

論文の内容の要旨

論文題目 自律型海中ロボットr2D4搭載LA-IFS及びSSSによる海底地形計測手法の開発

氏 名 小山 寿史

(本文) 海洋基本法の成立(2007.4)とそれに伴う海洋基本計画の策定(2008.3閣議決定)により、我が国における海洋資源の開発・利用への関心が一気に高まりつつある。東京大学生産技術研究所では1990年に開始された海嶺探査用自律型海中ロボット(AUV: Autnomus Underwater Vehicle)“R-Oneロボット”の開発に引き続き、2001年度からAUV“r2D4”による熱水鉱床探査計画(r2プロジェクト)を開始し、50回を超える潜航・調査を経て科学的、技術的側面から多くの成果を挙げてきている。r2D4はその前身であるR-Oneロボットと比較してかなりの小型軽量化と高性能化が図られている。例えばR-Oneロボットが全長8.1m、空中重量4tonであったのに対して、r2D4は全長4.4m、空中重量1.6tonとそれぞれ約2分の1の大きさ及び重量となっており、航続距離こそR-Oneの100km(クローズドディーゼルエンジン)に対し、60km(3ノットで約12時間:リチウムイオン2次電池)と短くなったが、最大潜航深度4,000m(R-Oneロボット:400m)と熱水鉱床や中央海嶺の観測調査には十分な性能を手に入れた。同時に小型化によって機動性、運用のし易さも大幅に改善された。さらに艇体前部にペイロード格納部を配し、常用センサの他にも適宜観測機器を装備できるようにするなど拡張性も考慮し設計されている。

AUVはROVや有人潜水艇に比べケーブルの制限を受けず広範囲の調査が行える事がひとつの利点であるが、逆にその活動時間が内蔵される電源容量に大きく制限される事から、搭載される観測センサは小型で省電力なものが望ましい。もちろん観測機器としての性能は高いほど良い。筆者らはr2プロジェクトの初期段階からこれらの要求に応えるべく、r2D4搭載型海底観測用音響ソナーの開発に取り掛かり、既存のサイドスキャンソナー(SSS)とそれとは別に配置した片舷3つのハイドロホンとの組み合わせによりスワス測深が可能なLアレイ・インターフェロメトリソナー(LA-IFS)システムの開発を行ってきた。

現在、最も一般的に用いられている測深器としてマルチビーム音響測深機(MBES: Multibeam Echo Sounder)がある。MBESはミルズクロス法により数10本~数100本の指向性のある鋭いビームを形成し、各方向からの受信信号を計測し、その到来時間を計測する事で方位角ごとの海底までの距離を計測する。一方IFSは送信機から照射されたファンビームの海底からのエコーを複数の無指向性ハイドロホンで受信し、受信時間ごとに計算した位相差から、その計測時間におけるエコーの到来角を求めて測深を行う。IFS測深の原理については古くから知られていたが、角度分解能と相反する位相差のアンビギュエティの問題や、ノイズの影響を受けやすい事などから、安定した測深が可能なMBESの方が一般的に広く用いられるようになった。しかし近年では浅海域におけるIFSの広い計測スワス幅や、MBESと比較して格段に高いデータ密度、SSSデータとの相性の良さやシステムの簡易さなどが再び注目され始め、いくつかの製品が提供されるようになってきている。これらIFSの特徴はAUV搭載用としてIFSが最適な選択肢となる事を示している。現在製品化されているIFSは例えばC3D (Teledyne Benthos社)、GeoSwath (Kongsberg-GeoAcoustics社)、System5000V2 (L3-Klein社)などが挙げられるが、各製品がそれぞれの開発コンセプトで高分解能化、高精度化を図っている。例えばC3Dは直線上に並べた6つのハイドロホンアレイを用いてエコーを受信し、CAATIと名付けられた独自の超高分解到来方向推定法を用いて5方向の同時到来エコーを分離し計測する事を可能にしている。またGeoSwathは半波長間隔で並べた5つのハイドロホンで位相差

を計測し、それらの平均値から高精度な受波到来角計測を行っている。一方System5000V2は送信波ファンビームを5本同時に照射するマルチビーム方式のサイドスキャンソナーをトランスデューサーとして用いる事で、従来よりも長距離レンジにおいて高いアジマス分解能を実現し、スワス領域全域で位相差計測の劣化が少ない測深機能を実現している。

これらに対し我々のLA-IFSはハイドロホンアレイ長を長くする事で計測分解能を上げ、それにより生じる位相差のアンビギュイティを3つ目のハイドロホンをL字型に配置する事により効率的に解く事を目指し開発を行ったシステムである。LA-IFSはこれまで半波長以下がほとんどであった既存IFSのアレイ長に対しハイドロホン間隔を最大で15.6 λ と約30倍にし、角度分解能を大幅に改善できた。初期の実験データを用いて解析を行い、ハイドロホンをL字型に配置する事で位相差のアンビギュイティを解くことが可能で、スワス幅の広い効率的な測深が行える事を示した。L字型のアレイ配置はAUVの側面及び底面に沿ってハイドロホンを設置する事が可能であるので広く適用可能であると言える。本論文では引き続きシステムの研究・開発を進め、r2D4搭載用測深器としてLA-IFSシステムとそのデータ解析手法を確立させる事を目的とする。またSSS観測画像との組み合わせにより熱水鉱床地帯の地形的、地質的な詳細を明らかにするデータを提供する事ができれば幸いである。

そこで本論文ではまずr2D4で計測された実海域データを用いてLA-IFSの解析を行い、詳細な海底地形図を作成する事により本測深器が十分にAUV搭載用測深器として有用である事を示した。さらには得られた測深データから精度評価を行い、熱水鉱床探査機器として十分な精度を持っていることを証明した。また位相差計測手法の改良としてトーンバースト波照射により生じる帯域幅データを利用し精度の向上を図り、加えて受信パワーによる重み付き平均処理と標準偏差を用いたノイズ除去を組み合わせる事により、これまでよりも位相差のアンビギュイティ処理に対する難しさを軽減する事ができた。さらにシャドゾーンや海底からの反射エコーが弱くなる事により生じる位相差の劣化領域について音圧と位相差の分散特性を用いて除去し、同時にIFSのフットプリントシフトの問題と送信波ファンビームのビームフォーミングによる位相差の反転が複合して生じる位相差飛びの問題についても対応する事でこれらにより生じるノイズ地形を除去する事ができた。また受波到来角計測を行うIFSでは大きな誤差の原因となる音速の補正についてスネルの法則を用いた後処理手法を適用し改善した。

次にプラットフォーム搭載用の補正処理としてAUVの航跡データを観測条件に合わせて補正できるように改良を加えた。例えば船上からのSSBLを用いたAUVのINSデータの絶対位置補正であり、r2D4のウェイポイント航法に着眼しほぼ自動で航跡補正を行えるようになった。SSBL計測が行えない場合は、AUVの高度値及び深度値を合わせた値と海底のベースマップ深度との差分からINS絶対位置のバイアスを求め、INS航跡の補正值として使用した。各手法ともINSの海底面付近での相対位置精度の高さを利用したものであるが、概ね良好な結果が得られた。

SSSについてはモザイク処理の際にピッチ補正を含む動揺補正を加え、定高度潜航下において起伏の激しい地形を観測中にプラットフォームが動揺しても安定したモザイク画像が得られるようになった。

これら2つの音響ソナー計測結果である測深データ及び反射エコー強度を合わせて3次元的に可視化できるソフトを作成し単独では分からなかった海底の情報についても得られるようになった。

以上のように実海域でのデータをもとに様々な問題に対応していく事により、本計測器の利便性は開発当時と比べて格段に進歩したと自負している。本システムを用いて得られた熱水鉱床地帯の詳細な海底地形データを含め、本研究で得られた知見が今後の新しい音響ソナーの研究開発へと活かされる事ができれば幸いである。