同時にデータ量の増大という実運用上の課題を抱える。本章では、帯域制限を施した観測データに対して、地上における信号復元処理を適用することで、元の空間分解能を高精度に回復するアルゴリズムを開発した。この手法により、衛星搭載における通信・記録の制約を考慮しつつ、観測性能を維持する運用が可能になる。実際の PolSAR 画像を用いた検証により、帯域半減時にも原画像との相関係数 0.97 を達成できることを確認し、アルゴリズムの有効性と実用性を示している。

第 4 章では、SAR-GMTI(Ground Moving Target Indication) 技術を用いた移動目標の高精度検出および速度推定アルゴリズムの開発について述べる。本章の目的は、複数の SAR 画像間で生じる微小な差分情報(位相差や振幅変化)を活用し、静止背景と移動物体とを高い精度で識別する処理手法の構築である。特に、SAR 特有の現象であるアジマスアンビギュイティに注目し、残留成分の抑圧を含む新たな決定論的信号モデルを導出した。さらに、小型 SAR 衛星の編隊飛行による多視点観測を前提とし、低速移動体に対する最適な配置戦略と、運用可能な速度検出範囲を設計的に導出した。航空機搭載 SAR による実データ評価を通じて、理論的な有効性に加え、運用環境下での実用性をも確認している。

第 5 章では、複数地点に配置した ISAR センサによる分散観測に基づき、移動体の三次元形状と運動パラメータを同時推定するためのアルゴリズムを提案する。ISAR では、自己運動または目標運動を利用して、時間方向に異なる観測角度を得ることができるために、本章では、この特性を空

間的に拡張することで三次元情報の復元精度を向上させている。具体的には、観測された ISAR 動画を点群ベースで解析し、各フレームにおける散乱点の 3 次元座標の推定アルゴリズムを開発した。シミュレーションにより、現実的な観測条件 (SNR 30 dB、観測距離 5 km、ベースライン 2 m) 下において、1 m 未満の三次元位置推定誤差を達成できることを確認し、ISAR の三次元センシングへの展開可能性を実証した。

本論文は、複数チャネル化と分散化に基づくイメージングレーダの性能向上に関する基盤技術を体系的に確立し、リモートセンシング技術の新たな応用可能性を提示したものである。その成果は社会的意義が大きく、今後の社会貢献にも資するものと評価できる。また、筆頭著者としての査読付き研究論文が 5 件、さらに査読付きの国際会議プロシードィングが 7 件発表されており、これらの実績は本研究の学術的価値の高さを示している。これらの研究成果はいずれも、イメージングレーダ技術に関する幅広い専門的知識を基盤とし、筆頭著者として継続的に研究成果を発表してきたことは、独立した研究能力の確かさを裏付けるものである。以上の内容は、本学の論文審査項目である「新規性」「進歩性」「有用性」「論理性」「明確性」「信頼性」の各観点において高く評価でき、本論文はこれまでの研究成果の集大成として、博士の称号を授与するのにふさわしい水準に達していると判断する。

これにより学位審査委員会として、本論文は博士（経営情報科学）学位論文に値するものであるとの結論に達した。