

## 論文の内容の要旨

### 論文題目：位相情報を積極的に利用した超音波イメージング

西野 智弘

超音波イメージングは医療分野をはじめ、水中における魚群探知や海底探査、ロボット工学、物理探査、そして建造物の非破壊検査など、さまざまな分野で利用されている。これほど広く利用されるのは、超音波が人体に対し安全であることや、超音波が持つ高い指向性が計測に好都合であること、さらに、装置が比較的安価であることなどが理由である。

上述した分野では一般的にパルスエコー法が用いられる。これは、超音波パルスを放射し、後方散乱波の強度および到達時間を計測する手法である。強度によってエコー源の材質を推定できる。一方、到達時間によってエコー源までの距離を計測できる。しかし、後方散乱波の自己干渉により、後方散乱波の振幅がしばしば計測できないほど小さくなる。送信波を走査し物体の3次元形状計測が行われるが、この現象のために再現される形状が実物と大きく異なる問題が起こる。

一般的にパルス波が計測に用いられる理由は、絶対的な距離が計測可能であること、および信号処理が容易であることが理由である。現在のところ、位相情報を利用する超音波イメージング手法はほとんど報告されていないが、物体の表面形状計測のように絶対的な距離を計測しない場合には、位相情報を利用した方がデジタルエレベーションマップ (Digital elevation map: DEM) の精度が高くなる。

本論文では、パルス波ではなく連続波を用いて位相情報を積極的に利用する超音波イメージングについて述べる。特に、海底面や湖底面の形状調査への応用を目指し、物体の表面形状を計測対象とする。論文は以下の章立てにより構成されている。

第1章では、序論と題し、超音波イメージングにおける最近のトピックと、本論文の位置付けについて述べる。

第2章では、超音波イメージングの原理と課題と題し、現在広く利用されている超音波パルスを用いたイメージングの原理について述べる。さらに、問題点として、後方散乱波の自己干渉により、後方散乱波の振幅が計測できないほど小さくなってしまう現象について述べる。これは原理的に避けられないものであり、計測中にしばしば起こる。その結果、パルス到達時間が無限大と計測され、作成される DEM は実物と大きく異なった形状になってしまう。さらに、この現象はパルス到達時間が無限大と計測される周辺の計測値も歪ませている。そのため、無限大と計測された数値をその周囲4点の平均値により補間しても、十分な補正ができない。

第3章では、複素振幅法による超音波イメージングと題し、従来のパルス波利用の超

音波イメージングではなく、連続波を用いた超音波イメージングについて述べる。この手法を複素振幅 (Complex-amplitude: CA) 法と呼ぶ。CA 法では、i) 後方散乱波の複素振幅を計測すること、ii) DEM を作成するには位相アンラッピング (Phase Unwrapping: PU) 処理が必要となること、および、iii) 干渉の影響が位相の回転成分、すなわち位相特異点 (Singular point: SP) として現れることを述べる。

SP が含まれる位相値マップは保存場となっていないが、衛星や航空機搭載レーダを用いた地表面計測の分野で広く用いられている PU 法 (M. Costantini, 1998.) を用いると、保存場でない位相値マップから DEM を作成できる。この DEM が、パルスエコー法で得られる DEM に比べて実物に近い形状であることを示す。針を接触させて物体形状をスキャンしたデータを参照データとし、パルスエコー法と CA 法で得られた DEM の最大誤差 SN 比と平均 SN 比を評価した。最大誤差 SN 比で 15.7dB、平均 SN 比で 13.6dB の改善があった。しかし、従来の PU 法で作成した DEM では、孤立した SP が存在する箇所では実在しない崖が生じてしまう。この崖が実形状との違いを際立たせている。さらに従来の PU 法では、SP の数が増えると計算コストが爆発的に増大してしまう問題もある。これらの問題を解決するべく、次章で新たな PU 法を提案する。

第 4 章では、位相特異性拡散法による位相アンラッピングと題し、位相値マップに含まれる SP を拡散させる PU 法を述べる。これを位相特異性拡散 (Singularity-spreading phase unwrapping: SSPU) 法と呼ぶ。SSPU 法では、保存場となっていない計測データから DEM を作成できるだけでなく、従来の PU 法で問題となっていた DEM 中の崖を生成しない。さらに、SP の数が増えた場合にも、計算コストが線形的にしか増加しない利点がある。

SSPU 法での処理は、逆符号の回転成分の値を SP の周囲 4 辺に分散して埋め込み、回転成分を周囲に拡散させることである。画像全体で回転成分が無視できるようになるまで、この処理を繰り返す。この操作により、回転成分は近傍の逆符号の回転成分とゆるやかに結合し打ち消しあう。同時に、孤立して存在する回転成分は周囲に拡散され消失していく。1 回ずつの補正は等方的であるが、補正量は SP の分布状況を反映するため、最終的には SP の分布に対応した補正を実現している。

CA 法で計測したデータを SSPU 法でアンラップして得た DEM は、従来の PU 法を用いて得た DEM よりも実物に近い形状を再現できていることを示す。起伏が少ない単純な形状物体と複雑な形状物体の 2 種類の計測結果を示す。この結果を最大誤差 SN 比と平均 SN 比で評価した。単純な形状物体の場合、最大誤差 SN 比で 1.8dB、平均 SN 比で 1.7dB の改善があった。これは、従来の PU 法で生成されてしまう崖が解消されたためである。また、複雑な形状物体の場合、最大誤差 SN 比で 4.1dB、平均 SN 比で 7.4dB の改善があった。干渉が多く起こる形状ほど、SSPU 法の有用性が示された。

第 5 章では、複素マルコフランダムフィールドモデルに基づく位相特異点の除去と題し、位相値マップで SP を構成している 4 つの計測値の真値を、マルコフ性に基つき近

傍の計測値から統計的に推定し、計測値を補正することで SP を除去する手法を述べる。これを複素マルコフランダムフィールドモデルに基づく位相特異点除去 (Complex-valued Markov-random-field-model-based singular-point elimination: CMSE) 法と呼ぶ。CMSE 法は以下の操作を行う。1) SP を構成する 4 つの計測値とその近傍の計測値との相関ベクトルを定義する。2) 周囲データの相関より相関ベクトルを学習する。その際、SP を含む周囲データからの影響を少なくする。3) 学習した相関ベクトルを用いて、近傍データから SP を構成する計測値の真値を推定し、値の更新を行う。4) 1) から 3) の処理を画像全体の SP について行う。これにより、正と負の SP が結びつくように移動し、互いに打ち消しあう。この処理を繰り返し、SP の数を減らす。

CMSE 法は DEM 作成時に PU の前段階で施される。CMSE 法により、SP の数が 285 個から 5 個に減った例を示す。その結果作成される DEM は、CMSE 法を用いずに PU した DEM に比べて実物に近い形状となった。最大誤差 SN 比で 6.3dB、平均 SN 比で 6.0dB の改善があった。さらに、第 4 章で述べた SSPU 法と併用することで、僅かに残った SP が生む崖を解消し、より SN 比の高い DEM を作成することができる。

第 6 章では、超音波フェーズドアレイの移相値制御による適応的ビームフォーミングと題し、山登り法を用いて超音波フェーズドアレイのビームパターンを最適化する手法を述べる。一般的に、超音波アレイの放射はフェーズドアレイ原理に基づく移相制御を行っても、ビーム放射が所望角度からずれてしまう。この理由は、実際の超音波アレイでは、グレーティングローブやアレイシェーディング、クロスカップリングなどの現象があるためである。この問題を改善することで、超音波アレイの性能が向上し、画像に含まれるアーチファクトを低減できる。本研究では、超指向性音響システムにおける超音波フェーズドアレイを用いた。実験用に作成した  $5 \times 5$  の超音波フェーズドアレイを用い、水平方向のビーム放射制御を行った。そのため、縦方向に配置された素子には同一移相の搬送波を与えている。送信信号にはキャリア周波数 200kHz に 4kHz の可聴音を振幅変調したものを用いた。目標とする位置にマイクを設置し、マイクが受信する音声信号の音圧が最大となるように、山登り法を用いてアレイの各エミッタに与える搬送波の移相値を最適化する。提案手法による制御を用いて、目標角度  $2.5^\circ$  と  $5^\circ$  方向にビームを向けることに成功した。

第 7 章では結言として、本論文のまとめを述べる。本論文により、位相情報を利用した超音波イメージングが、DEM 作成に有用であることを示した。