

平成21年6月1日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18760616
 研究課題名（和文） 3次元ソナーと光学カメラを融合した自律型水中ロボットによる構造物観測
 研究課題名（英文） Structure Observation by Fusion of a 3D-Sonar and an Optical Camera for Autonomous Underwater Vehicles.
 研究代表者
 近藤 逸人（KONDO HAYATO）
 東京海洋大学・海洋工学部・准教授
 研究者番号：40361802

研究成果の概要：自律型水中ロボットによる水中構造物観測のためのセンサとして、10m程度の近距離を3次元で距離計測可能な3次元ソナーと光学式のカメラを融合したセンサシステム開発を目的とし、その基礎開発として小型の3次元ソナーを試作した。水槽実験により、開発したソナーアレイの送波・受波感度、距離分解能、角度分解能、および3次元形状の計測実験を実施し、その有効性を確認した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,500,000	0	1,500,000
2007年度	1,000,000	0	1,000,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	300,000	3,800,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：海中・海底工学、海洋工学、海洋探査、自律型水中ロボット、ソナー

1. 研究開始当初の背景

自律型水中ロボット（AUV）は、従来長距離を広範囲にわたって航行しながら海底面の音響画像を撮影したり、化学的データを計測したりする用途を目的に開発されることが多かった。今日商業化されたり軍用で用いられる形式である。これに対して申請者は、1999年に水中構造物などを自動的に発見して接近し、これをテレビカメラで撮影しながら構造物表面をなぞるような観測行動が可能な水中ロボット「トライドッグ1号」を開発し、棧橋のパイルを模した構造物の自動

観測や港湾の防波堤観測などを成功させてきた。2004年には世界最大水深に設置されている岩手県釜石湾の湾口防波堤の全自動観測に成功し、AUVによる水中構造物観測としては世界初となる成果をあげた。これらの成果が引き金になったかどうかは定かではないが、ここ数年の間に水中油田のライザーやジャケットなどの水中構造物や船舶の船底を自動観測することを対象としたAUVの研究開発が米国、英国等で開始され、ホバリング型AUVやインスペクション型AUV等の用語が学会でも使われるようになってきている。

AUV が水中構造物を自動観測するためには、高精度な位置決めと対象物を測定するセンサが非常に重要である。構造物周辺では音波が乱反射するため、従来水中ロボットの位置決めに使われている LBL や SSBL 等の外部支援装置を使った音響的な位置計測は困難である。このため、構造物周辺において、画像撮影に適した 1 メートル程度の距離を正確に保持しながら移動するためには、構造物との相対距離と姿勢を基準とした相対的ナビゲーションを行うことが有効であることをこれまでの研究で確認している。しかしながら、水中ではセンサのデータが、水の濁りや温度等によって非常に大きな影響を受けるため、ひとつのセンサのみに頼って行動制御を行なうと、このセンサが誤計測をただでけでミッション全体が破綻を来す。そこで、2004 年から各種のセンサデータを確率的に処理するセンサフュージョン手法を取り入れて研究開発に取り組んでいる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、これまでの知見から得られているセンシングの重要性に着目し、3 次元的な距離測定が可能なソナーとテレビカメラおよびレーザ装置による光学的測距装置から得られるセンサデータを確率的に融合し、AUV と水中構造物との相対的位置関係をロボスタに抽出し、観測のための AUV ナビゲーションの信頼性を飛躍的に向上させるシステムを構築しようとするものである。

3 次元的な距離測定が可能なソナーは世界的には二三商業化されているものの、数千万円の価格帯と、装置の巨大さや重さで、我々の扱う小型の AUV には導入が困難なものしか存在しない。そこで、測定距離を構造物観測を目的として近距離に限定し、かつ分解能の高い小型ソナーを開発する。分解能としては、構造物表面の数センチの凹凸を検出できる精度のものとする。商業化されているソナーとしては平面内のプロファイルを得られるものはあるが、3 次元情報を同時に取得できる小型のものは現在無い。ソナー開発を完全に実行しようすると、莫大な資金が必要となるため、ここでは、面状に素子を並べた音響アレイとプリアンプや AD 変換の回路等、信号をコンピュータに取り込むところまでを実際開発し、信号処理は一般のコンピュータで行い、1 秒に 1 回程度の周期で測定が可能なシステムの構築を目指す。

開発するシステムは、水中構造物の観測のみでなく幅広く応用できる。たとえば、沈船調査における船体の損傷や変形状況の詳細計測、船舶の船底変形計測、付着物の調査、不審物の探索、除去、あるいは悪視環境での構造物設置作業などに威力を発揮できる。水棲生物の大きさを計測したり、マニピュレ

ータで捕獲したりするためのセンサとして用いるなどサイエンスにも貢献可能である。AUV のナビゲーションに関しては、衝突回避やフィーチャベースナビゲーション、3 次元マッピングと画像モザイクの同時遂行など応用範囲も広い。

3. 研究の方法

(1) 3 次元ソナーの設計

①要求仕様を策定する。観測するターゲットまでの距離、必要な分解能、測定精度等、ソナーの基本性能に対する要求仕様を決定する。素子数は 100 個～144 個程度を予定。

②音響場をシミュレーションにより解析し、ソナーアレイの詳細設計を行う。音響的詳細については、業者の専門家に相談しつつ、これを参考に設計する。

③ソナーアレイを製作する。セラミックスの焼成および、樹脂モールド、容器の機械加工の製作に関する事項は業者に依頼する。

(2) 3 次元ソナーアレイの試作

①設計より、周波数を 300kHz～600kHz とし、送波 16 チャンネル、受波 32 チャンネルを直交して配置するソナーアレイを試作する。

②ソナーアレイにはプリアンプ回路またはバッファ回路のみを搭載して小型化を図ると共に、ケーブルを 20 メートル程度付けて、水槽での実験が可能な状態とする。

③外部発信回路と電源装置を接続して音波を発信させ、受波信号はオシロスコープを用いて各素子ごとに、水槽における実際の音響特性（送波感度、受波感度）を検証する。

④A/D ボードにより、多チャンネルの同時取り込みを行い、ソフトウェアによって、これらの信号処理をオフラインで行えるシステムを構築する。

(3) 水槽実験

①水槽中にソナーアレイと球状の対象物を入れ、計測距離を変化させて探知可能距離を検証する。

②水槽中にソナーアレイと 2 本の棒状の対象物を入れ、この 2 本の距離を変化させて、角度分解能、および距離分解能を検証する。

③水槽中にソナーアレイと金属フレームに梱包材（エアキャップ）を巻き付けて四角柱を構成した対象物を入れ、3 次元形状の計測を試みる。

4. 研究成果

(1) 3次元ソナーの設計

①観測するターゲットまでの距離、必要な分解能、測定精度等、ソナーの基本性能に対する要求仕様を決定した。ターゲットまでの距離は光学式のカメラがロボット直前から2～3メートルの範囲をカバーすることを考慮して、2メートル～10メートル程度のレンジを計測できることを目標として設定した。分解能に関しては10mで10cm程度の分解能を設定して基本的な検討を行い、必要な素子数を送波器48素子、受波器96素子と求めたが、小型のロボットへ実装するためにはサイズが大きくなりすぎる点と、限られた予算内で実装することを考慮してこの要求仕様は高すぎると判断し、目標とする分解能を下げ、ソナーアレイの素子数を送波器16素子、受波器32素子として、実現可能な設計をすることに決定した。

②周波数は300kHz～600kHzとして、送波はチャープ信号により送信することとした。これは、小型の送波・受波アレイでは、感度を得ることが物理的に困難であるため、マッチドフィルタによりS/Nの向上を図るためである。

③ソナーアレイの形状は送波アレイを縦に、受波アレイを横にならべたT字型のアレイとし、送波・受波ともに電子的にビームフォーミングを行うことによるクロスファンビームにより、 $16 \times 32 = 512$ 本のペンシルビームを発生させ、それぞれの方向の距離を計測可能な仕様として決定した。

設計したソナーアレイの仕様を表1に示す。

表1 Specifications of the sonar array.

Array spacing of receiver (Horizontal)	0.70λ
Dimension of receive transducer	$0.70\lambda \times 1.70\lambda$
Array spacing of transmitter (Vertical)	1.40λ
Dimension of transmit transducer	$0.88\lambda \times 1.40\lambda$
λ : wavelength of sound	

(2) 3次元ソナーアレイの試作

①設計に基づいて、セラミックス素子の焼成および、樹脂モールド、圧力容器の機械加工を実施し、ソナーアレイにはプリアンプ回路までを実装してケーブルを約10メートル程度取り付け、ソナーアレイの基本特性試験が可能な状態とした。

②ソナーアレイを試験水槽に設置し、一定の距離を置いて基準音源を設け、これからいくつかの周波数の音波を発信させて、ソナーアレイの入力側各素子(32チャンネル)からの出力を個別にオシロスコープで計測する基本的な特性試験を行った。この結果から受波

感度周波数特性を求めた。出力側に関しては、音響特性があらかじめ校正されたハイドロフォンをアレイから一定の距離を置いて設置し、任意周波数の信号を出力素子から出力させて、この受信波形をオシロスコープで計測する特性試験を行った。この結果から送波感度周波数特性を求めた。以上の試験結果から、各チャンネルについて若干の特性の違いは認められたものの、信号処理時に補正することができる範囲内であるため、開発したソナーアレイの音響的な有効性を確認することができた。

③32個の受波素子から収録される信号を同期してコンピュータに取り込むシステムを構築し、ソフトウェア的にこれらを信号処理することで電氣的にビームフォーミングが可能な状態とした。これにより、1回の送波につき64本の受波音響ビームを生成し、水平面内の音響映像を取得することが可能となった。3次元ソナーの構築には送波についてもビームフォーミングを行う必要があるが、このシステム構築には多大なコストがかかるため、送波は1チャンネルのみとして16個の送波素子に同期信号を入力し、物理的にソナーヘッドをチルトさせながらデータを取得することで、疑似的に3次元ソナーの出力を得られるシステムを構築した。

試作したソナーアレイを図1に示す。

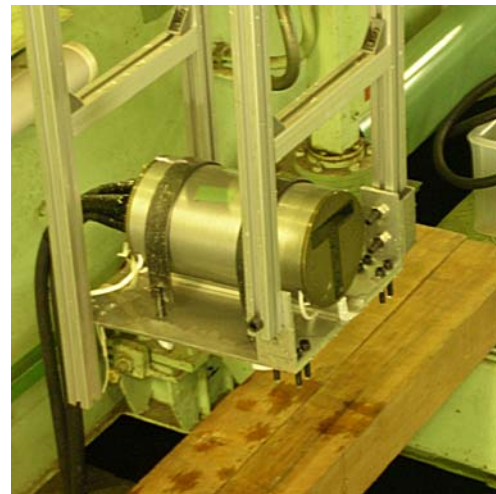


図1 3D sonar array.

(3) 水槽実験

①システムを実験水槽に入れて、ソナーの探知距離、分解能および3次元計測について評価試験を行った。探知距離の評価試験では、中空の小球をターゲットとして計測試験を行い、設計仕様として設定した10[m]の距離において十分な検波を得ることを確認した。図2に検波の様子を示す。

②分解能に関する評価試験では、2本のパイプを平行に並べてその間隔を変化させながら

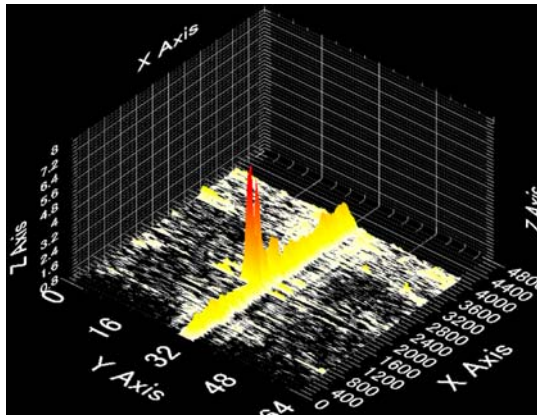


図2 Detected signal of the target detection test.

ら2つの信号を分離可能かどうか確認することで、角度分解能および距離分解能を評価したところ、設計仕様を満たす結果を得た。

図3に角度分解能試験の検波の様子を示す。

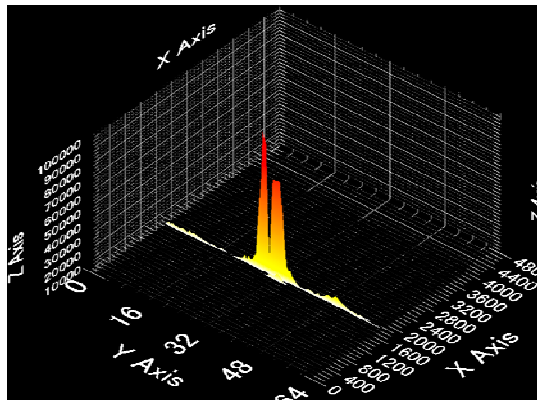


図3 Detected signal of the angular resolution test.

③ 3次元計測に関する評価試験では、エアキャップシートを巻いた四角柱を水槽に入れて、この形状を観測する試験を行った。その結果、四角柱の平面を観測可能なことを確認した。

図4に対象物の四角柱と検波の様子を示す。

以上により、構築したソナーシステムの有効性を確認した。

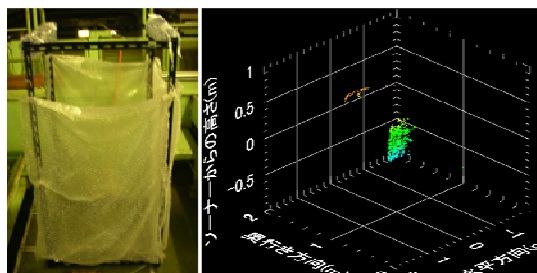


図4 Target and 3D reconstruction of the 3D test.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)

- ① 卷俊宏、近藤逸人、浦環、「自律型水中ロボット(AUV)による水中画像マッピング」、社団法人計測自動制御学会誌「計測と制御」、査読無、第47巻 第10号、2008年、pp.810-816
- ② 卷俊宏、近藤逸人、浦環、坂巻隆、水島隼人、柳澤政生、「自律型水中ロボットによる鹿児島湾たぎり噴気帯の3次元画像マッピング」、海洋調査技術、査読有、第20巻、2008年、pp.1-16
- ③ 近藤逸人、「自律型水中ロボットの設計と開発動向」日本設計工学会誌 設計工学、査読無、第43巻、2008年、pp.115-120
- ④ 近藤逸人、卷俊宏、浦環、坂巻隆、「AUV NAVIGATION BASED ON MULTI-SENSOR FUSION FOR BREAKWATER OBSERVATION」、Proc. of 23rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC2006)、査読有、2006年、pp.72-77

〔学会発表〕(計11件)

- ① 近藤逸人、吉田登志生、似鳥一彦、「自律型水中ロボットへの搭載を想定した小型3次元ソナーの開発 — テストシステムの設計と基礎実験 —」、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009 (ROBOMECH 2009)、2009年5月25日、福岡県、福岡市
- ② 近藤逸人、「Fisheries & Engineering Collaboration Projects in TUMSAT and a Biointeractive AUV」、Asian and Pacific Universities' Underwater Roboticians -ApuuRobo 2009-、2009年3月9日、Honolulu, Hawaii, USA
- ③ 卷俊宏、近藤逸人、浦環、坂巻隆、「Large-area visual mapping of an underwater vent field using the AUV "Tri-Dog 1"」、Proc. of the OCEANS '08 MTS/IEEE、2008年9月17日、Quebec, Canada
- ④ 卷俊宏、近藤逸人、浦環、水島隼人、坂巻隆、柳澤政生、「自律型水中ロボット「トライドッグ1号」による鹿児島湾たぎり噴気帯の画像マッピング」、海洋調査技術学会 第19回研究成果発表会、2007年11月16日、東京
- ⑤ 水島隼人、卷俊宏、浦環、坂巻隆、近藤逸人、柳澤政生、「Autonomous recognition of bubble plumes for navigation of underwater robots in active shallow vent

- areas」、Proc. of the OCEANS 2007 MTS/IEEE VANCOUVER Conference & Exhibition、2007年10月3日、Vancouver, Canada
- ⑥ 卷俊宏、水島隼人、近藤逸人、浦環、坂巻隆、柳沢政生、「Real time path-planning of an AUV based on characteristics of passive acoustic landmarks for visual mapping of shallow vent fields」、Proc. of the OCEANS 2007 MTS/IEEE VANCOUVER Conference & Exhibition、2007年10月3日、Vancouver, Canada
- ⑦ 卷俊宏、近藤逸人、浦環、坂巻隆、「Positioning method for an AUV using a profiling sonar and passive acoustic landmarks for close-range observation of seafloors」、Proc. of IEEE OCEANS '07 Aberdeen, Scotland、2007年6月20日、Aberdeen, Scotland
- ⑧ 卷俊宏、近藤逸人、浦環、坂巻隆、「自律型水中ロボット「トライドッグ1号」による鹿児島湾たぎり噴気帯の観測」、日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会'07 (ROBOMECH07)、2007年5月12日、秋田
- ⑨ 水島隼人、卷俊宏、浦環、坂巻隆、近藤逸人、柳沢政生、「自律型水中ロボットによる噴気帯観測のための噴気と障害物の識別手法」日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会'07 (ROBOMECH07)、2007年5月12日、秋田
- ⑩ 卷俊宏、浦環、水島隼人、近藤逸人、坂巻隆、柳沢政生、「Low altitude tracking of rugged seafloors for autonomous visual observation」、International Symposium on Underwater Technology 2007 & International Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies 2007、2007年4月20日、東京
- ⑪ 近藤逸人、卷俊宏、浦環、「Relative-Navigation and Stochastic-Navigation of Visual Observations」、IEEE Workshop AUV'06: NAVIGATION、2007年2月12日、Brest, France

[その他]

<http://www.ocean.e.kaiyodai.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

近藤 逸人 (KONDO HAYATO)
東京海洋大学・海洋工学部・准教授
研究者番号：40361802

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者
なし