

研 究 解 説

海底ケーブル調査用自律型水中ロボット

AQUA EXPLORER 2

Autonomous Underwater Vehicle AQUA EXPLORER 2 for Inspection of Underwater Cables

浅 川 賢 一*

Kenichi ASAKAWA

1. は じ め に

海中や海底を調査する新しい技術の一つとして、自律型水中ロボットが注目されている。現在、少なくとも 12 の国で 70 台前後の自律型水中ロボットが開発されている¹⁾。

自律型水中ロボット調査対象としては、水温・塩分濃度・酸素濃度・クロロフィル濃度などの海洋環境調査、海底地形調査、海底ケーブルやパイプライン、海底油田などの海底構造物調査、水産資源調査、沈船などの海底落下物の調査、海底鉱物資源調査、氷海の下の海洋環境調査など、多くの対象が考えられる。それぞれの調査対象物にはそれぞれの特徴があり、調査方法も異なる。例えば、環境調査には広大な範囲を走行するロボットが必要であり、沈船調査には定点を色々な角度から調査できるロボットが必要である。このように、用途により、あるいは深度や対象範囲の大きさなどにより、それぞれに適した様々なタイプの自律型水中ロボットが提案されている。

ここでは、海底ケーブル調査用に開発された自律型水中ロボット AQUA EXPLORER 2 (AE 2)²⁾を紹介する。本ロボットは筆者が(株)KDD 研究所に在籍中に開発したものであり、海底ケーブル調査用としては世界で唯一実用化されたものである。

2. 開発の背景と目的

最近のインターネットの発展に伴い、海底ケーブルネットワークの建設が加速されている。この 5 年間の間だけでも日本周辺で 8 本の国際間の海底ケーブルが建設されている。同時にケーブル一本当たりの伝送容量もこの十年間に約 1000 倍にも増加している。

このような最新の海底ケーブルに、万一障害が発生すると、修理のために莫大な費用が必要となるほか、伝送容量が大きいと、国際間の通信にも重大な影響を与えることになる。そこで、海底ケーブルの信頼性を高めるため、建

設に先だって綿密な海洋調査を行い、その結果に基づき慎重にケーブル建設工事が行われている。さらに、水深数百メートルの浅海域では、魚網等から保護するために、ケーブルは海底面下に埋設されている。海底ケーブルに発生する障害の大部分は魚網やアンカーなどに引っ掛けられて生じるものであり、事前のルート調査や埋設工事を適切に行うことが海底ケーブルの信頼性を高めるために重要である。

このような海底状況調査や、ケーブル埋設深度調査の手段の一つとして、従来から有索式の水中ロボットが利用されてきた。しかし、これらのロボットはテザーケーブルで母船に結ばれているため、海底ケーブルに沿って連続的に移動するためには、操船性能の良い特殊な母船が必要であった。また、深海に対応するためにはパワーの大きな大型水中ロボットが必要であるが、ケーブルドラムなどの船上設備も大きくなるため、母船も大型になり、調査費用も大きなものになった。

一方、自律型水中ロボットの場合には、母船と水中ロボットの間を結ぶテザーケーブルがなく、水中を自由に泳ぐことができるため、操船性の良い母船は不要である。また、小型ロボットの場合には小型の母船で運用できる。さらに、調査海域が岸壁から近い場合には、水中ロボットを岸壁から曳航することもできるので、母船には揚降設備が必要とされない。この場合には、小型漁船のような母船でも運用が可能であり、調査コストがさらに低くなる。

AE 2 はこのように調査コストの低減を目標に開発された海底ケーブル調査専用の小型の自律型水中ロボットである。コストが下がることにより、従来では費用の点で困難であった調査も実施できるようになり、海底ケーブルの信頼性をさらに高めることが可能となる。

筆者らは、AE 2 の開発に先だって、研究用プロトタイプである AQUA EXPLORER 1000³⁾ (AE 1000) を開発した。AE 1000 は 1992 年に初めて潜水して以来、5 回の海洋実験を成功裏に行い、AUV の可能性を実証した。しかし、

*東京大学生産技術研究所 海中工学研究センター

連続潜水時間が4時間に限定されていたため、本格的な実用には至らなかった。

その後、AE 1000 の経験をもとに、その構造や性能を大幅に見直し、1995 年から AE 2 の開発に取り掛かった。

AE 2 は 1997 年 3 月に進水して以来、すでに 5 回の海洋実験と 5 回の実用目的の海底調査と海底ケーブル敷設状況調査を行っている。

3. AE2 の概要

AE 2 の写真および構造を図 1 と図 2 に、主な仕様を表 1 に示す。

流体抵抗を低減し、前進速度を高め、連続潜水時間を長くするため、形状は流線型とした。また、起伏に富む海底地形に沿って運動するために、昇降舵を前翼に配置した。これにより、優れた縦方向運動性能を実現している。スラスタは後部に 2 台配置され、そのバランスによって旋回を行う。長さは 3 m、空中重量は 260 kg、最大潜水深度は 500 m である。

重量を低減するため、主要構造材の一部とカバーにポリエチレンを使用している。ポリエチレンの比重は 1 より小さいため、アルミニウム合金等の金属材料のように余分な浮力材を追加する必要が無く、全体の重量を低減することができる。

海底ケーブルを追跡する場合には、海底ケーブル内の給電線に 16 ~ 25 Hz の交流電流を流し、この交流電流が作る交流磁界を左右の前翼内部にある 2 台の 3 軸直交型磁気センサで探知してケーブルの位置と方向を求める。位置の測定精度を高めるためには、2 台のセンサの間隔を広くする必要がある。また、ケーブルに接近する時にいち早くケーブルを探知するためには、センサをロボットの前の部分に配置する必要がある。AE 2 の形状は磁気センサを前翼

内部に配置することができるため、上記の基準を満たし、ケーブルを探知するためには最適な形状となっている。ケーブルトラッキングの詳細については、5. で説明する。

母船との間の通信には超音波を用い、ロボットの状態をリアルタイムで監視するとともに、船上からロボットを制御している。海中での超音波伝送は、海底や海面での多重反射の影響、母船のスラスタから出る気泡による反射の影響、母船から出る音響雑音の影響や母船の動揺によるドップラーシフトなどの影響があり、高速でかつ信頼性の高い超音波リンクを作ることがなかなか難しい。そこで、開発した制御用超音波リンクでは、信号伝送速度を 125 bits/s に落とすことにより、伝送の確実性を高めている。

このように、超音波伝送では伝送速度が遅いことのほか、水中音波の伝播速度も遅いため、伝送の遅延が大きい。そ

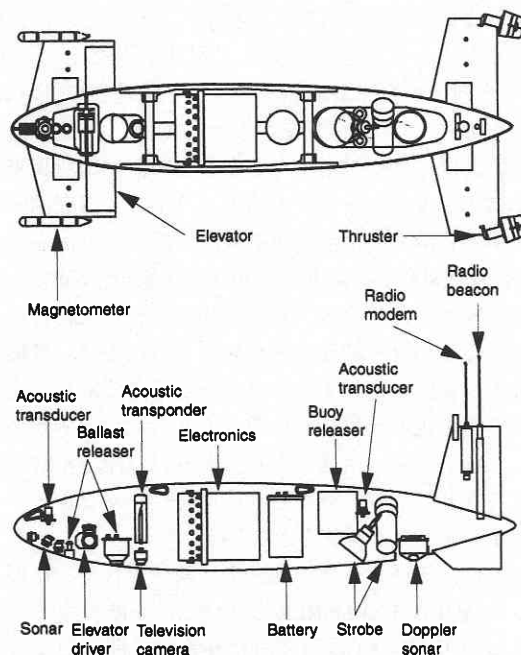


図2 AE2の構造

表1 AE2の主な仕様

| 項目 | 仕様 |
|-----------|---|
| 空中重量 | 260 kg |
| 寸法 | 3 m(L), 1.3 m(W), 0.9 m(H) |
| 最大潜水深度 | 500 m |
| 最大前進速度 | 1.6 m/s |
| 最大潜水浮上角度 | ± 30 度 |
| 電池 (一次電池) | 129 V × 30 AH (公称値) |
| 電池 (二次電池) | 133 V × 11 AH (公称値) |
| 連続潜水時間 | 24 時間 (一次電池, 0.5 m/s 走行時) |
| 最大潜水浮上角度 | ± 30 度 |
| 主な搭載機器 | 3 軸直交型磁気センサ 水中テレビカメラ, ストロボ 高度ソナー, 前方障害物探査ソナー ドップラーソナー バラストリリーサ, ブイリリーサ ラジオビーコン |

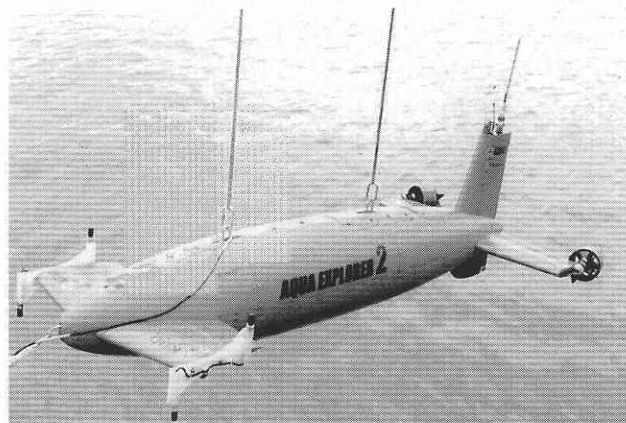


図1 AE2の外形 前翼の両端にはザトウ鯨調査用のハイドロフォンが固定されている

のため、制御用超音波リンクで送れる制御コマンドは、高度や方位などの自動制御モードの設定とその目標値など、ハイレベルのコマンドに限定される。搭載機器の直接的制御はすべてロボット内蔵のコンピュータで行われる。

制御用超音波リンクのほか、筆者らは海底の画像情報を伝送するために高速の画像伝送用超音波リンクを開発し、搭載している。この画像伝送用超音波リンクでは、送受波器の指向性を狭めることにより高速伝送を実現している。詳細は6.で述べる。

4. AE2の主要性能

開発に当たって、筆者らは次の運動性能に関する開発目標を定めた。

(最大潜水深度)

数千メートルの水深に対応することは、技術的には可能である。しかし、水深が深くなるに従って、耐圧容器の重量増、浮力材の比重の増大、超音波機器の送信電力の増大と超音波通信速度の低下、遅延時間の増加などのデメリットが生じる。一方、海底ケーブルの障害は主に水深数百メートルの海域で発生しており、この範囲の調査の必要性が高い。そこで、開発コストの低減とロボットの小型・軽量化を重視して最大潜水深度は500メートルとした。

(最大前進速度)

日本沿岸での潮流を調査したところ、ほとんどの海域で潮流は0.5 m/s以下であることが分かった。そこで、これらの海域での運用を想定して、最大速度は1 m/sとした。しかし、その後、北海や台湾海峡など海外での運用を考慮して、スラストのパワーアップを行い、現在は最大速度は1.6 m/sとなっている。

(連続潜水時間)

一般に海底ケーブルに関係する海洋調査は、24時間連続で行われる。また、調査の効率を高めるためには、着水揚収作業や電池の交換作業の頻度を少なくする必要がある。そこで、連続潜水時間として24時間を目標とした。

(電池)

電池は上述の最大速度や連続潜水時間とも密接に関連する重要な搭載部品である。エネルギー容量が大きいだけでなく、最大速度を上げるためには大電流放電が可能である必要がある。そこで筆者らはこれらの条件を満たし、かつ入手が容易なリチウム一次電池を採用した。電池ユニットは、36個のセル(EI社3B76)を直列に接続したものである。

利用したリチウム一次電池は放電末期に内部抵抗が高まり、発熱量が増えるので、容器内部に温度センサを設けている。また、容器内には放熱材を挿入している。

この一次電池により、0.5 m/sの速度ではあるが24時間の連続潜水が可能となった。

しかし、一次電池の場合は使い捨てであるため、コストの面で問題があった。そこで、筆者らはその後リチウム二次電池を用いた電池ユニットを開発した。電池ユニットは図3に示すように、直列接続した7個のブロックから構成される。各ブロックは直並列に接続された単3サイズの28個のセルから構成される。容量が減少し電圧が低下したセルを検知し、過放電を防止するため、各ブロックの電圧を制御回路によりモニタしており、電圧が低下したブロックは他のブロックから電氣的に切り離すようにしている。

(最大潜水浮上角度)

海底ケーブルは起伏のある海底に沿うように敷設される。したがって、AE2も海底の起伏に沿って走行する必要がある。そこで、急傾斜地にも対応できるように、最大潜水浮上角度は30度を目標とした。

図4はピッチング一定制御のステップ応答特性の一例を示したものである。ピッチング0度から±20度への過渡特性を示したものであるが、昇降舵の舵角の動きにはまだ余裕があり、±30度の潜水浮上が可能であることが推測できる。また、オーバーシュートも見られず、安定した制御が行われていることが確認できる。

(最小旋回半径)

ケーブル探査時にはAE2はケーブルを横断する方向に前進し、ケーブルの直前で回頭し、追跡を開始する。そのため、横方向の運動特性も重要である。そこで、最小旋回半径7m(前進速度1 m/s)を設計目標とし、コンピュータシミュレーションによりその性能を確認した。

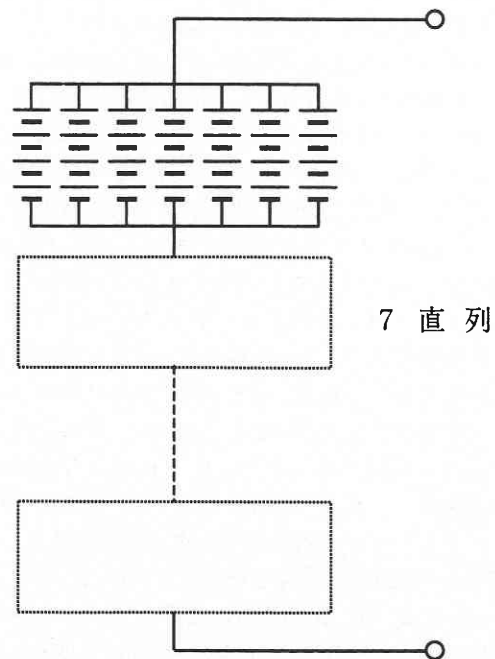


図3 二次電池のセルの接続

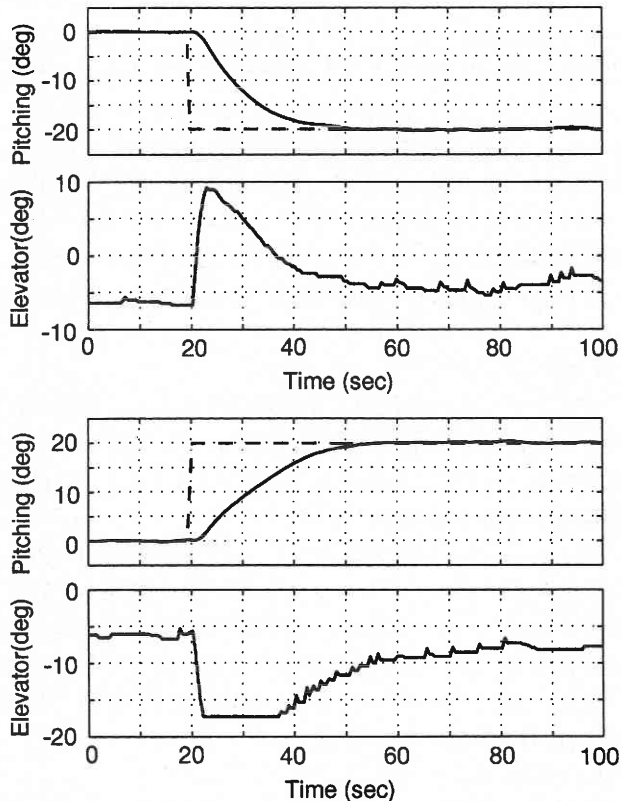


図4 ピッチ制御の一例 前進速度1m/sで、水平状態から±20度への過渡特性を示している

5. ケーブルトラッキング

前述したように、ケーブルの位置を測定するために、ケーブル内部の給電線に低周波数の交流電流を流し、その交流電流によって発生する交流磁界を、前翼の内部に配置した2台の3軸直交型磁気センサで探知する。

ここで、ケーブル位置の計算方法を示すために、図5の座標系を定める。xyzはロボットに固定された座標系でその原点は2台の磁気センサの中心にある。x''y''z''は海底ケーブルに固定された座標系であり、x''y''z''座標系はx''y''z''をz''軸のまわりに図中の方向に θ 回転したものである。また、x'y'z'座標系はx''y''z''をy''軸のまわりに β 回転したものであり、xyz座標系はx'y'z'をx'軸のまわりに α 回転したものである。 α と β はそれぞれロボットのローリングとピッチングに対応し、 θ はケーブルとロボットのなす角度に対応する。また、 P_1 と P_2 は2台の磁気センサの位置を表し、 L はその間隔を示す。 Y と Z をそれぞれロボットとケーブルの間の水平距離と垂直距離とし、2台の磁気センサの位置の磁界をそれぞれ (B_{x1}, B_{y1}, B_{z1}) , (B_{x2}, B_{y2}, B_{z2}) とする。 A_i , B_i , C_i ($i=1, 2$), K を(1)~(4)のように定義すると、ケーブルとロボットとの間の角度 θ 、水平距離 Y 、垂直距離 Z は(5)~(7)式で表される。実際の計算で

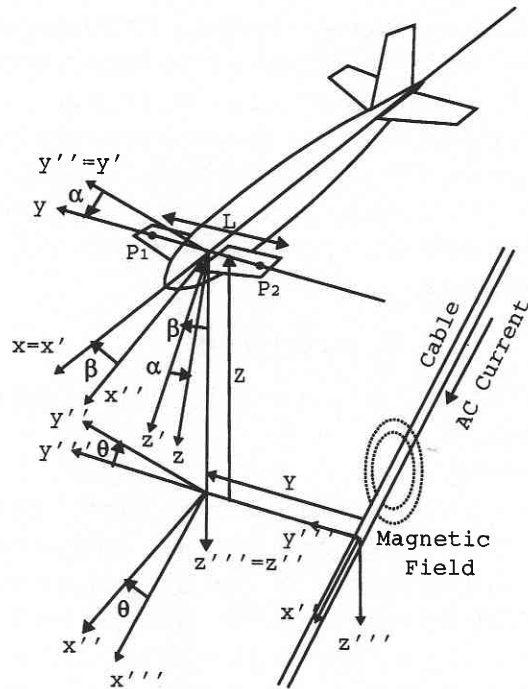


図5 ケーブルトラッキングに関する座標系

は近似式を使うことが多い。

$$A_i = B_{xi} \cos \beta + B_{yi} \sin \alpha \sin \beta + B_{zi} \cos \alpha \sin \beta \quad (i=1, 2) \quad (1)$$

$$B_i = B_{yi} \cos \alpha - B_{xi} \sin \alpha \dots\dots\dots (2)$$

$$C_i = -B_{xi} \sin \beta + B_{yi} \sin \alpha \cos \beta + B_{zi} \cos \alpha \cos \beta \dots\dots\dots (3)$$

$$K = \frac{C_1(A_2^2 + B_2^2 + C_2^2)}{C_2(A_1^2 + B_1^2 + C_1^2)} \dots\dots\dots (4)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{A_i}{B_i} \right) \dots\dots\dots (5)$$

$$Y = \frac{1}{2} \frac{K+1}{K-1} L (\sin \theta \sin \alpha \sin \beta + \cos \theta \cos \alpha) \dots\dots\dots (6)$$

$$Z = \frac{B_1}{C_1} \frac{K}{K-1} L (\tan \theta \sin \alpha \sin \beta + \cos \alpha) + \frac{1}{2} L \sin \alpha \cos \beta \dots\dots (7)$$

実際に海底ケーブルに流す電流は数十mAと微小なので、ケーブルを効率よく探知して、埋設深度を正確に測定するためには、ロボット自身から発生する磁気雑音を低減し、検知信号のS/Nを高めることが重要である。AE2では雑音源である電気モータに磁気シールドを施すことにより、磁気雑音レベルを1/10程度に減衰させている。さら

に、帯域幅±1 Hzの狭帯域バンドパスフィルタを用いることにより、等価的雑音レベルを0.05 nT (nano Tesla) 以下に押さえている。これにより、ケーブルに50 mAの交流電流が流れている場合、60 mの距離から10 dBのS/Nでケーブルを探知することができる。

図6(a)は実際の海底ケーブルを追跡しているときのデータの一例で、図6(b)はそのときのロボットの航跡である。ロボットは海底ケーブルを横断するように前進するが、磁界の強度が0.5 nTを超えると自動的にケーブルトラッキングを開始する。この場合、海底ケーブルは海底面上に敷設されていたので、超音波高度計で測定した海底面からの高度と、ケーブルとの間の垂直距離がほぼ一致している。ケーブルからの垂直距離の測定値にはばらつきが見られるが、これは検知する磁界の強度が小さく、ノイズの影響を受けているためである。また、ケーブルからの水平距離にオフセットが見られるが、これは横からの潮流の影響によるものである。なお、制御アルゴリズムを改善した結果、現在ではこのオフセットは生じない。

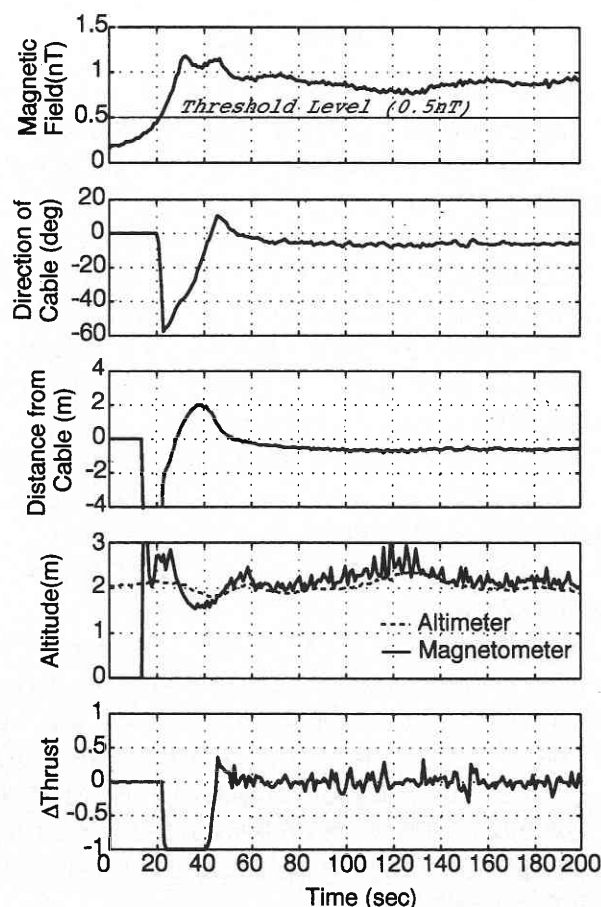


図6 (a) ケーブルトラッキングの一例

6. 超音波リンク

3.で述べたように、AE2では制御用超音波リンクと画像伝送用超音波リンクの2種類の超音波リンクを利用している。表2に制御用超音波リンクの主な仕様を示す。フィルタリングや変調、復調、同期などのデータ処理はDSPで行っている。データは固定長の packets に変換され、送られる。packet が正しく受信されたことを示す返信がない場合には、一定の間隔でpacket を再送信する。

表3は画像伝送用超音波リンクの主な仕様で、図7は

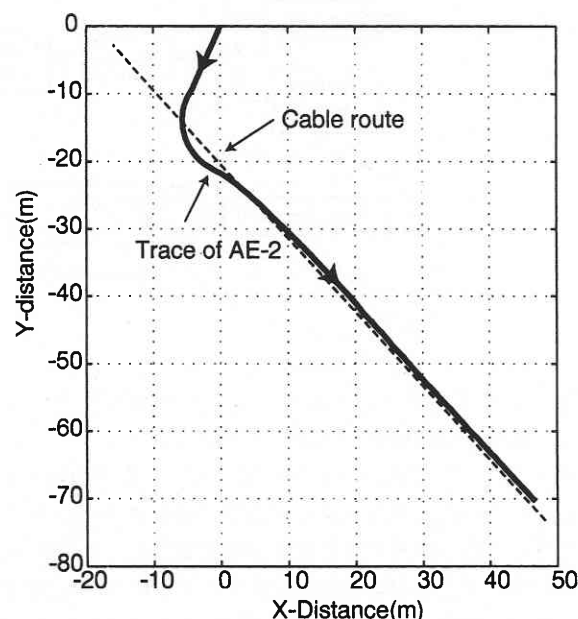


図6 (b) ケーブルトラッキングの航跡

表2 制御用超音波リンクの主な仕様

| 項目 | 仕様 |
|--------|------------------------------|
| 変調 | FSK (Frequency Shift Keying) |
| 伝送速度 | 125 bits/s |
| 指向性 | なし |
| 伝送方向 | 双方向 (Full Duplex) |
| 搬送周波数 | 40 ~ 48 kHz |
| 誤り訂正符号 | Reed-Solomon |

表3 画像伝送用超音波リンクの主な仕様

| 項目 | 仕様 |
|---------|--------------------------------------|
| 解像度 | 80 × 60 ~ 640 × 480 pixels |
| 画像圧縮 | JPEG |
| 伝送速度 | 16, 24, 32 kbits/s |
| 誤り訂正符号 | Reed-Solomon |
| 変調 | QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) |
| 搬送周波数 | 90 ~ 110 kHz |
| 送波レベル | 183 dB re 1 μPa |
| 指向性 | 45 度 |
| 消費電力 | 最大 20 Watt |
| ドップラー耐力 | 0.3 % (4.5 m/s) |

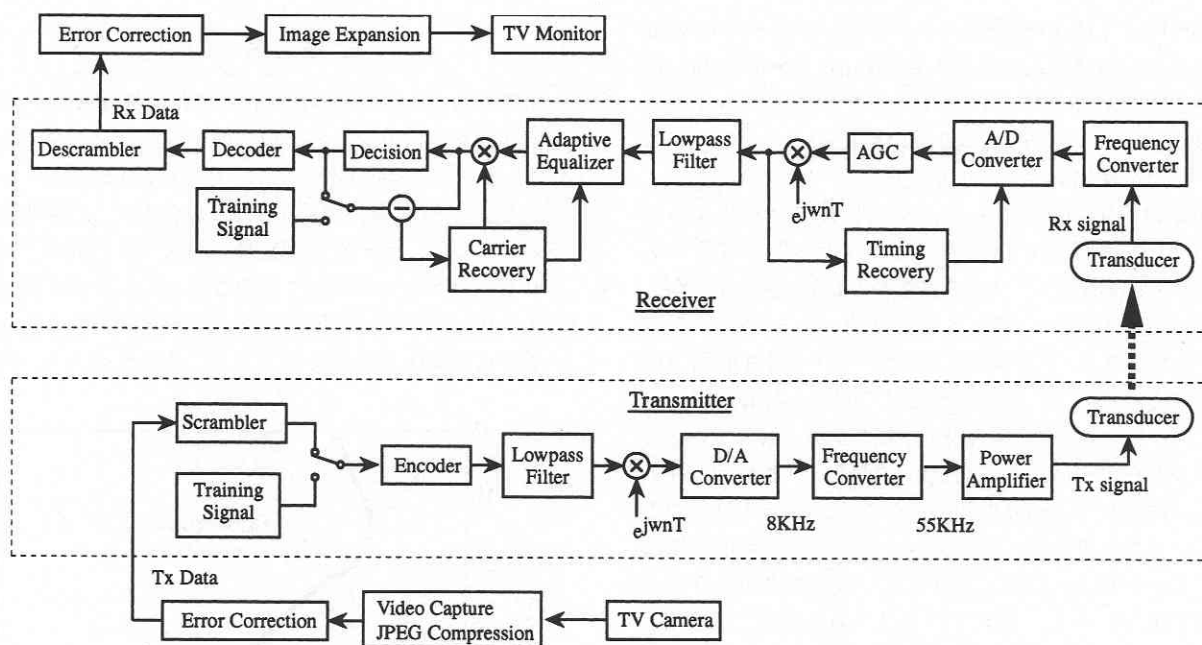


図7 画像伝送用超音波リンクのブロックダイアグラム

ブロックダイアグラムである。AE 2に搭載可能とするために、小型・低消費電力化を行っている。

ビデオ信号は標準的な画像圧縮方式である JPEG を用いて圧縮している。本リンクの利用目的は海底のモニタリングであるため、画質よりも伝送速度を重視し、圧縮率を高めている。たとえば、 160×120 ピクセルのカラー画像を $1/30$ に圧縮すると、データ量は約 15 kbits になり、16 kbits/s の伝送速度で約 1 秒間に 1 枚の画像が伝送できる。

前述したように、海中超音波伝送では信号誤り率が高いので、エラー訂正機能が重要となる。特に、画像圧縮された信号では誤りがあると正しく伸張することができない。そこで、Reed-Solomon 符号を採用し、エラー訂正を行っている。データは 108 バイト毎に 20 バイトの冗長信号を付加し、128 バイトを 1 ブロックとして伝送している。これにより、1 ブロック当たり 10 バイトまでのエラーの訂正が可能である。

伝送路の周波数特性などを補償するため、データの送信に先立ち、トレーニング信号により同期を確立するとともに適応型等価器のタップ係数を決めている。この適応型等価器は変動する伝送路の特性を実時間で補償している。また、ドップラーシフトの影響を吸収するために、受信信号からタイミングの抽出を行い、抽出したタイミングで A/D 変換を行っている。これらの信号処理と画像伸張は 2 個の DSP で行っている。

7. オペレーション

AE 2の一連のオペレーションのうち、もっとも難しいのが海中への揚げ降ろしである。そこで、調査海域が港から近い場合には、AE 2は母船で潜水地点まで曳航する。曳航速度は最大 6 kt.である。

潜水時は、通常スラスタを使いながら潜水する。

AE 2は超音波トランスポンダを搭載しており、その位置は音響測位装置で測定される。また、潜水深度や方位、ピッチング角度などの情報は、超音波リンクにより母船に伝送される。海底に近づくと、ドップラーソナーまたは超音波高度計により海底からの高度が計測される。

海底ケーブル等を探索する時には、海底ケーブルに直交する方向に前進する。AE 2はケーブルを見つけたときに自動的にトラッキングを開始する。ほとんどのオペレーションは自動的になされるので、オペレータの負担は軽く、操縦は容易である。

海底を撮影するために、AE 2にはストロボと水中テレビカメラが下向きに固定されている。照明に要する電力を削減するためと、連続撮影時間を拡大するため、撮影は最大 1 秒に 1 枚で、ハードディスクに記録する。適当な高度を保つことにより、海底面の 24 時間以上の連続的な撮影が可能である。同時に、画像伝送用超音波リンクにより、母船に海底映像を伝送する。図 8 に AE 2により撮影した海底映像の一例を示す。

調査が終了したのち、通常はスラスタを用いて浮上する。



図8 AE2で撮影した海底写真の一例

また、バラストを落とすことにより浮上することもできる。このバラストは電磁石で固定されているだけなので、電池が消耗したときも自動的に落下し、AE2は浮上する。このことにより、AE2の信頼性が向上している。

水面近くに浮上したところで、AE2はブイを放出する。ブイはロープでロボットにつながれている。このロープをたぐり寄せることにより、AE2を吊り上げることができる。

さらに、水面に浮上すると、垂直尾翼に固定されているラジオビーコンが動作する。AE2の位置は超音波測位装置で監視されているが、万一見失った場合にもラジオビーコンによりAE2を探査することができる。

8. これまでの実績

AE2は、平成9年3月にはハードウェアの組立が終了し、直後の実験で主要な運動性能の確認を行った。平成10年1月に行った第2次海洋実験では、沖縄の沖合に敷設されている実際の海底ケーブルのトラッキング実験に成功した。

その後、平成10年4月には建設中のJHHケーブル（Japan

Information Highway, 日本列島を一周する海底ケーブルシステム）の京都府の陸揚げ局近傍の海底状況調査に利用された。さらに、同年8月には新潟沖のJHHケーブル建設状況調査に利用された。いずれの調査でも、短時間で必要な調査に成功し、AE2が実用に供しうることが実証された。平成11年8月には、台湾国内ケーブルの埋設状況調査を400 km以上に渡って行った。また、平成12年3月には、東京大学生産技術研究所、KDD研究所、国営沖縄記念公園水族館の共同研究として行った沖縄県座間味島沖のザトウ鯨調査研究に利用された。

9. あとがき

AE2はケーブルやパイプラインのトラッキングが可能な世界で初めての自律走行式水中ロボットである。特に、広域の海域を連続的に調査するのに適している。あらかじめ、電線を敷設しておけば、同じところを繰り返し調査できるのも特徴の一つである。

自律型水中ロボットの応用分野は、海底ケーブル以外にも、例えば、海底鉱物資源や水産資源の調査、海洋環境の調査など、様々な分野への応用が考えられる。今後様々なタイプの自律型ロボットがそれぞれの分野で活躍することが期待される。

東海大学加藤直三教授には、流体力学的な検討で御協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

(2000年5月18日受理)

参考文献

- 1) Robert L. Wernli, AUV's - The Maturity of the Technology, OCEANS'99, pp. 189-195, 1999.
- 2) K. Asakawa, J. Kojima, Yoichi Kato, S. Matsumoto and N. Kato, Autonomous Underwater Vehicle AQUA EXPLORER 2 for Inspection of Underwater Cables, Proc. of UT 2000, to be published, 2000.
- 3) K. Asakawa, J. Kojima, Y. Ito, S. Takagi, Y. Shirasaki and N. Kato, Autonomous Underwater Vehicle AQUA EXPLORER 1000 for Inspection of Underwater Cables, Proc. of AUV'96, 1996.