

博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

氏名	酒巻 洋
学位の種類	博士 (経営情報科学)
学位記番号	博 乙 第 7 号
学位授与	令和 8 年 3 月 23 日
学位授与条件	学位規定第 3 条第 4 項該当
論文題目	リモートセンシングシステムにおけるデータ処理の高効率化及び高精度化に関する研究 A Study on Improving Efficiency and Accuracy of Data Processing in Remote Sensing Systems
論文審査委員	(主査) 教授 梶 克彦 ¹ (審査委員) 名誉教授 水野 忠則 ¹ 教授 内藤 彩乃 ¹ 教授 菱田 隆彰 ¹

論文内容の要旨

リモートセンシングシステムにおけるデータ処理の高効率化及び高精度化に関する研究 (A Study on Improving Efficiency and Accuracy of Data Processing in Remote Sensing Systems)

近年、暴風、豪雨、地震、津波、噴火などの自然災害、悪天候・異常気象に起因する事故、並びに地学的リスクが増加している。安全・安心な社会を維持するためには、災害の予測・防止といった事前対策と、被害軽減や復旧といった事後対策が必要である。そのための有力な手段の一つが、遠隔から対象を観測・分析するリモートセンシング技術である。地球観測衛星の打上げ以降急速に普及し、現在では気象、漁業、資源探査、防災などで広く利用されている。本研究の目的は、リモートセンシング技術により安全・安心な社会生活を支えるための高効率かつ高精度なデータを得るためのアルゴリズムを構築することである。先行研究や政策報告を踏まえ、リモートセンシングデータに求められる条件を次の3点に集約した：(1) 現象を捉えていること (説明可能性)、(2) 時宜にかなった情報提供 (高速処理)、(3) 十分な精度 (不要情報の除去)。本研究では、

これらを「データ条件」と称し、各条件を満たすデータ処理手法を開発・検証した。本論文は全6章で構成されている。第1章では研究の背景及び目的を述べた。第2章から第6章は次のとおりである。

第2章では、リモートセンシングに関する基礎技術を説明した。リモートセンサとしてレーダやライダーを取り上げ、周波数や振幅などの電磁波特性や散乱特性を利用して観測対象の特徴を抽出する。代表例としては、パルスドップラー気象レーダによる降水・風計測、SAR (Synthetic Aperture Radar: 合成開口レーダ) による海面・地表観測、ドップラーライダーによる風観測などがある。受信波から受信強度やドップラー速度を算出するにはレーダ方程式や周波数解析が用いられ、風向・風速推定にはVAD (Velocity Azimuth Display) 法やDBS (Doppler Beam Swinging) 法などが適用される。

第3章では、データ条件(1)「現象を捉えていること (説明可能性)」を検討した。具体例として、交通障害などの原因となる霧による視程低下を検知するKaバンド気象ドップラーレーダを用いた悪視程自動検出アルゴリズムを構築した。レーダで得られる電磁波特性に基づく基本パラメータのみでは悪視程を直接把握しにくいいため、気象学的知見と先行研究を基に、エコー強度、エコー頂高度、エコ

一面積からなる新たな特徴量を導入し、3要素の論理積を満たす場合を霧による視程悪化と判定する仮説を立てた。各指標はそれぞれ、エコー強度が空中の水粒子の存在と粒径を、エコー頂高度が鉛直分布を、エコー面積が水平分布を示す。実観測データによる検証の結果、種別の異なる霧を良好に判定でき、提案アルゴリズムはデータ条件(1)を満たすことを確認した。

第4章では、データ条件(2)「時宜にかなった情報提供(高速処理)」を検討した。具体例として、不審船監視や海上交通安全に資する、電波画像からの船舶航跡自動検出を取り上げた。従来は、広域の海面を観測した電波画像に対し、船舶の進行に伴って現れる航跡を線分とみなし、Radon変換やHough変換などの直線検出手法を用いて検出していたが、これらは直線を構成する傾き・切片・端点からなる3次元探索空間を全探索することになるため、膨大な演算量(時間)を要する課題があった。本研究では、2次元FFT(Fast Fourier Transform)と1次元逆FFTを組み合わせ、直線のパラメータを逐次探索する手法を提案した。検証の結果、提案法は従来法に比べて10倍以上の高速化を達成し、データ条件(2)を満たすことを確認した。

第5章では、データ条件(3)「十分な精度(不要情報の除去)」を検討した。具体例として、気象予測、風力発電、突風監視などに資する、ドップラーライダーを用いた風計測時の不要応答除去アルゴリズムを構築した。ドップラーライダーは空気中のエアロゾル(塵や埃など)からの反射光を受信・解析することで大気中の風情報を得るが、信号が微弱であるためエアロゾル以外の不要応答の影響を受けやすい。不要応答としては、ライダー搭載プラットフォームの動揺に起因する系統誤差や、信号対雑音比の低下に伴うランダム誤差が考えられる。前者に対しては、姿勢角などを計測する動揺センサを併用して補正する風向・風速推定法を定式化し、後者に対しては、気象学的知見とライダーの高分解能性を活かし、隣接レンジのデータから有効性を判定する不要応答除去アルゴリズムを提案した。検証の結果、不要応答の低減により風向・風速推定の精度が向上し、提案アルゴリズムがデータ条件(3)を満たすことを確認した。

第6章では、本研究の結論を述べた。本研究では、リモートセンシング技術が安全・安心な社会を支える上で果たす役割を、(1)現象の把握(説明可能性)、(2)時宜にかなった情報提供(高速処理)、(3)十分な精度(不要情報の除去)という3つのデータ条件に帰着させた。更に、視程状況判定、高速船舶(航跡)検出、風推定精度改善とい

った先行事例の少ない課題に対して、専門的・経験的知見とセンサ特性に基づく仮説設定と実測検証により有効な解決策を構築し得ることを明らかにした。今後、適用分野、取得データ量・種類の拡大、データ利活用技術の進展、環境変化などにより、リモートセンシング技術の重要性はより高まることが予想されるが、本研究で得られた知見や方法論は有効であり課題解決に貢献すると考えられる。

論文審査の結果の要旨

本研究の目的は、リモートセンシング技術によって安心・安全な社会生活を支える、高効率、高精度なデータを得るための実用的なアルゴリズムの構築である。

近年、暴風・豪雨・豪雪・洪水・高潮・地震・津波・噴火など自然災害、悪天候・異常気象による事故、地政学リスクが増加している。安全・安心な社会を営むためには災害の事前対策(予測、防止)と事後対策(被害軽減、復旧)が必要である。その有力な手段の一つがリモートセンシング技術(遠隔から対象を観測・分析する技術)である。1970年代の地球観測衛星打ち上げ後急速に普及し、現在では気象、漁業、資源探査、防災など広く活用されている。過去の研究成果や政策報告から、リモートセンシングデータに求められる条件は次の3つに集約される。すなわち、(1)現象を捉えていること(説明可能性)、(2)時宜にかなった情報提供(高速処理)、(3)十分な精度(不要情報の除去)である。本研究では、この3条件(以降、データ条件と称す)を満たすためのデータ処理手法を開発・検証した。

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を述べ、2章で研究の前提となる技術の整理を行い、第6章で結論をまとめる。また、第3章～第5章の概要は次のとおりである。

第3章では、データ条件(1)「現象を捉えていること(説明可能性)」について検討した。具体例として、霧による交通障害防止等に資する、Kaバンド気象ドップラーレーダを用いた悪視程状況自動検出アルゴリズムの構築をテーマとした。レーダで取得する電磁波特性から直接悪視程状況を把握することはできない。そこで、気象学的知見、先行研究成果等から、霧による視程悪化時の特徴を表す特徴量として、エコー強度、エコー頂高度、エコー面積といった新たなパラメータを導出し、すべてを満足する条件(論理積)を霧による視程悪化ありと判定する仮説を立てた。エコー強度は空気中の水粒子の有無及び大きさを、エ

コー頂高度は霧エコーの鉛直方向の分布状況を、エコー面積は霧エコーの水平方向の分布状況をそれぞれ表す。実観測データを用いて検証を行った結果、種類の異なる霧をそれぞれ良好に判定でき、提案アルゴリズムはデータ条件(1)を満たすものであることを確認した。

第4章では、データ条件(2)「時宜にかなった情報提供(高速処理)」について検討した。具体例として、不審船監視や海上交通の安全対策に資する、電波画像からの船舶航跡自動検出アルゴリズムの構築をテーマとした。広大な電波画像の中から船舶を検知する方法としては、船体の進行によって生成される航跡を検知するものが知られている。従来は、航跡を直線(線分)とみなし、2次元画像中の直線(線分)検出手法である Radon 変換や Hough 変換を用いて航跡を検出していた。しかしながらこの方法では直線を構成する傾き、y 切片、端点からなる探索空間を探索することになるため、演算量(時間)が膨大になるデメリットがあった。そこで、本研究では2次元FFT(Fast Fourier Transform)と1次元逆FFTを用いることで、直線のパラメータを逐次的に探索する方法を提案した。検証の結果、提案法では10倍速以上の高速化効果が得られることを確認した。検出性能は若干低下するものの、実用範囲内である。以上により、提案アルゴリズムはデータ条件(2)を満たすものであることを確認した。

第5章では、データ条件(3)「十分な精度(不要情報の除去)」について検討した。具体例として、気象予測、風力発電、突風監視に資する、ドップラーライダーを用いた風計測時の不要応答除去アルゴリズムの構築をテーマとした。ドップラーライダーは空気中の塵や埃からなるエアロゾルからの微弱な反射光を受信・解析することで大気中の風情報を得る。不要応答としては、ライダーを搭載したプラットフォームの動揺による系統誤差と、低S/N(Signal-to-Noise Ratio)を原因とする誤差の混入が考えられる。前者については、プラットフォームの姿勢角、姿勢角速度、並進速度を計測する動揺センサを併用することで、風向・風速推定は最終的に通常のVAD演算の形態に帰着することを示した。後者については、気象学的知見とライダーの高分解能特性により、隣接レンジのデータを用いた不要応答除去アルゴリズムを提案した。隣接レンジのデータを用いることでデータの有効・無効を判定する閾値を設けることができる。計算機シミュレーションにより、不要応答を除去し、風向・風速推定結果の精度が向上することが確認できた。更に総視線数の25%の劣化ではほぼ完全

に精度劣化前の風向・風速を再現できること、75%の劣化では通常風向・風速推定は困難であるが、若干過小評価する程度に改善できることを確認できた。以上により、提案アルゴリズムはデータ条件(3)を満たすものであることを確認した。

本研究では、安全安心な社会を実現するためにリモートセンシング技術が果たす役割が、実用的な3つのデータ条件、すなわち、(1)現象を捉えていること(説明可能性)、(2)時宜にかなった情報提供(高速処理)、(3)十分な精度(不要情報の除去)に帰着されることを明らかにした。また、視程状況把握、高速船舶検出、風推定精度改善といった先行事例のない異なる課題に対して、専門的・経験的知見、センサの特性等に基づき仮説を立て、実測データを用いて検証する形でアルゴリズムを構築するアプローチにより有効な解決策を構築可能であることを明らかにした。今後、適用分野の拡大、取得データ量・種類の増大、データ同化等データ利活用技術の進展、環境の変化等により、リモートセンシング技術が担う役割は更に大きくなると考えられるが、本研究で得られた知見はこれからも有効と考えられる。

本論文は、リモートセンシング技術によって安心・安全な社会生活を支える、高効率、高精度なデータを得るための実用的なアルゴリズムの構築方法を示すものである。その成果は学術的価値・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。本研究の推進と博士論文の執筆を通して、申請者の独立した研究能力の確かさが確認された。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。