

自律水中ロボットと海底ケーブル

小島淳一

(株) KDD研究所

●なぜ水中ロボット●

国際通信の分野では、超大容量、高品質、ローコストの通信を実現する光海底ケーブル技術の発展がめざましく、現在は100 Gbpsを超える超高速の光海底ケーブルシステムの実用化が進められおり、世界的規模での光海底ケーブルネットワークの構築も進められている。海底ケーブルの信頼性を高めるためには、海底ケーブルシステム自身の信頼性を向上させるほか、安全な敷設ルートを選択したり、必要な場合には埋設などの保護工事を確実に行うことが重要である。そのためには、海底ケーブルの敷設ルートを選定するための海底状況調査や、建設後の敷設状況調査などを精密に行う必要がある。特に海底ケーブルが輻輳する海域では、障害の防止と障害発生後の修理工事のために、海底ケーブルの敷設状況を正確に把握しておくことも大切である。

このような海底ケーブルの敷設状況調査などには、操縦信号や電力伝送用のケーブルを介して船上から操縦する遠隔操縦型の有索式ロボット¹⁾ (ROV: Remotely Operated Vehicle) が活躍している。ROVは、母船とロボットの間をケーブルで接続し、母船から電力を供給するとともにテレビカメラや方位センサなどの信号をもとに遠隔操縦されるものである。このため、海底ケーブルの埋設や、海底ケーブルに絡んだ障害物の撤去など、大きなパワーを要する複雑な作業も可能である。しかし、ROVは、船上ケーブルハンドリングシステムやロボットの揚降装置など大型の船上設備が必要となる。そのため、陸上の運搬や母船への装備(艀装)も簡単ではなく、大型の作業船が必要である。したがって、調査費用も増大し、利用できる母船も限定されるなどの問題があった。

●AUV(自律水中ロボット)への大きな期待●

AUVは、Autonomous Underwater Vehicleの略語で、センサ、動力源、コンピュータを内蔵し、センサ情報に基づいて自分で判断しながら目的の作業を実施する自律制御方式の自立ロボットであると定義される。AUVは母船とロボットを繋ぐケーブルがないため、ロ

ボットの行動の自由度が格段に高い。たとえ深海用途でもロボットシステム自体の構成がシンプルで大型母船を必要としないため、運用コストが安価で経済性に優れており、オペレータの負担もはるかに少ないという大きな利点がある。このためAUVが実現すれば、従来コストの点から困難とされていたような各種の水中での調査が可能となる。

AUVは自律的な行動をする自立ロボットであるため、人間のオペレータが介在するのはロボットが潜航前にロボットに与える作業指示と、ロボットの揚降作業だけとなるはずだが、このような、完全なAUVの実現は、このために必要な要素技術(ハード、ソフト)の現状ならびにその将来動向から、かなり先のことと考えられる。

ただこのような完全なAUVのレベルに到達しなければ、AUVの必要性はないのかというと、そうではなく、実現が比較的容易である必要に応じて人間がロボットを助ける形で動作するAUVでも十分活躍できる用途も多い。このような人間が援助するレベルのAUVでは、ロボットとの交信は、超音波のデータ通信技術を用いることになる。しかし情報伝送容量が限られ、伝搬時間も遅い(1500m/s)超音波によるデータ通信では、原理的な限界として、リアルタイム監視や遠隔操縦はできないため、自身のセンサにより周囲環境を認識し、与えられた任務を遂行するための自律制御機能が必要であることには変わりがない。ただし、ロボットの手に負えないような高度な認識や判断については、運用者の判断を採用するような、人間の緩やかな援助を前提にしたシステム設計を行っている。

将来の理想的なAUVの実現のためには、実際の運用環境に関する知識や、センサの評価データが重要で、これらの蓄積が理想的AUVの頭脳となる高度な認識や判断が可能なコンピュータシステムとソフトウェアの開発に生かされることになる。

●海底ケーブル調査用AUVの目的●

AUVの研究開発は、国内外の研究機関で数多く行われているが、その多くが、機雷の掃討などを目的とした軍用、大学が中心となって行っている海洋の科学的

調査を目的としたものがほとんどで、海底ケーブルの調査等の商用を目的としたAUVの研究開発は行われていなかった。

そこでKDDでは、海底ケーブルの建設および保守に必要な作業の中で、(1) 海底ケーブルの敷設前の事前調査、(2) 敷設後の敷設状況の調査、(3) 障害位置の調査をローコストで行うことを目的とした自律水中ロボット“AQUA EXPLORER 1000”(AE-1000)の研究開発を開始した。このロボットを用いて、海底ケーブル調査用AUVの基礎技術である、超音波による通信の研究、海底ケーブルの探索と自動追跡する研究、水中でのロボットの運動制御の研究を行った。

AE-1000は、5回の海洋実験を行い、4年前に完成した。これらの海洋実験により当初目的としていた調査機能を実現することができた。しかし、AE-1000は、実験機としての位置づけとして開発したため、揚収方法や連続走行時間などに問題が残っていた。そこで、AE-1000の成果をベースによりこれらの問題点を解決する実用的なロボット“AQUA EXPLORER 2”(AE-2)の開発を進めている(図-1)。

●AUVによる海底ケーブル調査●

図-2は海底ケーブルの敷設状況調査をAE-2を用いて行う場合の運用形態の一例を示している。

調査地点が港から近い場合には、ロボットは港から母船により曳航され、調査地点で切り離される。この場合には、母船でのロボットの揚降の必要がないため、10トン程度の小型船を作業母船とすることができる。ロボットは曳航ロープから切り離されると、昇降舵と推進器により海底に向かって潜水を始める。このとき、調査地点から離れないために、旋回しつつ潜水する。指定された水深に達する、あるいは超音波高度計により海底への接近を検出すると、ロボットは自動的に深度保持あるいは高度保持動作に移行する。その後、ロボットは海底ケーブルに交差する方向に移動を開始する。移動方向や高度は、超音波を使って、船上から指示する。ロボットの測位は、ロボットに搭載されている超音波トランスポンダから発射される超音波信号を、船上の超音波測位装置で受信することにより行われる。

調査対象の海底ケーブルには、調査用の微弱な交流電流が流されている。ロボットは、交流磁気センサによりこの電流により発生する交流磁界を感知すると、自動的に針路を変え、海底ケーブルに沿って走行を開始する。海底ケーブルの埋設深度や水深などのデータは、超音波により船上に伝送すると共に、内蔵のハードディスクに記録する。海底面の映像は、内蔵のハードディスクにデジタル的に記録されるほか、高速超音波リンクにより船上に送られ、ロボットオペレータは、ほぼリアルタイムにその映像を見ることができる。

調査が終了したり、電池が消耗したら、ロボットはバラスト(おもり)を投下し、浮上を開始する。ロボッ

トが海面近くまで浮上すると、ロボットを母船で曳航して港に帰る。最後に、ロボットとパソコンをイーサネットに接続し、取得したデータを吸い上げて一連の作業が終了する。

●AQUA EXPLORER 2の概要●

このような作業を可能とするAE-2の構造を図-3に、性能を表-1に示す。

このロボットは内蔵の電池で動作するため、走行するに要するエネルギーを小さくするため、その外形は、流体抵抗を低減できる飛行機に似た形状としている。各種センサや電子回路収容耐圧容器、電池、浮力材等は、アルミ合金とポリエチレンの複合構造部材に固定し、全体をポリエチレン製のカバーで覆っている。構造部材にポリエチレンを採用したことにより、ロボットの軽量化に貢献している。各機器の配置は、水中でのバランス、浮力、運動性能を考慮し決定した。また昇降舵や垂直・水平尾翼の大きさ、形状も、模型試験と計算機シミュレーションによる安定性解析や運動性能解析等の結果から決定した。

AUVの最大の問題点は、動力源である電池にある。小型で高性能な2次電池は、現時点では入手が難しいため、AE-2では、リチウム1次電池を採用している。これによりロボットは1ノットの速度で24時間の調査を可能にしている。

航行用センサとしては、潜航深度を計測する水圧センサ、船首方角を計測する方位センサ、海底面や前方の障害物までの距離を測る高度・障害物ソナー、自身の運動を計測する姿勢センサ、対地速度を計測するドップラソナーを搭載している。さらに、ロボットと母船との相対位置を計測するための超音波トランスポンダを搭載している。

海底ケーブルの探索には、2台のフラックスゲート型3軸磁気センサを使用している。海底ケーブルから発生する微弱な交流磁界を、これらのセンサで検出し、内部のコンピュータにより信号処理し、ロボットに対するケーブルの位置(高さ、水平距離)と方向を算出している。ロボットはこのデータに基づいて、ケーブルを自動的に追跡している。

●ロボットの頭脳と運動制御●

ロボットの頭脳は、マイクロプロセッサMC68060を用いたコンピュータシステムから構成されている。さらに、超音波通信のためにデジタルシグナルプロセッサ(DSP)を用いて、変調・復調の信号処理を行っている。ロボット制御ソフトウェアは、汎用のリアルタイムOS(VxWorks™)を核にして開発している。ソフトウェアは、機能ごとにタスクに分割されている。主な機能として、船上装置との通信制御、受信したコマンドの解析、データの記録、自動操縦、障害物回避、各種センサからのデータ入力、TVカメラ、VTR、ライ

ト、バラストリリーサなどの機器の制御、画像記録、機器の故障監視、全体のプロセス制御などである。約60個のタスクが協調して動作して、これらの機能を実現している。

ロボットの運動制御（海底面からの高度を一定に走行する、海底ケーブルに沿って走行する）には、ファジイ制御を採用している。ファジイ制御では、メンバー関数の最適化が最大の問題である。ここでは、ロボットの運動モデルと制御系のモデルをコンピュータ上に構築し、非線形最適化手法を用いて最適解を求めている。さらに、海底面の凸凹が多い未知環境にも対応可能なように、ファジイコントローラにニューラルネットワークを用いたシステム同定を付加した適応型ファジイコントローラの検討も進めている。

海底面に沿って走行するAUVでは、障害物回避が必要不可欠である。障害物までの距離は、障害物探知ソナーを用いて測定している。検出した障害物に対しての回避行動は、障害物までの距離、海底傾斜、前進速

度を入力として、ファジイルールで行っている。また、回避不能と判断された場合は、前進を停止して、人間の判断を仰ぐことにしている。

●超音波通信は難しい●

海中における有効な情報伝達手段は、音波のみである。しかし、海水中では、音波の周波数に依存する減衰が大きいので、長距離（数百m以上）で高速な通信を行うことは、原理的に不可能である。さらに、音波の伝搬速度が遅いために、船の揺れやロボットの移動に伴うドップラシフトや多重反射の影響が大きく、船のスクリー音等の雑音源も多いので、信頼性の高い通信を困難にしている。そのため、AE-2の制御用通信では、伝送速度を125BPSに下げ、誤り訂正と再送により信頼性を上げている。それでも、状況によっては、数十秒間にわたる通信断が発生する。そのため、障害物を発見した場合の回避行動や、海底面の起伏に応じた高度制御はロボット自身の判断で行っている。

ロボットが母船の直下にいる場合など限定された条件では、指向性のある送受波器（音波の送受を行う素子）を用いることにより、比較的高速な通信が可能である。AE-2では、変調方式としてQPSK（4相位相変調）を用いて32KBPSの通信に成功している。この通信速度ならば、ロボットで撮影した海底の映像をほぼ連続的に船上で見ることができる。

●いざという時は人間が判断●

ロボットの運用を支援するために、母船には、超音波通信装置、操作表示装置、GPSを始めとする電波測

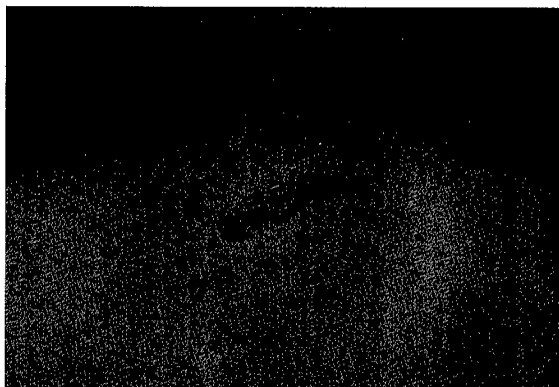


図-1 海底ケーブルを調査中の自律ロボット「AE-2」

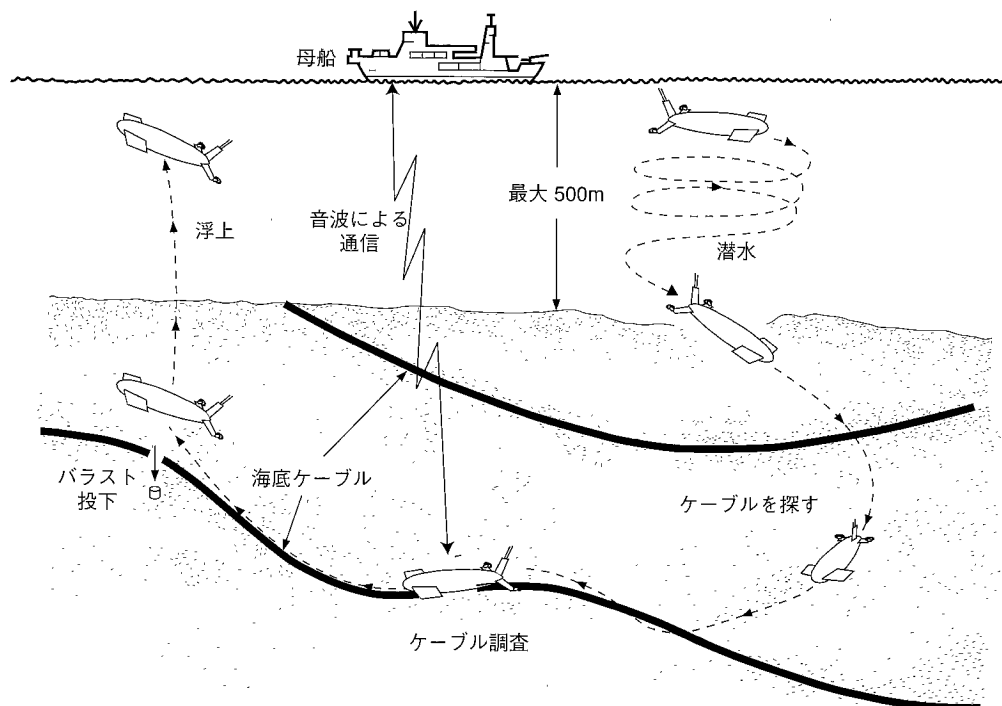


図-2 海底ケーブルの敷設状況調査

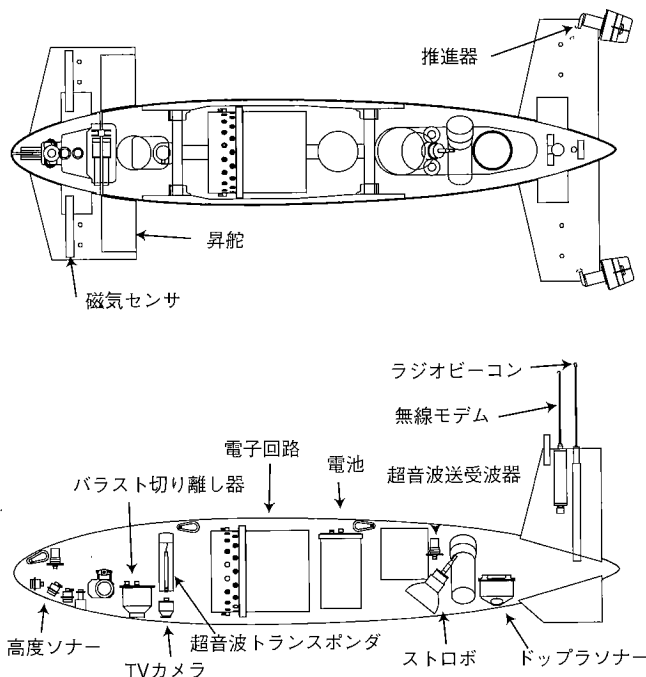


図-3 AQUA EXPLORER 2

表-1 AE-2の性能

最大潜水深度	500m
最大走行速度	2ノット (1m/s)
最大運用時間	1ノットの速度で24時間
重量	空中260kg, 水中0kg
外形寸法	3.0m (長さ) × 1.3m (幅) × 0.9m (高さ)
制御超音波	48kHz/40kHz, 125bits/s
画像用超音波	86~106kHz, 32kb/s
推進器	前進・後進用2基
主な搭載機器	ケーブルトラッキング用磁気センサ テレビカメラ, VTR, ストロボライト 水温センサ, ドップラソナー 超音波トランスポンダ, バラストリリーサ, 電池, ラジオビーコン, 無線モデム

位装置, ロボットの位置を計測する音響測位装置が設置される. いずれの装置もアタッチケース程度の大きさで, 可搬性に優れている. ロボットから超音波で送られてくるデータ, ロボット位置の緯度・経度や航跡は, 操作表示装置の画面上に表示される (図-4). この情報を元に, 人間の判断が必要な場面では, オペレータがこのGUI画面を用いて, 適切なコマンドをロボットに送る.

●より良い海底ケーブル保守用AUVを目指して●

海底ケーブル調査用のAUVの研究を始めて以来, 実験と改良を繰り返し, 実際に敷設されている海底ケーブルの調査も成功している (図-5).

AUVは無索であるため行動の自由度が格段に高く, 深海用でもシステム全体がコンパクトで大型母船を必要としないため, 運用コストが安価で経済性に優れて

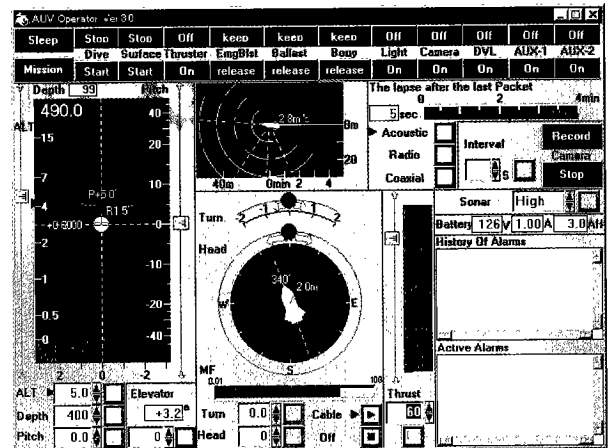


図-4 監視・操作用GUI

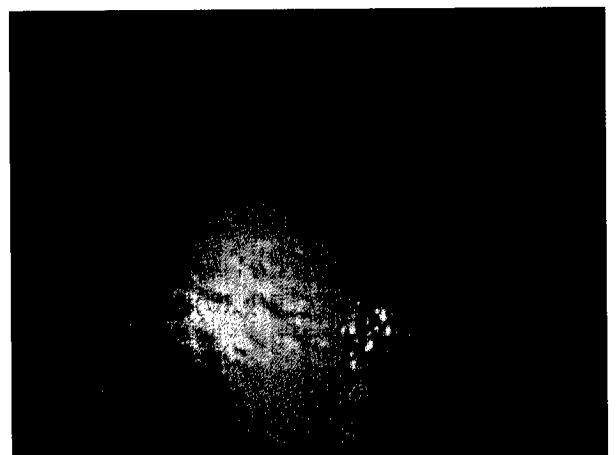


図-5 AUVで撮影した海底ケーブル

いる. しかし, 現時点では内蔵する動力源の容量の制約から連続作動時間が限られるほか, 母船からのリアルタイム監視や操縦はできないためロボットには, 複数のセンサにより周囲環境を認識し与えられた調査をこなすための高度な自律走行制御機能が必要となる.

このようなエネルギー源や一種の人工知能技術については, まだまだ今後多くの研究開発が必要である. また自律航行する場合に必要な水中での精確な測位技術も欠かせないが, これについても, 今後ハードウェア, ソフトウェアの両面にわたる研究開発が必要である. さらにマニピュレータ等による海中作業をも自律的に実施できるAUVとなると, その実現はさらに先の話となるが, 基礎研究として内部の研究機関で行われつつある³⁾.

このように, 実用的なAUVの実現のためには, まだ問題が山積しているが, 適用可能な分野から着実にAUVの実用化が試みられつつある. KDDの“AQUA EXPLORER”もこのような試みの1つである.

参考文献

- 1) 清 環, 高川真一: 海中ロボット, 成山堂書店.
- 2) 小島: 海底ケーブル調査用自律走行式水中ロボットとリアルタイム制御, 計測と制御, Vol.35, No.10, pp.783-787 (1996).
- 3) Yuh, J.: Underwater Robotic Vehicles: Design and Control, TSI Press.

(平成10年6月12日受付)