

浅海域用コンパクトなハイブリッド型海中ロボットの開発*

長嶋 豊**, 真部 広紀***, 志久 修****, 下尾 浩正**, 田口 喜祥*****

Development of a compact hybrid type remotely operated vehicle for the shallow water*

Yutaka Nagashima**, Hiroki Manabe***, Osamu Shiku****,
Kosei Shimoo** and Nobuyoshi Taguchi*****

1. はじめに

海洋環境の悪化により、浅海域における環境調査や水産資源調査の必要性が高まっている。調査はほとんどダイバーや船舶により手動的に実施されるが、調査費用、作業効率、安全面、ダイバーの高齢化等の問題がある。少人数で、いつでも手軽に利用できるように、小型、軽量、コンパクトな海中ロボットの開発がきわめて重要である。海中ロボットは、自律型深海巡航探査機「うらしま」¹⁾、海底生物資源調査用無人潜水機「げんたつ500」²⁾、深海における熱水鉱床などの調査観測実用機「r2D4」³⁾、深海生物追跡調査ロボット「PICASSO」⁴⁾などが開発されているが、いずれも多様な動きを実現するために複数の推進器とその制御機構を搭載しており、船体が大型化している。更に、海中ロボットを運用するための支援船や設備などが大がかりとなり、運用費用の面からも浅海域で手軽に利用するには制限がある。

本研究では、浅海域の調査において、少人数で手軽に利用できる軽量なハイブリッド型海中ロボットの開発を目的としている。これまで、コンパクトな自律型海中ロボットの開発を行っており、可変ベクトル (VARIVEC) プロペラ一個のみを用いた三次元航行の実現およびフェジィ制御、PID 制御による自律航行の良好な実験結果を得た^{5),6)}。しかし、実海域の調査において、予期しない事により自律型ロボットが制御不能に陥り、最悪の場合ロボットを亡失する恐れがある。そこで、海中ロボットを安全に取り扱うために、自律型と遠隔操縦型の双方を瞬時に切り換えることが可能なハイブリッド型海中ロボットの開発に着手した。

遠隔操縦型による海中ロボットは、視認による操縦が困難な場合、リアルタイムに海中ロボットの位置および航行状況を把握するシステムの開発が必要である。開発した海中ロボットは、Global Positioning System (GPS) レシーバ、電子コンパス、深度センサ、および衝突防止ソナーを備え、各センサデータは Programmable System on Chip (PSoC) マイコンを用いて抽出・統合し、無線モデムを経由して操縦者へ伝送する。操縦者側は、センサデータをリアルタイムに受信し、開発した操縦者支援モニタシステムを用いて、海中ロボットの位置および航行状況をノートパソコンの画面上で確認する。

本稿では、ハイブリッド型海中ロボットの開発にあたって、まず VARIVEC プロペラの可変翼形状の改良による性能向上を目指した。次に遠隔操縦型海中ロボットを更に細かくハイブリッド化して、浅海域用ブイモードロボット、および表層域用無線モードロボットの開発を行なった。性能評価を大型無響水槽および実海域で実施し、センサデータ伝送の安定性、海洋環境調査、海底遺跡調査の良好な結果を得たので報告する。

本稿では、ハイブリッド型海中ロボットの開発にあたって、まず VARIVEC プロペラの可変翼形状の改良による性能向上を目指した。次に遠隔操縦型海中ロボットを更に細かくハイブリッド化して、浅海域用ブイモードロボット、および表層域用無線モードロボットの開発を行なった。性能評価を大型無響水槽および実海域で実施し、センサデータ伝送の安定性、海洋環境調査、海底遺跡調査の良好な結果を得たので報告する。

2. 海中ロボットの構成

2. 1 海中ロボットの仕様

開発した海中ロボットは、全長 860mm、直径 330mm、空中重量は 30kg である。海中ロボットの前方には、海中の様子をカメラで撮影するために透明の亚克力製ドームを取り付けた。海中ロボットは、後部に取り付けた一個の VARIVEC プロペラのみで海中を自由自在に航行し、模型ヘリコプター用

* 原稿受付 平成 19 年 9 月 28 日

** 佐世保工業高等専門学校 電気電子工学科

*** 佐世保工業高等専門学校 一般科目数学科

**** 佐世保工業高等専門学校 電子制御工学科

***** 長崎県工業技術センター 機械システム科

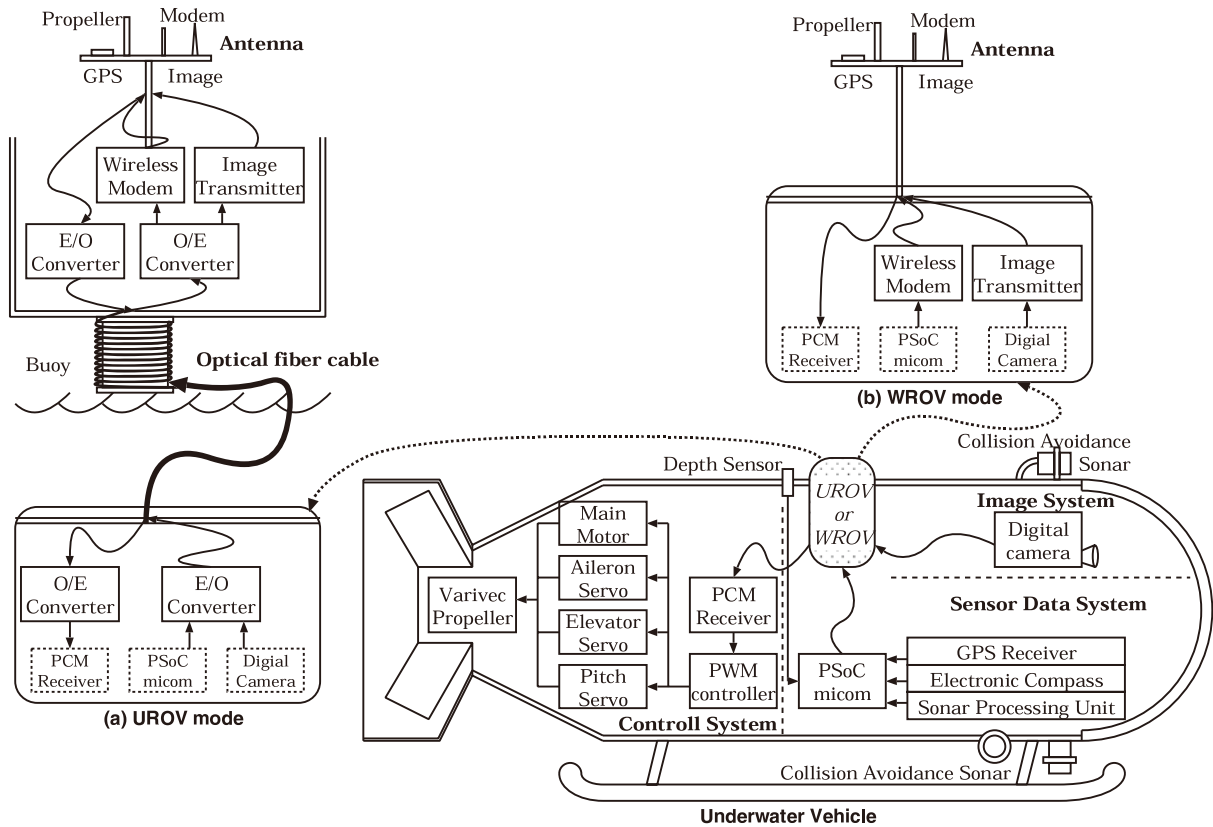


図1 ハイブリッド型海中ロボットのシステム構成

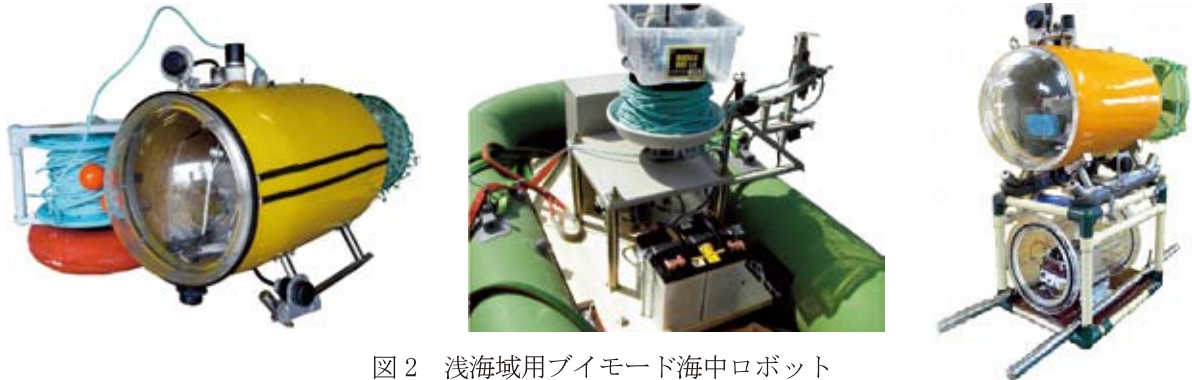


図2 浅海域用ブイモード海中ロボット

ラジオコントロール送信器（プロポ）を用いて操縦する。海中ロボットの航行に必要な電源は、全てロボット内に搭載した。開発した海中ロボットのシステム構成図を図1に示す。海中ロボットの制御システムは、以下に示す機能別に3系統のサブシステムから構成した。機能別サブシステムにすることによって、システムの柔軟性、信頼性、および保守性の向上に有用である。

1) 海中ロボット操縦サブシステム

VARIVVEC プロペラの回転数や翼の角度をプロポで遠隔制御し、海中ロボットを操縦する。

2) センサデータ収集・伝送サブシステム

海中ロボット内に搭載した各センサの出力するデータを収集・統合し、無線伝送する。

3) 映像伝送サブシステム

海中ロボット内のカメラで撮影したリアルタイム映像を操縦者に伝送する。

2. 2 浅海域用ブイモード海中ロボット

浅海域で利用する海中ロボットは、海中では電波を使用することができないため、航行に影響を及ぼさない光ファイバケーブルを接続し、海中ロボッ

浅海域用コンパクトなハイブリッド型海中ロボットの開発

トの操縦，センサデータおよび映像の伝送を行う。これを細径ケーブル式海中ロボット（Unthethred Remotely Operated Vehicle 以下 UROV と略す）という⁷⁾。開発した UROV のシステム構成図を図 1(a) に示し，外観を図 2 に示す。UROV は光ファイバケーブルによって海上のブイと接続され，ブイ上の無線アンテナを介して，UROV の操縦，センサデータおよび映像の伝送を行う。UROV 内に Electrical/Optical (E/O) コンバータを搭載し，3 系統サブシステムの電気信号を光信号に変換して，海上のブイへ信号を伝送する。ブイには O/E コンバータを備え，電気信号に変換した後，無線伝送モデムを介してアンテナから信号を伝送する。海上のブイは，自動巻き取り繰り出し機能を有しており，光ファイバケーブルがロボットに絡むことを防ぐ。

2. 3 表層域用無線モード海中ロボット

表層域における海洋環境調査では，海中ロボットの潜航水深はおよそ 3 メートルで十分である。そこで，更に手軽に海中ロボットを扱えるように UROV から光ファイバケーブル部を取り除き，無線のみで操縦する海中ロボットを開発した。我々はこれを無線式海中ロボット（Wireless Remotely Operated Vehicle 以下 WROV と略す）と呼ぶ。開発した WROV のシステム構成図を図 1 (b) に示し，外観を図 3 に示す。WROV は，光ファイバケーブルの代わりに無線伝送用のアンテナを側面に取り付け，E/O コンバータの代わりに無線伝送モデムを WROV 内部に搭載した。

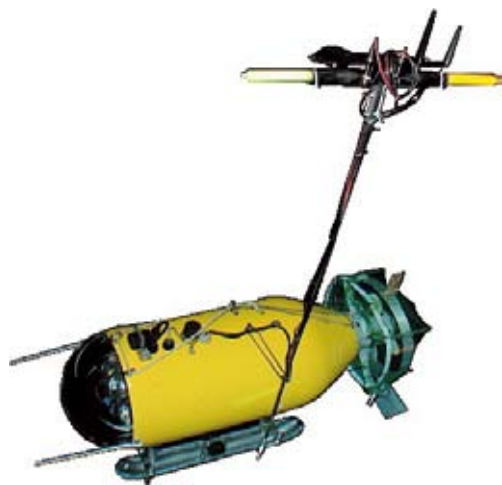


図 3 表層域用無線モード海中ロボット

3. VARIVEC プロペラ可変翼の改良

海中ロボットは複数の推進器によって，前進，後進，潜航，浮上，および旋回を行い，三次元航行を実現する。しかし，浅海域や底質を攪拌せずに調査したい環境において海中ロボットを利用する場合，複数の推進器を用いることは好ましくない。VARIVEC プロペラは，プロペラが 1 回転する間に可変翼のピッチ角を周期的に変化させることによって，前後方向の推力だけでなく，上下・左右方向にも推力を発生可能にしたプロペラである⁸⁾。

我々は，VRIVEC プロペラを海中ロボットに搭載して，1 個の推進器による三次元航行を実現し，海中ロボットのコンパクト化を図った。しかし，可変翼がステンレス製であったため重く，消費エネルギーも大きかった。更に，可変翼はエンドプレート付矩形型であったため，推力を効率的に発生していなかった。そこで，推力向上と負荷軽減を図るため，形状シミュレーションを繰り返して七角形型を考案し，軽量化を図るためにウレタン樹脂を用いて可変翼を製作した。

4. センサデータ収集・伝送サブシステム

4. 1 システム構成

海中ロボットは，操縦者から遠く離れ，深く潜ると視認による操縦が困難になる。海中ロボットの現在位置および航行状況の把握，測線に沿った航行，映像記録との照合の為に，各種センサデバイスを海中ロボット内に搭載した。センサデータ収集・伝送サブシステムは，海中ロボット内の GPS レシーバ GARMIN 製 GPSMP76，電子コンパス Precision



図 4 センサデータ用 PSoC 基板

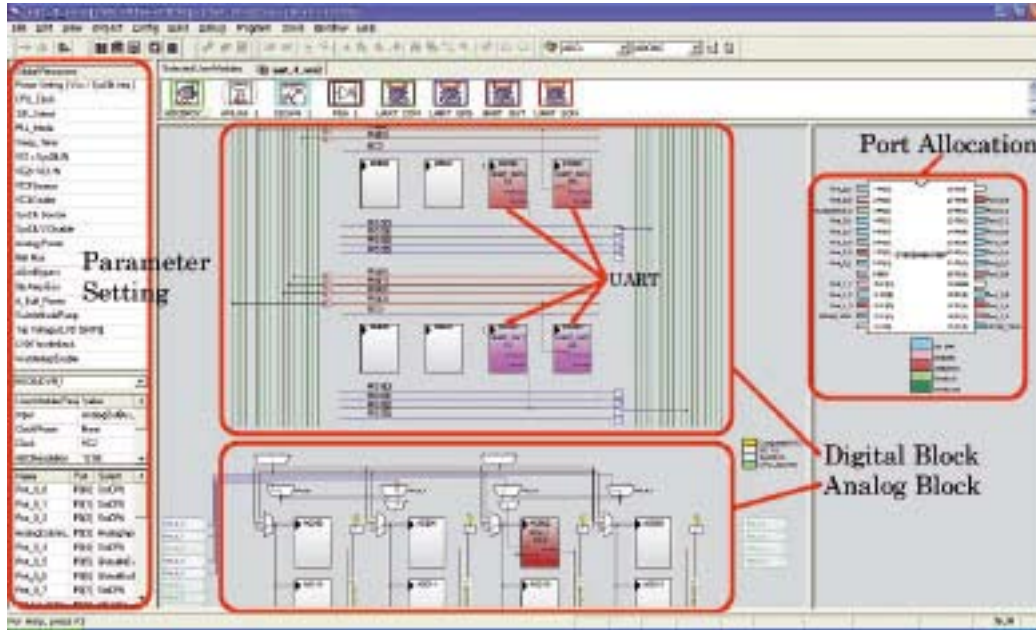


図 5 PSoC 開発ソフトウェア

Navigation Inc 製 TCM2, 深度センサ Durck 製 PDCR4010, 衝突防止ソナー システム技研製 ALT-1800, およびセンサデータを収集・統合する PSoC マイコン Cypress 製 Cy8C29466 から構成した。開発したセンサデータ用 PSoC 基板を図 4 に示す。GPS レシーバは, 現在時刻, 緯度経度を出力する。電子コンパスは, 方位計, 二軸傾斜計, 三軸磁気センサ, および温度計のデータを出力する。衝突防止ソナーは, 150kHz の送受波器を用い, 前方, 下方, 左右 4 チャンネルの対象物までの距離を出力し, 分解能は約 5cm である。深度センサは, 圧力により深度を計測し, レンジは 50m 以内, 精度は 0.01 % である。PSoC マイコンにより統合されたセンサデータは, UROV では海中ロボット内の E/O コンバータ (株式会社七星科学研究所製 WPR-001C を経由して光ファイバーケーブルにより操縦者に伝送する。WROV では海中ロボット内の無線モデム 双葉電子工業(株)製 FRH-SD03T を経由して無線伝送する。

4. 2 PSoC マイコンによるセンサデータ統合

PSoC は, Cypress Micro Systems 社のワンチップマイコンである。特徴としてアナログ回路, デジタル回路, およびマイコンが一枚のチップに収められ, 使用する回路の種類や個数は, Cypress 社から提供されている PSoC 開発ソフトウェアを用いて,

ユーザの手元で自由に構成できる。その多機能性と柔軟性から, 携帯音楽プレーヤや携帯ゲーム機器などの最近のポータブル電子機器などで幅広く利用されている^{9),10)}。

我々はセンサの多様性, 拡張性を考慮して, センサの持つ入出力に柔軟に対応できる PSoC マイコンを用いてセンサデータの抽出および統合を行った。個々のセンサデータの必要な部分を抽出し, 一連のセンサデータに統合して伝送することによって, 受信側でセンサデータを一元的に取り扱うことができる。図 5 に PSoC 開発ソフトウェアを示す。海中ロボットに搭載した RS232C 方式でデータ出力する GPS レシーバ, 電子コンパス, および衝突防止ソナーユニットは, PSoC デジタル回路部の UART (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter) モジュールを用いて, 受信バッファに取り込んだ。UART は, 非同期シリアル通信を制御するコントローラであり, RS232C 方式の通信で用いられ, シリアルデータの送受信に適する。深度センサは, 差動形式の出力のため差動アンプで前段増幅した電圧値を PSoC アナログ回路部の AD (Analog-Digital) コンバータを用いて, デジタル値に変換して取り込んだ。PSoC の入出力ゲートと UART の送受信バッファを接続することによって, チップ外からセンサデータを送受信した。

浅海域用コンパクトなハイブリッド型海中ロボットの開発

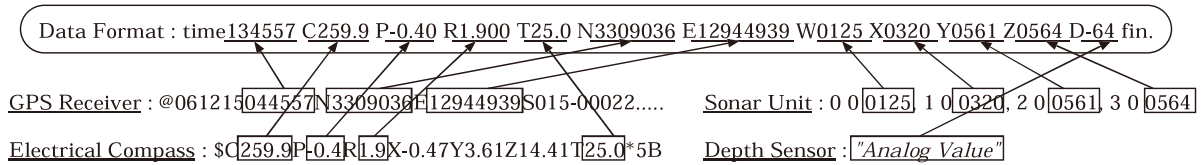


図6 センサデータフォーマット

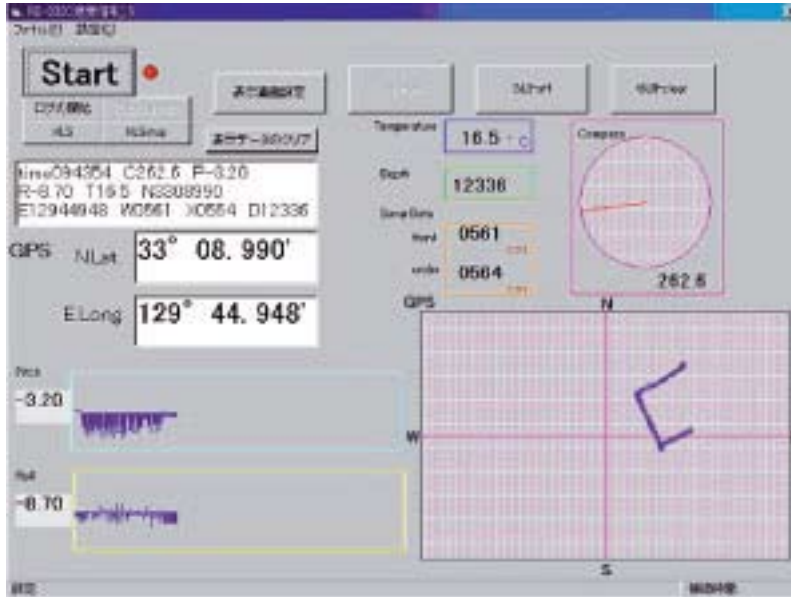


図7 操縦者支援モニタシステム

収集した各種センサデータは、PSoC マイコン部の CPU コアを用いて演算処理を行う。Cypress 社からあらかじめ提供されているライブラリを用いることによって、UART の送受信バッファに格納されたデータおよび AD 変換されたデータは、C プログラムによって演算処理する。マイコンは、各センサデータが UART 受信バッファに取り込まれると、必要なデータのみを抽出し、配列へ格納する。その後、センサデータのフォーマットに従って、各データを UART 送信バッファへ格納する。各センサデータから抽出し、統合したセンサデータのフォーマットを図6に示す。センサデータは、GPS から得られる現在時刻 (time) ・緯度 (N) ・経度 (E) , 電子コンパスから得られる方位 (C) ・ピッチ角 (P) ・ロール角 (R) ・温度 (T) , 衝突防止ソナーから得られる前方距離 (W) ・下方距離 (X) ・右方距離 (Y) ・左方距離 (Z) および深度センサから得られる深度 (D) から成る。

4. 3 操縦者支援モニタシステム

海中ロボットから伝送されたセンサデータは、操縦者側で受信用無線モデムを経由して、RS232C 方式のシリアルポート端子からノートパソコンへ取り込む。海中ロボットの位置および状況を視覚的に得るため、Microsoft 社の Visual Basic を用いて操縦者支援モニタシステムの開発を行った。Visual Basic は、Windows アプリケーションを容易に開発することができ、GUI コンポーネントを配置して、イベントが起こったときの処理をプログラミングするため、視覚的に分かり易いソフトウェアを開発できる。Visual Basic は基本的なライブラリを提供しており、センサデータは提供されている RS232C 通信やタイマーなどの各コンポーネントを用いて取り込んだ。

図7に開発した操縦者支援モニタシステムの一例を示す。図7の左上部は、取り込んでいるセンサデータを表示し、その下にリアルタイムに海中ロボットの緯度および経度を表示する。左下部は海中ロボットのピッチ角およびロール角を数字で表示し、そ

の履歴をグラフで表示する。画面中央部は上から温度、深度、衝突防止ソナーの検出距離を表示する。障害物との距離が 1.5m 以下になると画面をフラッシュさせ、ビープ音を発生することにより、衝突の危険を知らせる。右上部の円は電子コンパスデータの GUI であり、真上を北として方位磁針の様に半径の線によって海中ロボットの向きを視覚的に表す。右下部は GPS データの GUI であり、海中ロボットの現在位置を点で表す。真上を北とし、緯度および経度の範囲をユーザが自由に指定できる。海中ロボットの移動軌跡を残すことができる。また、あらかじめ GUI 上に測線を引いておくことによって、画面を見ながら現在位置を確認し、測線に沿って航行することもできる。受信したセンサデータは、テキスト形式で記録（ログ）保存する機能も備えており、調査後に改めてデータ分析が可能である。

5. 実験結果および考察

5.1 VARIVEC プロペラ可変翼の改善

海中ロボットの航行性能改善策の一つとして、可変翼形状を従来の矩形型から、楕円形、七角形とシミュレーションにより角度、形状を評価した。その結果、図 8 の前進係数-プロペラ効率図に示すとおり、七角形翼が優れていることがわかった。図 9 (a) に示す現在のステンレス製エンドプレート付き矩形型より、同一推力の場合、約 6% のエネルギー削減ができ、同一馬力の場合には約 0.3 ノットの速度増加が見込めることがわかった。そのため、ウレタン樹脂を成型して図 9 (b) に示す七角形翼を製作した。実験の結果、海中ロボットの操縦感も滑らかとなり、動作が安定した。

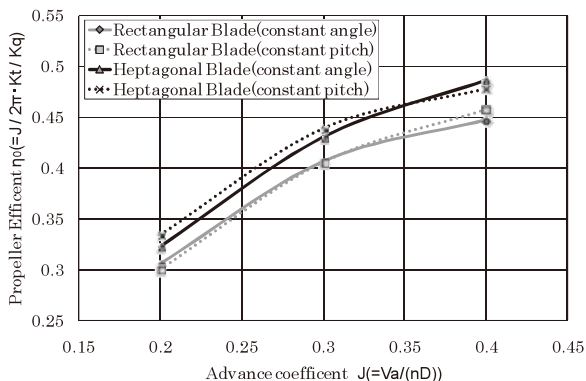
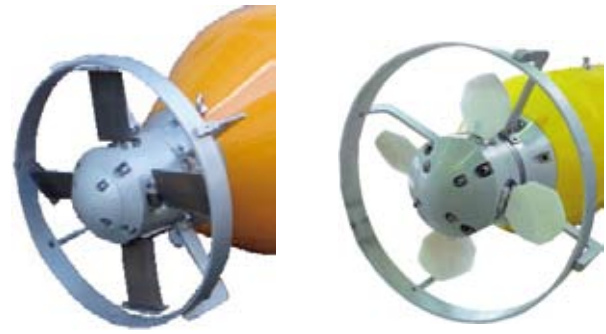


図 8 矩形翼と七角形翼との効率比較



(a) Rectangular Blade (b) Heptagonal Blade

図 9 VARIVEC プロペラ

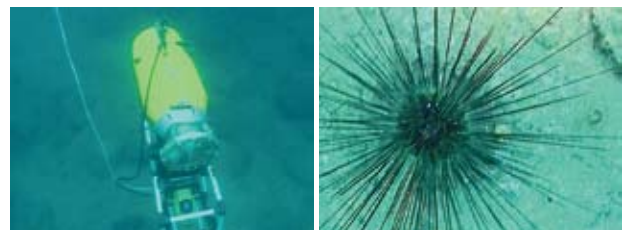
5.2 海底遺跡調査

平成 17 年 8 月長崎県北松浦郡小値賀町の前方湾海底遺跡分布調査に参加し、UROV を用いて海底の様子を撮影した。実験は、海面上でメインモータを始動し、潜航して水深約 11m の海底に到達した。制御不能に陥ることなく、UROV の遠隔操縦は安定して行えた。実験の様子を図 10 に示す。図 10 (d) は、海底で撮影した有毒生物ガンガゼである。ダイバーによる接写が難しい危険な生物も UROV により安全に行えることを実証した。



(a) UROV 投入

(b) 海上のグイ



(c) UROV 潜航中

(d) 撮影したガンガゼ

図 10 UROV を用いた海底遺跡調査

5.3 表層域海洋環境計測

WROV の航行性能、センサデータおよび操縦者支援モニタシステムの伝送安定性を確認するために、

浅海域用コンパクトなハイブリッド型海中ロボットの開発

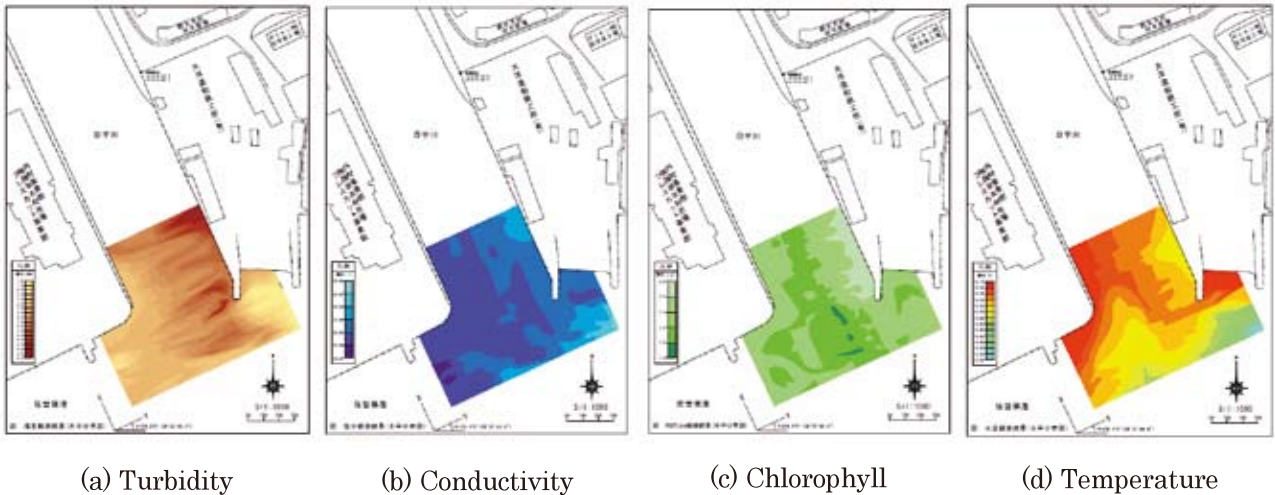


図 11 表層域海洋環境計測結果

佐世保市日宇川河口で表層域海洋環境計測実験を行った。WROV にクロロフィル濁度計 アレック電子製 COMPACT-CLW および水温塩分計 アレック電子製 COMPACT-CT を取り付け、操縦者支援モニタシステムにあらかじめ引いた測線に沿って航行させ、海洋環境計測を行った。表層域の濁度、塩分濃度、クロロフィル、水温を測定した海洋環境計測結果を図 11 に示し、図 12 に実験で得たセンサデータのログより再現した表層域計測航行軌跡を示す。

測線は 10m 間隔毎に設定していたが、時間の都合上 20m 間隔で航行した。WROV が測線に沿って航行できており、鮮明な海洋環境計測結果が得られた。WROV により表層域の海洋環境調査が行えることを実証した。

5. 4 造波動揺実験

海中ロボットが波によって不安定に航行した場合、センサデータの伝送に及ぼす影響を評価するため、九州大学応用力学研究所深海機器力学水槽において、造波動揺実験を行った。同水槽の寸法は、長さ 65m、幅 5m、深さ 7m であり、造波機、回流機構部が設備されている。造波機により 2cm/sec, 4cm/2sec, 9cm/3sec の 3 種類の規則波を発生させ、センサデータ伝送の安定性を確認した。図 13 に操縦者支援モニタシステムを示し、時間経過に対する WROV のロール角およびピッチ角の履歴を示す。センサデータの伝送には影響を及ぼさず安定した伝送が行えることを確認した。

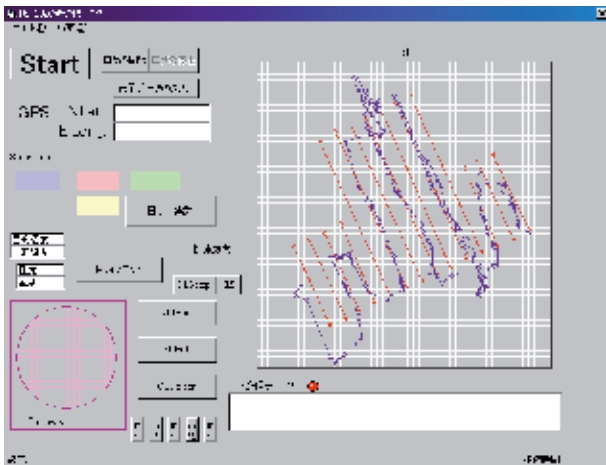


図 12 表層域計測航行軌跡



図 13 造波動揺実験結果

6. まとめ

自律型と遠隔操縦型の機能を持つハイブリッド型海中ロボットの開発に取り組み、本稿では特に遠隔操縦型海中ロボットを、浅海域向けに UROV、表層域向けに WROV と簡便に切換可能なハイブリッド型について述べた。更に、VARIVEC プロペラの可変翼をウレタン樹脂製の七角形型に改良することにより、約 6% のエネルギー改善を実現した。海中ロボットの操縦を支援するために、ロボット内に最新式の PSoC マイコンを用いたセンサデータ伝送システム基板を開発し、操縦者支援モニタシステムを開発した。同時にビデオカメラにより撮影した映像をリアルタイムに伝送する機能も備えた。

開発した海中ロボットの性能評価において、海底遺跡調査では UROV システムの機能評価を行い、今後、海中ロボットにより水中考古学へ貢献できることを示した。WROV システムによる本邦初の表層域海洋環境計測を実現した。更に、データ伝送安定性の評価のために、九州大学応用力学研究所深海力学水槽で造波実験を行い伝送の安定性を確認した。

今後の課題として、海中ロボットの制御不能時のフェールセーフ装置の開発、自律型と遠隔操縦型を切り替え可能なハイブリッド型海中ロボットへの発展、自動巻取り・繰出しブイの小型・軽量化を実現する。センサデータと映像を同一画面に統合した操縦者支援モニタシステムの改善などが挙げられる。

謝辞

本研究の一部は、科研費基盤研究 (C) 課題番号 18560265 および九州大学応用力学研究所共同利用研究の支援を受けて実施した。ご指導を受けた九州大学小寺山亘教授および中村昌彦准教授、長崎大学石松隆和教授に感謝の意を表します。

また、VARIVEC プロペラ可変翼の設計では、有限会社流体テクノ玉島正裕社長、表層域実験では西部環境調査株式会社海洋課土橋敏博課長、水中考古学調査のフィールドを提供いただいた小値賀教育委員会の塚原博主幹、NPO 法人アジア水中考古学研究 所林田健三理事長をはじめ研究所員の方々に御礼申し上げます。

最後に、卒業研究を通じて研究に協力してくれた平成 17 年度卒研究生の杉原大央氏、前田陽平氏、三岳

大昭氏、山崎直樹氏、及び平成 18 年度卒研究生の安藤靖人氏、石脇大洋氏、森 愛美氏、吉田浩平氏に感謝します。

参考文献

- 1) 山本郁夫：“3.6 うらしま(第 3 章 AUV)(<特集>日本の水中ビークル技術の技術史),” 日本造船学会誌, No.883, pp.67-70, 2005.
- 2) 月岡 哲, 領家一博：“細径ケーブル無人潜水機「げんたつ 500」とパソコンによる航跡記録装置について,” 日本造船学会誌, No.811, pp49-54, 1997.
- 3) 小原敬史：“3.1 アールワン・ロボットから r2D4 へ(第 3 章 AUV)(<特集>日本の水中ビークル技術の技術史),” 日本造船学会誌, No.883, pp42-47, 2005.
- 4) 吉田 弘, ドゥーグル・J・リンズィー：“JAMSTEC における技術開発 深海生物追跡調査ロボットシステム“PICASSO”,” 日本深海技術協会会報, 2007 年 3 号, pp.5-10, 2007.
- 5) 長嶋 豊, 井上博文, 田口喜祥, 溝上孝章：“コンパクトな自律型海中ロボットの開発,” 佐世保工業高等専門学校研究報告, 第 39 号, pp.43-48, 2002.
- 6) Y.Nagashima, N.Taguchi and T.Ishimatsu：“Development of a Compact Hybrid Underwater Vehicle Using Variable Vector Propeller,” Proc. of 23rd ISARC 2006, pp.66-71, 2006.
- 7) 浦 環, 高川真一：海中ロボット, 成山堂書店, p56, 1997.
- 8) 星野徹二：“「VARIVEC プロペラ」,” 日本造船学会誌, No.749, p.700, 1991.
- 9) 桑野雅彦：初めての PSoC マイコンー周辺アナログ&デジタル回路を自由自在にプログラミング!!, CQ 出版, pp.11-51, 2004.
- 10) 桑野雅彦：“PSoC マイコン活用講座,” トランジスタ技術 2005 年 6 月号, p.235, 2005.
- 11) 長嶋 豊, 真部広紀：“海中ロボット技術を活かした水中考古学調査 ー小値賀島前方湾における予備実験ー,” 水中考古学研究, 第 2 号, pp.49-54, 2006.