

コンパクトな自律型海中ロボットの實現方法に関する研究
Study on Realization of Compact Autonomous
Underwater Vehicle

1999年12月

長崎大学大学院
海洋生産科学研究科

長 嶋 豊

目 次

	ページ
第1章 緒 論	1
1.1 研究背景	1
1.2 関連する研究	4
1.3 本研究の目的	7
1.4 本論文の構成	9
第2章 コンパクトな自律型海中ロボット	11
2.1 はじめに	11
2.2 海中ロボットのシステム構成	12
2.2.1 システム概要	12
2.2.2 分散制御システム	13
2.2.3 水中情報伝送モジュール	20
2.3 可変ベクトル推進器	23
2.3.1 可変ベクトル推進器の構成と原理	23
2.3.2 可変ベクトル推進器の制御方式	26
2.4 海中ロボットの水槽試験	29
2.4.1 水中情報伝送実験	29
2.4.2 センサ実験	30
2.4.3 自由航走実験	33
2.4.4 流体力実験	35
2.5 まとめ	46
第3章 モルフォロジを用いた魚種識別	48
3.1 はじめに	48
3.2 モルフォロジによる認識手法	49
3.2.1 モルフォロジ演算の特徴	49
3.2.2 2値画像における基本演算	50

	ページ
3. 2. 3 多値画像における基本演算	5 1
3. 3 並列画像処理装置	5 2
3. 3. 1 並列処理用プロセッサ	5 2
3. 3. 2 並列プログラミングモデル	5 3
3. 3. 3 並列画像処理装置の性能評価	5 4
3. 4 モルフォロジによる画像認識実験	5 5
3. 4. 1 単独プロセッサによるモルフォロジ基本演算	5 5
3. 4. 2 並列処理によるモルフォロジ演算の高速化	5 7
3. 4. 3 モルフォロジによる魚種識別手法	6 2
3. 4. 4 魚種識別実験結果	6 5
3. 5 まとめ	6 8
 第4章 結 論	 6 9
 謝 辞	 7 1
 参考文献	 7 2

第 1 章 緒 論

1. 1 研究背景

海洋は地球の全表面の約 72% を占め、生物資源や鉱物資源の宝庫であると共に、潮流、波力などの膨大なエネルギーを包蔵し、大いなる可能性を秘めた存在である。最近、グローバルに拡大した人間の活動により、地球温暖化、オゾン層の破壊、異常気象による砂漠化やエルニーニョ現象など極めて重大な地球環境問題が生じ世界的な関心を集めている[1-2]。地球環境に大きな関わりを有する海洋の状況を把握する海洋調査の重要性が認識され、全世界を網羅する国際的な海洋調査が始まっている[3-5]。

海洋調査は地球の構造とその変化を把握し、気象・地震の予測をしたり、鉱物資源の開発、あるいは水産資源の生態調査等非常に多岐にわたっている。しかし、海中は人間が自由に活動できない、感覚能力が低下する、光や電波は使用できない等地上や宇宙より厳しい環境である。更に、海中を知るための困難さは、海洋の広さと深さに代表され、両者を全てカバーするような技術や道具は今の所ない。その為多くの技術が補完しあう必要があり、海中を直接的に探査、調査、観測するために、多種多様な潜水機が研究開発されてきた[6-13]。

一方、わが国の水産業を取り巻く現状は、資源状況の悪化、魚価の低迷、外国産水産物との競合激化、就業者の減少と高齢化、若年層の漁業離れなど一層厳しさを加えており、水産・漁業生産活動の停滞を招いている[14-15]。さらに、近年の異常気象による赤潮の発生や環境汚染等もそれに追い打ちをかけている。21世紀を担う生産体制を確立するためには、地球環境と調和した科学的な資源評価とその合理的な利用を可能とする新技術、生産コストの低減を可能とする自動機械化技術の開発導入が求められている[16-17]。これまでは漁場開拓、漁獲能力の向上など拡大策で生き延びてきたが、これからは資源管理型、作り育てる漁業が指向されるべきである。その支援策として水産における自動化、ロボット化が必要となり、

様々な研究開発が精力的に推進されている[18-19]。ロボット化により漁業環境計測や資源計測の自動化、資源管理の容易化・正確化が実現し、厳しい労働環境の改善も図ることができる。将来展望としては、CCDカメラ、計量魚群探知機、画像処理装置を搭載し魚種識別が可能な自律型潜水機の実現が期待されている[20-21]。

以上のように、海洋の観測や調査のための潜水機はなくてはならない機械であり、有人式と無人式とに分類できる。無人式潜水機は母船と索(テザーケーブル)で接続し、遠隔操縦によって使用する有索式無人潜水機ROV(Remotely Operated Vehicle)とケーブルを使用しない無索式無人潜水機UUS(Unmanned Untethered Submersibles)がある[22]。

有人式潜水機の問題点としては、乗員の生命維持機能が必要であることから、多大な運用コスト、及び機体の大型化があげられる。

有索式無人潜水機の問題点としては、ケーブルにつながれているために母船にケーブル巻き取り機などの船上設備、さらに、揚収や運用に多くの人手が必要となる点に加え、狭隘な場所、複雑な構造物のある場所ではケーブルが海中で絡まる危険性もあり使用海域が制限される点が挙げられる。

無索式無人潜水機の利点としては、船上設備が不要、かつ、乗員に対する配慮を必要としないので、コンパクト、かつ、安価にできることが挙げられる。

最近では、無索無人潜水機の研究開発が盛んに行われ、機能を向上してエネルギーを自分で持って自立しているばかりでなく、搭載したセンサにより周囲状況を認識・判断して航行する自律型海中ロボット AUV(Autonomous Underwater Vehicle)が試作され、世界中の海洋関係者の関心を集めている[23-29]。しかしながら、自律型海中ロボットは実用化する上で多くの課題を有している。それらの課題を列挙すると以下の4点に集約される。

- 1) 自律型海中ロボットは索を持たないことにより、自由に泳げる反面、搭載されているエネルギー源に依存するので長く移動できない。
- 2) 周囲やロボット内の環境を十分に判別するセンサ類が必要であり、組み込まれている制御ソフトウェアにより行動が決定されるため、信頼

性の高い制御システムが要求される。

- 3) 海中での事故対策として、エネルギー源が切れた場合、自動的に浮上する等の機能が必要となる。
- 4) 従来の自律型海中ロボットは複数個のスラスタを装備して、前後、上下、左右方向に推力を発生させて、3次元の操縦運動を行っているために複数個のスラスタの占める重量やエネルギー消費量が大きくなる。

運用現場からは少人数で、手軽に使用できるような軽量、コンパクトな自律型海中ロボットの開発が強く要望されている[30]。ところが、自律型海中ロボットは Table.1 の通りに重く、大型である。より広い海域での探査や複雑かつ狭隘な場所での点検・調査等には運動性能の優れた小型の自律型海中ロボットが望ましいため、現在研究途上にあるが小型化の方式、動力源や情報の通信手段など解決すべき課題が山積している。

Table.1 Developed Autonomous Underwater Vehicle

Robot Name	Organization	Length(m)	Weight(Kg)	Design Depth(m)	Construction
ABE	WHOI	3,050	544	6,000	1994
ARCS	ISE	5,200	1,360	300	1984
MUST	M.Marietta	9,000	8,800	600	1988
PTEROA150	Tokyo Univ.	1,500	220	2,000	1990
R-one Robot	Tokyo Univ.	8,270	4,000	400	1995
Twin-Burger2	Tokyo Univ.	1,540	118	50	1994
Waterbird	FEL	2,700	1,050	100	1989
AE1000	KDD	2,300	500	1,000	1992
AE2	KDD	3,000	260	500	1997

具体的に、長崎県大村湾の日常的な海洋調査に自律型海中ロボットを使用することを想定すると、備えるべき機能として以下のものが挙げられる。

- 1) 軽量、コンパクトな機体で自由な潜航能力
- 2) 支援母船との信頼性の高い通信制御機能
- 3) 海中環境計測機能やソナーによる海底地形調査機能

- 4) 支援母船から海中ロボットまでの方位と距離を計測する測位システム
- 5) 海中で取り込まれた画像を母船に伝送するカラー画像伝送システム
- 6) 表・中層の魚群を精密調査するために必要な魚種識別システム

本論文では、上記1)、2)に述べた機能を実現するための推進機、制御装置及び海中ロボットを製作し、実験を通してその有効性の評価を行った。さらに、6)に述べたシステムを実現するための基礎的研究を行った。

1. 2 関連する研究

本論文で研究対象とした自律型海中ロボット、および海中ロボットのための画像認識・魚種識別に関連したこれまでの研究について以下に述べる。

[1] 自律型海中ロボット

近年、地球規模の環境保全に伴う海洋観測から海底資源の探査や漁業資源の調査に至るまで海洋に関する関心が高まっている。ミッション内容や使用深度等により多種多様な海中ロボットが使い分けられてきたが、最近では、特に自律型海中ロボットの必要性がクローズアップされている。

東京大学の浦らは様々なタイプの無索無人潜水機の研究を行っており、1990年、日本初の実用機をめざして無索式の PTEROA150 を開発し、一定深度で約 40 分間航行させた[31]。また、推進器を搭載しないグライダー型で海面と海底面とを重心移動により航行し、海水温度を計測する ALBAC を開発した[32-33]。更に、構造物の点検や海底地図の作成など多目的用の試験機として Twin-Burger-1 及び 2 を開発し、水槽実験及び琵琶湖での航走実験を行った[34-38]。本機は外部環境を把握する感覚機能、得られた情報を判断する思考機能、及び運動作業機能の 3 要素を実現するために、14 個のトランスピュータを用いて分散制御システムを構成した。搭載した多数の I/O をリアルタイムに制御するために、2 個の階層的ソフトウェア構成としたが、ロボットのミッション内容に対しては過剰なプロセッサ数及びソフトウェア構成であり、保守性、システムの拡張性に欠けたものとなってい

る。また、三井造船との共同研究で、人が近づけない海底火山等の長時間探査をミッションとした、実用機 R-one を開発し実海域で実験中である[39-41]。閉鎖式ディーゼルエンジンを搭載しているため重量が4トンもあるが、実海域において約4時間連続航行し、塩分、pH、水温などの環境計測を行った[42]。

東海大学の加藤と KDD 海洋研究グループは、海底ケーブルに沿って潜航し、その状況を磁気センサで調査する実験機 AQUA EXPLORER1000 及び、その実績に基づき機能を絞った実用機 AQUA EXPLORER2 を開発した[43-49]。制御システムには計測制御専用 OS を使用し、前後スラスト2基により、1ノットの速度で5時間程度の航行が可能であるが、母船上には支援用の UNIX マシンが必要など重厚なシステム構成となっている。[50-51]。

ウッズホール海洋研究所(WHOI:Woods Hole Oceanographic Institute)では海底熱水噴出地帯の調査用に ABE を開発し、水深 2,400m での観測を行った[52]。ニューハンプシャー大学海洋システム研究所では、船体が5本の圧力容器から構成され、SBL(Short Base-Line System)測位システムにより海洋構造物の中を航行できる EAVE III を開発した[53]。Bellingham らは分散制御を志向した Brooks の Subsumption 理論を取り込んだ Odyssey II を開発し、これまでに実海域での試験を行っている[54]。E.A.Barros らも海中ロボットの制御システムに協調型分散システムを適用して、その有効性を示した[55]。

以上の自律型海中ロボットのほとんどは柔軟な動きをするために多くの推進器を搭載した結果、制御機構及びエネルギー源も増加し、数百kg から数トンの重量となった。

海中ロボットを小型化、コンパクト化するためには、推進器の数を減らすことが一方法であり、その有力な候補として、全方向推力推進器(可変ベクトル推進器：VARIVEC Propeller)を使用することが考えられる。この推進器は翼角を回転角に合わせて周期的に変化させることにより、1個の推進器で3次元の移動を可能にするものである。しかし、可変ベクトル推進器に関する研究開発例は少なく、例えば、G.M.Stenovec らはタンデムプロペラシステムとして、2個の可変ベクトル推進器を用いた軍事用潜水機の開発

を行い、多様なモードの動作が可能であることを示した[56]。通産省の海中極限作業ロボットの開発プロジェクトとして三菱重工業の永松らは、4トン程度の無索式無人潜水機用 VARIVEC プロペラを開発し、水槽試験による単独特性の把握や揚力面理論によりほぼ妥当な特性の推定が可能であることの確認をした[57-60]。シミュレーション実験により、1個の VARIVEC プロペラでも3次元の操縦運動が可能であることを報告した[61]。

川崎重工業の渡辺らも同じプロジェクトで、潮流に左右されにくい安定した効率を得られる VARIVEC プロペラを独自に開発し、海中ロボットに3基搭載した場合の推力配分制御システムについて報告した[62-63]。これらの例はほとんどが可変ピッチ機構に油圧方式を使用するなど、大型機用の例であり、これらの方式に小型部品を適用してコンパクト化できるものではなかった。

[2] 画像認識・魚種識別

これまでの水産資源調査は、魚群探知機に代表されるように、水中音響による方法に頼ってきた。しかし、魚群や体長組成が複雑な場合、魚種毎、体長毎の資源量を求めるのは極めて難しいのが現状である。そこで、魚群への接近が可能な海中ロボットに高感度の CCD カメラと画像処理装置を搭載し、表・中層の魚群の精密調査や魚種判別を直接的に行うことで、水産資源の詳細調査が可能となる。

一般に、人間が魚を識別する場合、非常に複雑で個体差のない鱗の紋様や色、鰭の形や位置、各部の色などを用いている。しかし、こうした微妙な識別ノウハウを直接的にコンピュータに処理させることは行われていなかった。

これまで魚種識別に関する研究は以前より取り組まれており、魚の体長や周囲長、面積などの物理量から各種の比を計算し、魚種毎の統計的なデータと比較・照合することにより判別し、約85%程度の識別率を上げている[64-65]。また、魚の背面、側面、底面部の特定部位の色彩情報及びテクスチャ解析により魚種を識別した例では、それを DSP を用いて高速化し、

1秒間に約4尾を約90%の識別率で処理した[66-70]。更に、光学センサとパターン計測の組み合わせにより、魚の輪郭画像から体長、体高、頭部広がり角などの物理量を計算し、統計的データと照合する方法で種類と大きさを選別する方式も提案された[71-73]。以上の例は、いずれも魚市場での荷揚げ後の魚種選別用の効率化を図るためのものであるが、現場に利用できる精度を持たず実用化には至っていない。

近年、肺ガンや乳ガン等の早期発見のためにCT画像からのガン候補領域の粗決定[74-78]、MRI画像からの脳軟部抽出[79]、文字・濃淡画像の領域分割[80-81]等に数学モルフォロジによる前処理や特徴抽出が適用され注目を集めている。この手法は対象画像の部分形状を処理用の構造要素(モルフォロジカルフィルタ)としてそのまま採用することができる特徴があり、魚の鱗の紋様や色を使った魚種選別へ適用できることが期待できる。しかし、フィルタの形状やサイズに強く依存するため、使用するフィルタの表現方法によって処理時間に大きな影響を及ぼす。特に、フィルタサイズを大きくすると処理時間が極端に増加する。そこで、処理時間を短縮するために、大きなフィルタをより小さなフィルタに分割して繰り返し演算を行うなどの改良が提案されているが十分ではなく[82-83]、マルチプロセッサを用いた並列分散処理が有効な手法の一つであると考えられ、専用のハードウェアの試作例もある[84-85]。

本研究では、これまで試みられたことのない魚の斑紋を特徴とした魚種識別に、モルフォロジ演算を適用する研究に取り組み、その可能性について検討を行った。さらに、その魚種識別手法を実用的なものにする上で不可欠なモルフォロジ演算の高速化について検討した。

1.3 本研究の目的

本研究は最近の海洋環境計測や水産資源の調査に関する様々な社会的背景を考慮して、超音波の指令により遠隔制御ができる、小型、軽量、コンパクトな可変ベクトル推進器を用いた自律型海中ロボットシステムを実現

し、実験を通してその有効性を評価することを目的としている。更に、海中ロボットを実海域で運用する場合に必要な諸機能のうち、特に、表・中層における魚群の精密調査用として、魚の斑紋に注目した魚種識別の基礎的研究を目的とした。

[1] 自律型海中ロボットの実現とその評価を目的として以下の取り組みを行う。

- ①従来の自律型海中ロボットは海中での自在な運動を実現するために多くの推進器を搭載し、重量やエネルギー源も増加したため、長時間のミッションが不可能であった。このような問題点を解決するために、推進器の数を削減することに着目し、推進器1個で3次元の自在な航行ができる小型可変ベクトル推進器を試作する。
- ②従来から研究開発されてきた自律型海中ロボットが大型であり、それを運用するには専用の支援母船が必要であった。これを改善するために、小型、コンパクトな海中ロボット本体を実現し、運動性能を評価する。
- ③可変ベクトル推進器を制御する電子回路にFPGA(Field Programmable Gate Array)を用いることで、制御装置の小型化、高速化、及び信頼性の向上を図る。
- ④海中ロボットの制御システムを機能別にモジュール化し、信頼性の向上や開発時に生ずる多くの変更や拡張に柔軟に対応できる分散制御システムを構築する。
- ⑤支援母船と海中ロボット間の情報伝送が安定してできるように、信頼性の高い水中情報伝送モジュールを設計・製作し、効果的な伝送方式について検討する。
- ⑥コンパクトな可変ベクトル推進器を搭載した海中ロボットの位置や姿勢を実海域で保持・制御するために必要な基本的流体力を計測・評価する。
- ⑦可変ベクトル推進器を搭載した小型の自律型海中ロボットシステムを構築して、水中超音波の指令による自由航走実験を水槽で行い、本方式の有効性を評価する。

[2] 魚種識別の基礎的研究を目的として以下の取り組みを行う。

- ① 数学モルフォロジ理論を応用して、魚種毎に異なる斑紋や鱗の形状から、各々の特徴を抽出したり、ノイズ除去等の前処理を行い、魚種識別の可能性、有効性を検討する。
- ② 処理時間の高速化のために、並列処理を適用してその効果を検討する。
- ③ 使用するプロセッサ数とモルフォロジカルフィルタの寸法を変化させた場合の高速化率と処理効率及び画像データの伝送時間から並列画像処理の有効性を評価する。
- ④ 真鯛、マアジおよび真鯖を具体的な識別対象として、特徴抽出やノイズ除去のためのモルフォロジカルフィルタを設計する。種類毎の魚種識別プログラムを開発し、実際に魚を用いた実験を行ってその有効性を評価する。

1. 4 本論文の構成

本論文は4章から構成されている。以下に各章の概要を示す。

第2章では、まず、日常的に利用することのできる軽量、コンパクトな自律型海中ロボットの必要性とその実現手法について述べる。コンパクト化を図るためには、推進器1個で従来の無索無人潜水機や自律型海中ロボットと同様の自在な運動を可能にする可変ベクトル推進器を使用することが有効な一方法であることを示す。信頼性の高いラジコンヘリコプタ用機構部品と超小型DCサーボモータを組み合わせ、コンパクトな可変ベクトル推進器が実現できることを示し、その動作原理についても述べる。さらに、可変ベクトル推進器を制御するDCサーボモータのパルス幅変調方式と新たに設計製作したFPGA回路について述べる。海中ロボットの制御システムは信頼性、拡張性の高いものが要求されるので、4個の機能モジュールにより構成される分散制御系の構築方法について示す。次に、海中ロボットと支援母船間での安定した水中情報伝送機能を実現するために工

夫した回路構成について述べる。無響水槽と実海域での伝送実験結果及び航行用各種センサの試験結果を示す。無響水槽で行った水中超音波の指令に基づく海中ロボットの自由航走実験結果を示し、本方式の有効性を明らかにする。次に、海中ロボットを海流のある実海域で運用する場合にはロボット本体の基本的流体力を把握しておく必要があるため、回流水槽で行った斜航試験とプロペラ試験の結果を示し、操縦性能を明らかにする。

第3章では将来、海中ロボットに搭載されることが期待されている水産資源の精密調査に利用可能な魚種識別システムについて述べる。まず、認識手法として使用した数学モルフォロジの原理と適用する方法について述べ、次に、モルフォロジ演算は時間がかかるため、その解決策の一つとして作成した並列画像認識アルゴリズムについて述べる。MIMD型並列処理システムにおいて、プロセッサを増やした場合のモルフォロジ画像演算の台数効果や処理効率について明らかにし、並列処理手法の有効性を示す。次に、真鯛、マアジ、真鯖の体側面の斑点や縞模様あるいは鱗の形状に着目したモルフォロジカルフィルタの設計及び魚種識別アルゴリズムについて述べる。実際の魚を用いた識別実験結果より本方式の有効性を明らかにする。

第4章では全体の結論について述べる。

第2章 コンパクトな自律型海中ロボット

2.1 はじめに

近年の地球温暖化や異常気象などに密接な関わりを有する海洋の観測、海底資源の探査等から身近な海域の環境調査に至るまで、用途に応じて様々な海中ロボットが研究開発されてきた[6-13]。最近では搭載したセンサにより周囲の状況を認識・判断して航行することのできる自律型海中ロボットの開発が強く求められている。従来の自律型海中ロボットは、自在な運動を実現するために、多くのスラスタを搭載したために、制御機構及びエネルギー源も大きくなって、大型化、重量化され、簡便に使用できるものではなかった[23-29]。

本研究では長崎県大村湾等など水質の悪化が著しい閉鎖性海域の海洋環境計測や規模の大きい栽培漁場における魚貝類の生育状況や行動生態の精密調査等に使用目的を限定し、日常的に、少人数で利用できるコンパクトな自律型海中ロボットシステムの開発を目指している。それを実現するために、大型化の原因であった推進器の数を減らすことに着目し、可変ベクトル推進器の使用が有効な一方法であると考えた。しかし、これまでの可変ベクトル推進器は油圧式で大型の例しかないため[56-63]、まず、高信頼かつ小型のラジコンヘリコプタ用可変翼機構を使用することにより、コンパクトな可変ベクトル推進機構を実現した。更に、これを搭載した極めて軽量、コンパクトな自律型海中ロボットシステムの試作を行った[91-94]。

本章では、まず、今回試作した軽量、コンパクトな海中ロボット本体、超音波を用いた水中情報伝送系を含む分散制御システムの内容について述べる。可変ベクトル推進器の動作原理と小型化を実現した機構及び FPGA 素子を使用したサーボモータ制御回路について述べる。次に、評価実験として行った水中情報伝送試験、航行用センサ試験、及び、無響水槽で行った水中超音波を用いた指令信号による自由航走実験結果について検討する。更に、実海域で運用する場合に必要な海中ロボットの基本的運動性能を把握するために行った斜航試験および推進器試験結果について検討する。

2. 2 海中ロボットのシステム構成

2. 2. 1 システム概要

試作した無索式海中ロボットは海中の画像を得られるように、前面には透明の亚克力製ドームを取り付けた円筒太胴型とした。海中ロボットの寸法は搭載する機器類から全長は865mm、直径350mmとし、空中重量は75.5Kgになった。後部には4枚の可変翼から構成した可変ベクトル推進器を1個取り付けた。試作した海中ロボットの外観写真を Photo.2.1 に示す。また、ロボット本体の主要諸元と可変ベクトル推進器の仕様を Table.2.1 に示す。

海中ロボットと母船間は水中超音波による通信リンクを構成し、ミッション指令や動作モードの伝送が双方向で可能となるように送受波器を取り付けた。基本的には超音波の指令信号により、中立状態（その場停止）、前進、後進、左右のその場回頭、左右の旋回、潜航、及び、浮上の9種類の運動制御を行うことができる。更に、障害物を回避して自律航行ができるように、センサ類には方位計、2軸傾斜計、3軸磁気力計及び温度計を一体化した電子コンパス(Precision Navigation Inc 製 TCM2-50) と深度センサ(Druck 製 PDCR-930)、及び2チャンネル衝突防止センサ(SGK 製)を搭載した。

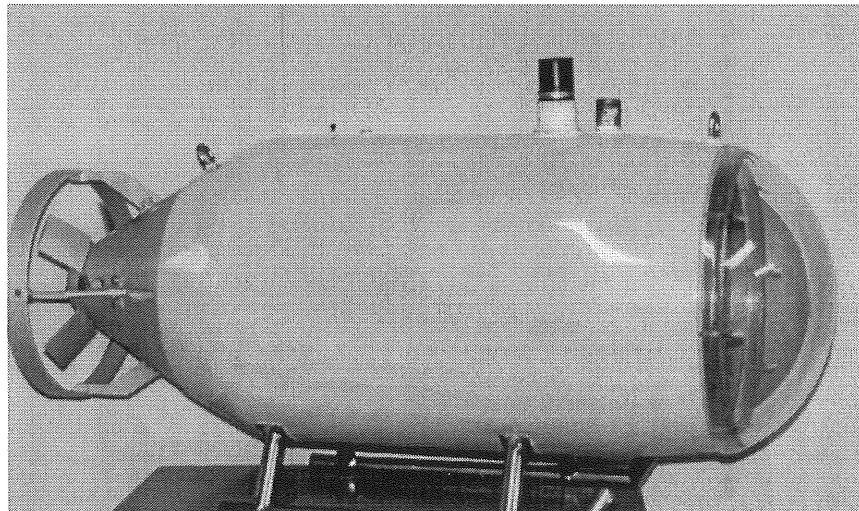


Photo.2.1 Overview of autonomous underwater vehicle

Table.2.1 Dimensions and principal particulars of underwater vehicle

Underwater Vehicle		Variable Vector Propeller	
Length	865(mm)	Diameter	210(mm)
Breadth	350(mm)	Propeller Expanded Area Ratio	0.293
Depth	520(mm)	Boss Ratio	0.476
Dry weight	75.5(Kg)	Rake Angle	0(degree)
Operation depth	50(m)	Blade Number	4
Body material	FRP	Maximum Number of Revolution	370 (rpm)

2. 2. 2 分散制御システム

海中ロボットの制御システム構築に当たっては、最新の超高速マイクロプロセッサは、大きい消費電力と密閉した環境下での発熱によるCPU停止などの危険性があることを考慮して、小型化、省エネルギー化を図るため、Z-80互換機のワンチップマイクロコンピュータTMPZ84C015を4個使用した。海中ロボットシステム全体の機能を検討した結果、以下の4つのモジュールに分散化を行い、各モジュール間はRS-232Cによりネットワークを構成した。分散制御方式を採用することにより、開発中に発生するシステム変更への柔軟性、拡張性が図れるばかりでなく、モジュール間の互換性を持たせることにより保守性が良く、あるモジュールの機能が停止した場合にはフェールセーフに機能するように信頼性の向上を図ることが可能である。将来、海中ロボットを実海域で航行させるために必要となる、現在開発中のロボットの測位システム SBL(Short Base-Line System)を含めた自律型海中ロボットシステム構成図を Fig.2.1 に示す。以下に各モジュールの機能について説明する。

(1) 母船からの指令信号を出力する送信制御モジュール

母船上のパーソナルコンピュータからRS-232C経由で受信した海中ロボット用のミッション指令信号を送信するためのモジュールである。超音波伝送では通信の信頼性を向上させるために通信速度は75bpsを使用し、伝送時間を短くするために、ASCIIコード1文字を前進、後進、浮上等の

9種類の動作に対応させた。さらに、海中での超音波を用いた情報伝送はマルチパスや海中雑音あるいは母船の動揺によるドップラシフト等の影響を受けやすいためFSK(Frequency Shift Keying)変調した信号を用いた。また、海象の急激な変化等による伝送品質の低下を防止するためには、ハード的な工夫のみでは限界があるので、同じ信号を5回送信し、受信側では3回以上同じ信号と認識した場合にのみ指令通りの動作をするようにソフト的な多数決方式も施した。制御フローチャートを Fig.2.2 に示し、使用した送受信器を Photo.2.2 に示す。

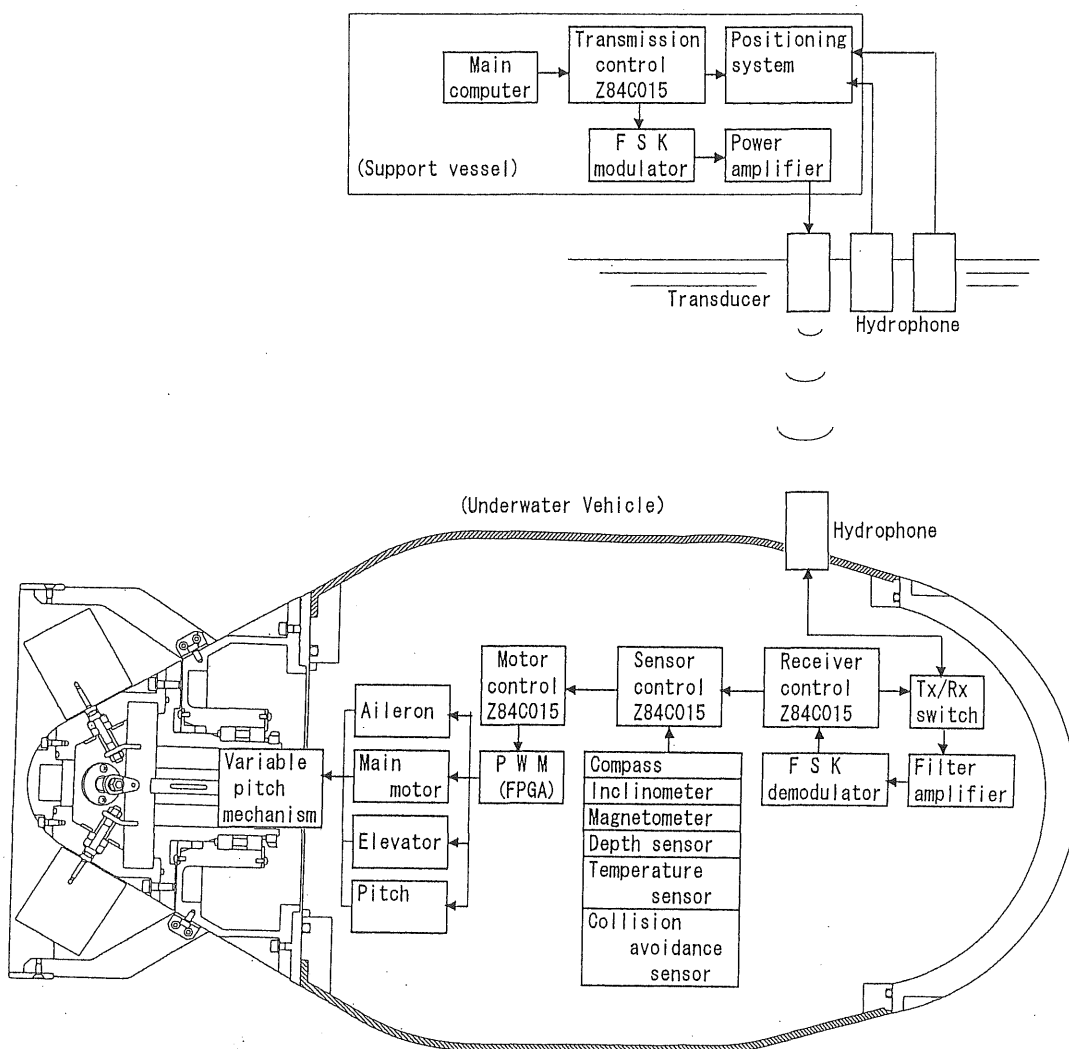


Fig.2.1 System configuration of autonomous underwater vehicle

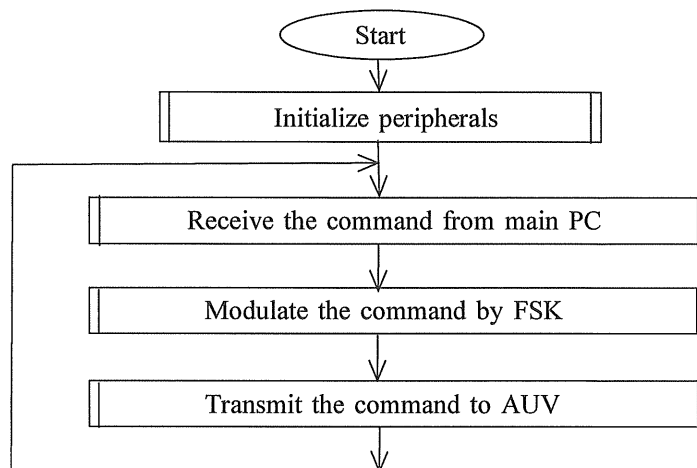


Fig. 2.2 Flowchart of transmission control module

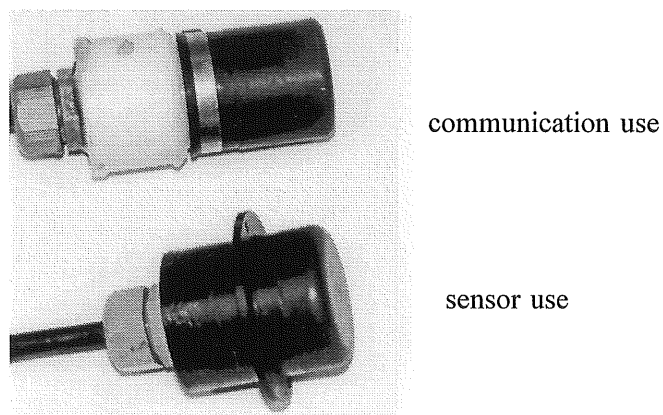


Photo. 2.2 Hydrophone

(2) 指令信号を入力し、判断する受信制御モジュール

海中ロボット内で5回受信した超音波信号を復調後、多数決によりミッション内容を識別し、次のセンサ制御モジュールに情報伝送するモジュールである。受信制御モジュールのフローチャートを Fig.2.3 に示す。

(3) センサ情報を収集し、識別するセンサ制御モジュール

自律航法用の電子コンパス、障害物検出センサ及び深度センサからデータを収集、環境を識別するモジュールである。電子コンパスにアクセスして、方位角と2軸傾斜角（ピッチ角とロール角）、3軸磁気力（X軸，Y

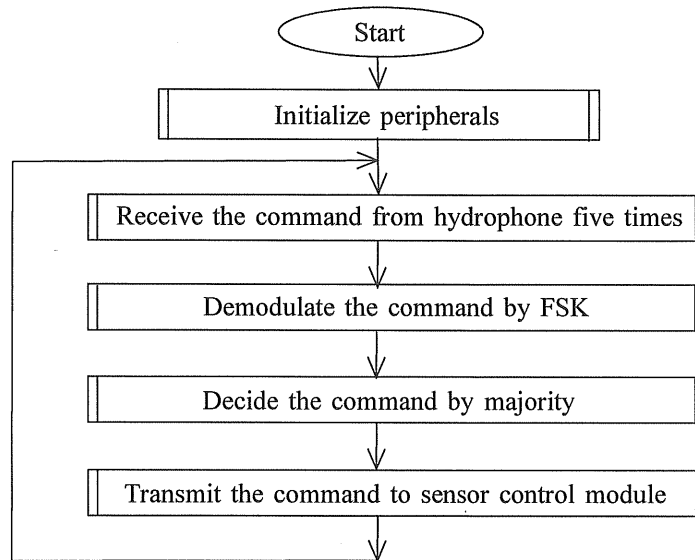
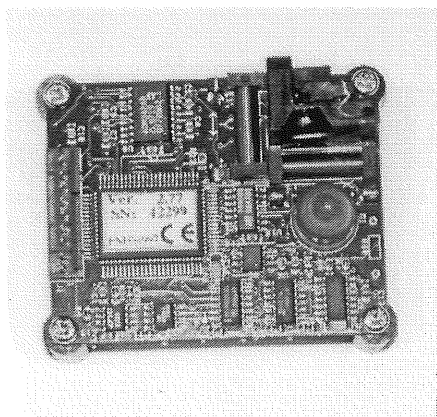
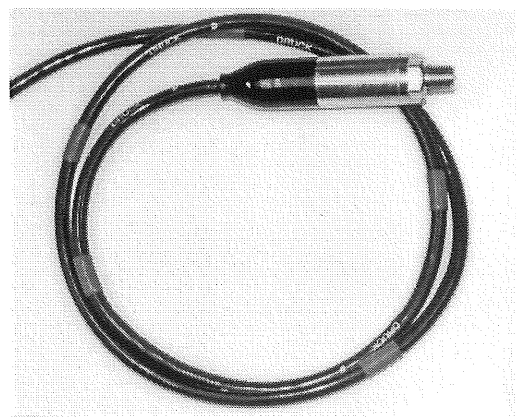


Fig. 2.3 Flowchart of receiving control module

軸、Z軸)及び温度をRS-232C経由で収集した。深度センサはA/Dコンバータ経由でデータを入力し、障害物検出センサは Fig.2.4 に示したフローチャートにより障害物との距離を5cmの分解能で計測した。受信制御モジュールからのミッション指令信号と各センサ毎に予め設定した安全基準と比較した結果を統合して、最終的な運動制御内容を決定して、可変ベクトル推進器のモータ制御モジュールに伝送する。センサ制御モジュールのフローチャートを Fig.2.5 に示し、センサの写真を Photo.2.3 に示す。



(1) Electronic compass(TCM2-50)



(2) Depth sensor (PCDR930)

Photo. 2.3 Sensors

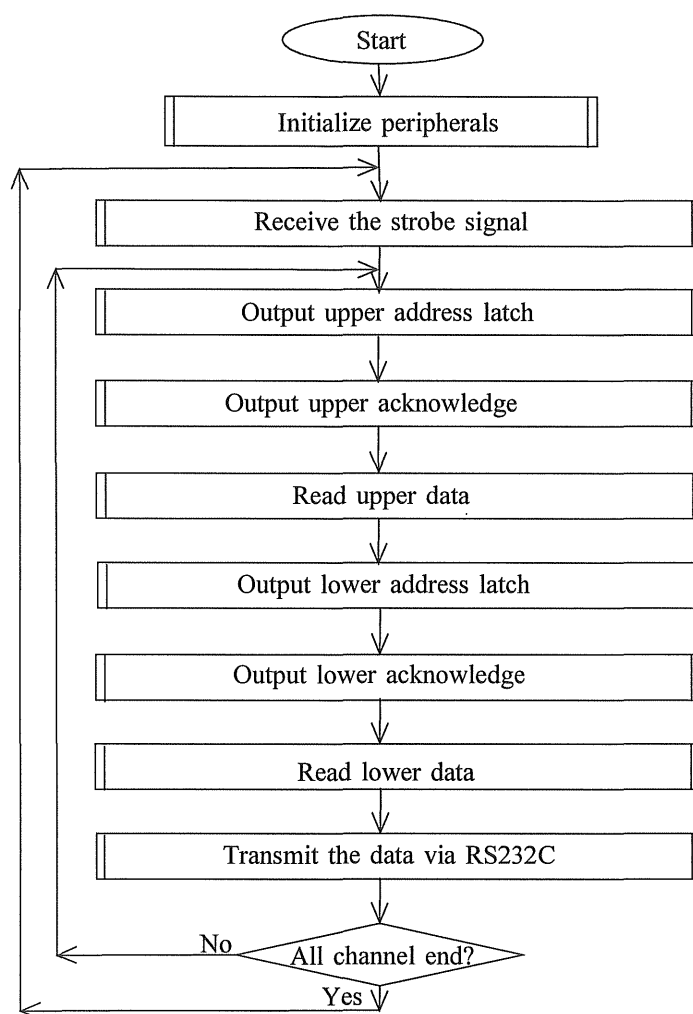


Fig. 2.4 Flowchart of collision avoidance sensor

(4) 可変ベクトル推進器を制御するモータ制御モジュール

センサ制御モジュールから受信したミッション指令信号に従って、可変ベクトル推進器を駆動するモジュールである。可変ベクトル推進器の4枚の可変翼はラジコンヘリコプタ用の回転翼制御用スワッシュプレートに超小型のDCサーボモータを3個取り付け、それを回転に従って制御することにより自在な運動を実現している。さらに、推進器全体を回転する主駆動モータ用DCサーボモータを含めた4個を同時に制御する必要がある。フローチャートを Fig.2.6 に示す。

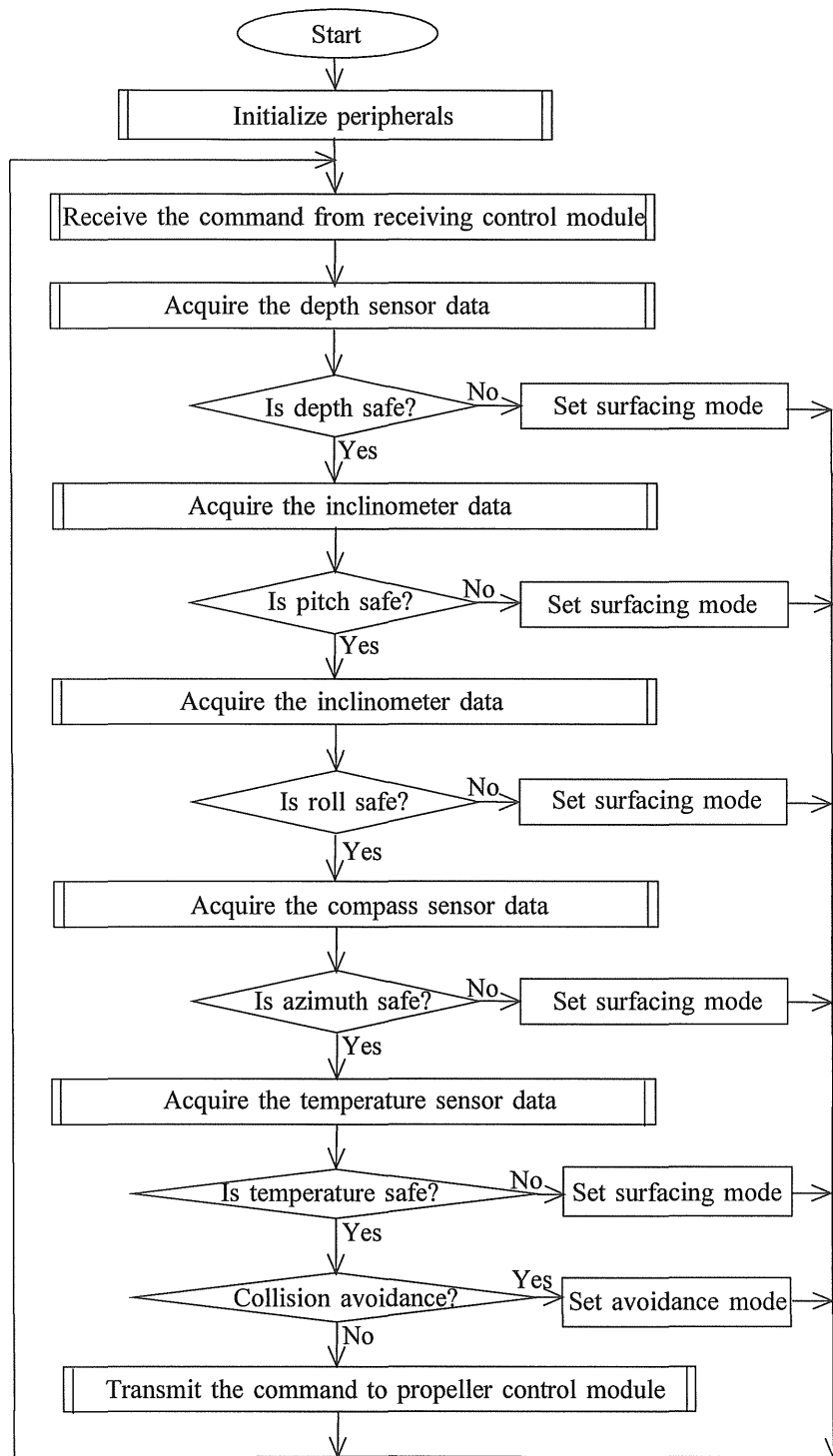


Fig. 2.5 Flowchart of sensor control module

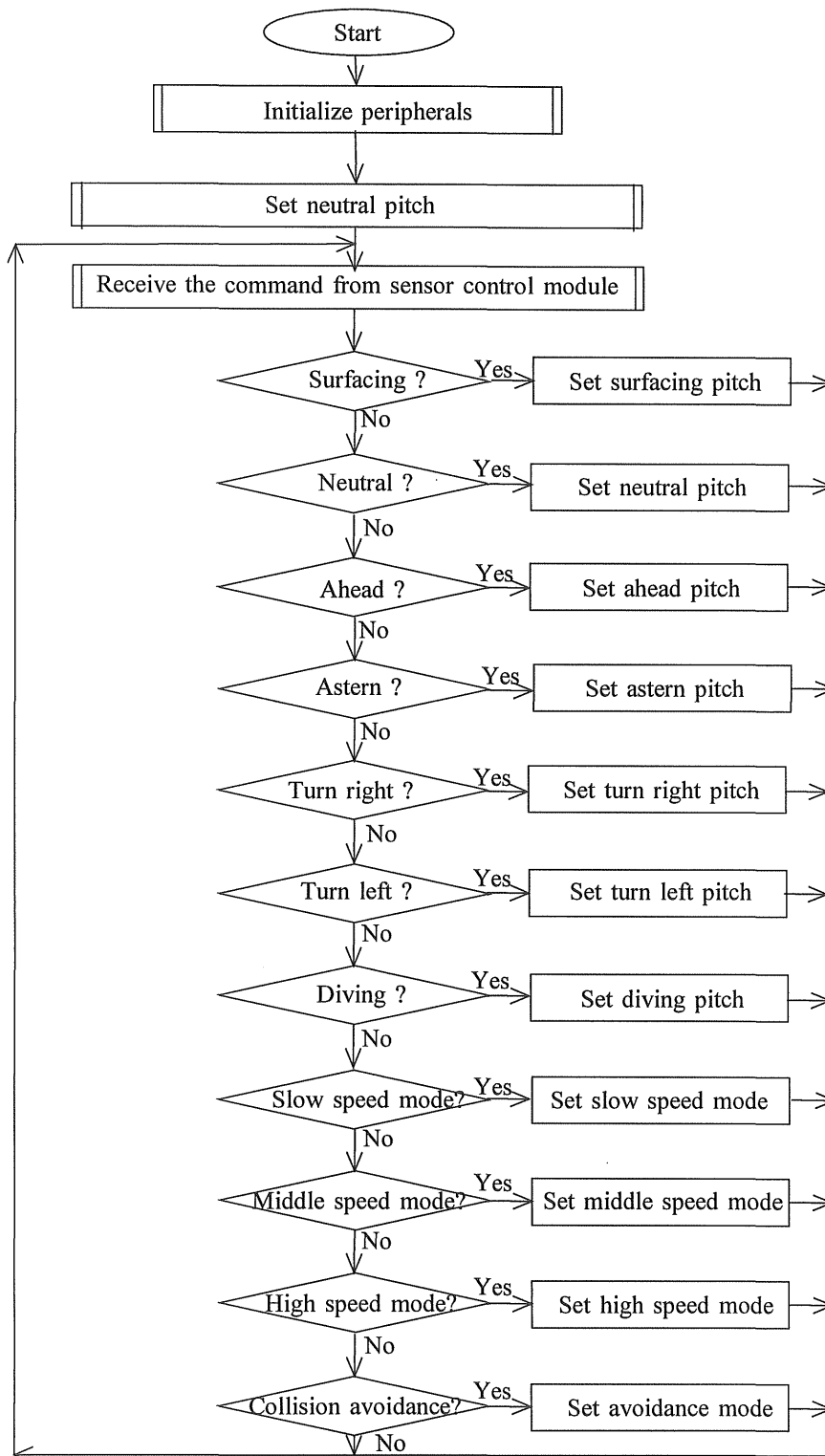


Fig. 2.6 Flowchart of motor control module

2. 2. 3 水中情報伝送モジュール

自律型海中ロボットでは、超音波を用いた母船からのミッション指令を受信したり、ロボット側の現在の動作状況を母船に送信するための、双方向情報伝送機能は極めて重要な要素であり、信頼性の高いものが要求される。本研究では、送信制御モジュール及び受信制御モジュールが母船上や海中ロボット内で安定的な信号処理ができるように、マイクロプロセッサを組み込んで製作し、ハード、ソフト両面から工夫を施した。

(1) 母船側の送信制御

本モジュールは双方向の通信モードと測位システム用のトランスポンダモードの2種類がある。基本的な使い方は、トランスポンダモードで母船と海中ロボットとの大体の距離と方位を確認した後、通信モードに切り替えてミッション指令を送信する。機能ブロック図をFig. 2.7に示す。送信時はホストパソコンからの指令信号をFSK変調し、送信ユニットを経由して、送波器から送信する。FSK方式であるため、デジタル信号"1"に相当する $f("1")$ には48.5KHz、デジタル信号"0"に相当する $f("0")$ には41.5KHzを、トランスポンダ用 $f(\text{TRP})$ には45.0KHzを割り当てた。

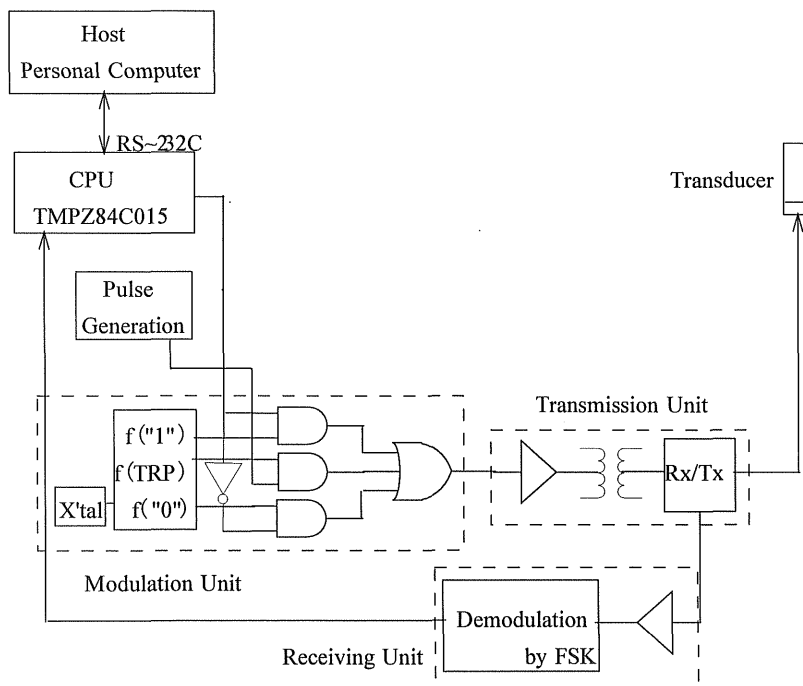


Fig.2.7 Block diagram of communication module (Mother ship)

(2)海中ロボット側の受信制御

機能ブロック図を Fig.2.8 に示す。受信時は受波器から入力した信号が受信ユニットを経由して、FSK 復調部でデジタル信号に変換し、続いて CPU に取り込んで指令信号を識別する。デジタル信号“1”に相当する $f("1")$ には58.5KHz、デジタル信号の“0”に相当する $f("0")$ には51.5KHzを、トランスポンダ用 $f(\text{TRP})$ には55.0KHzを割り当てた。

海中ロボットは移動しながら信号を受信する場合、入力レベルが大きく変動したり、使用している周波数の直近周波数がノイズ成分として入力されるので、周波数弁別が安定するような FSK 復調回路を設計・製作した。機能ブロック図を Fig.2.9 に示す。動作はリミッタアンプで入力波の振幅を制限し、広帯域フィルタで周波数帯域を制限して冗長な信号をカットする。次に、狭帯域フィルタでは FSK 波の“1”に対応する信号(s)を通過させる。一方、有効な信号以外を通す Twin-T フィルタを用いて、信号検出用リファレンス信号(V_{ref})を生成する。両信号を比較器に入れて、ノイズや他の周波数の影響を押さえた“1”に対応した“f1”を出力する。同様に、FSK 波の“0”に対応した“f2”を出力し、それをマイコン回路において指令信号と識別する。製作したモジュールを Photo2.4 に示す。

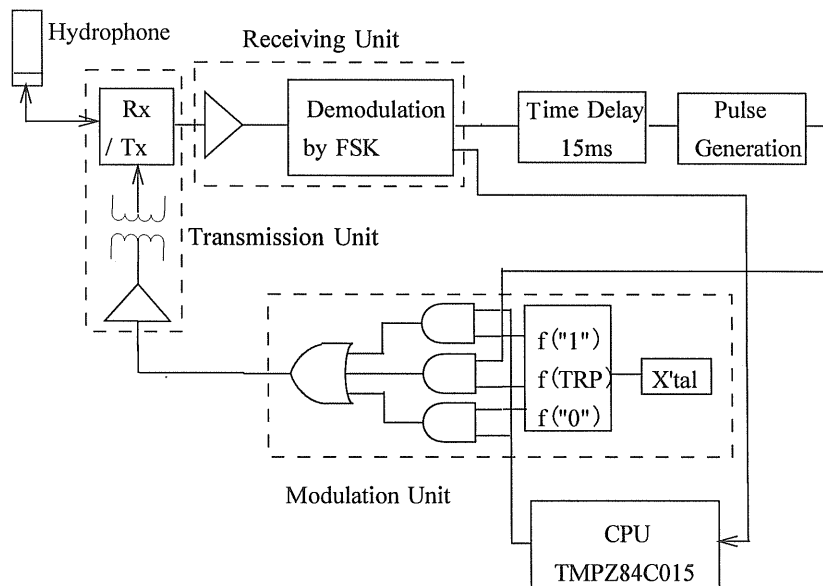


Fig.2.8 Block diagram of communication module(Underwater vehicle)

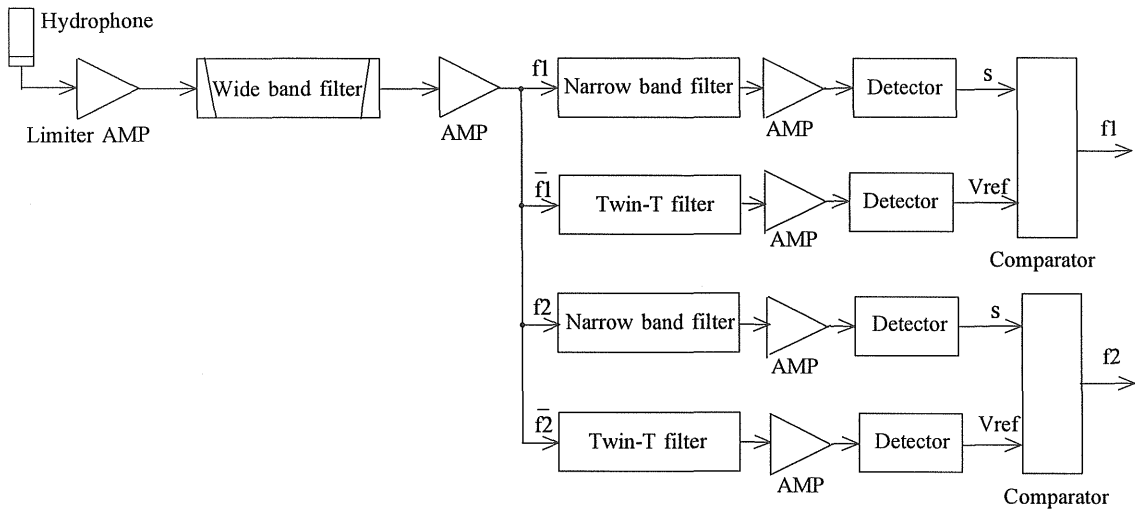


Fig.2.9 Block diagram of FSK demodulation circuit

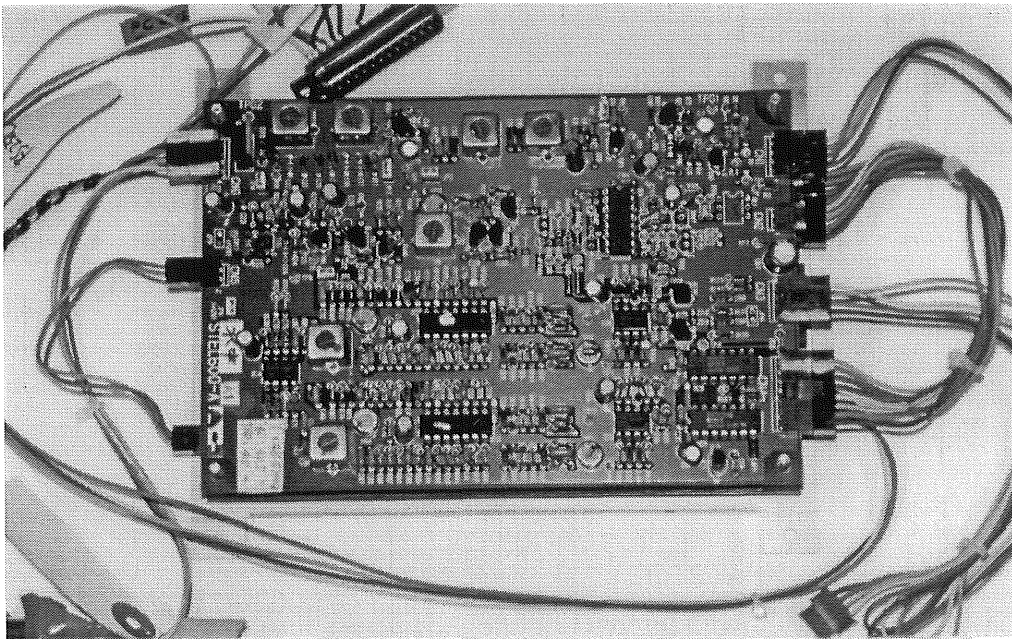


Photo 2.4 Underwater communication module

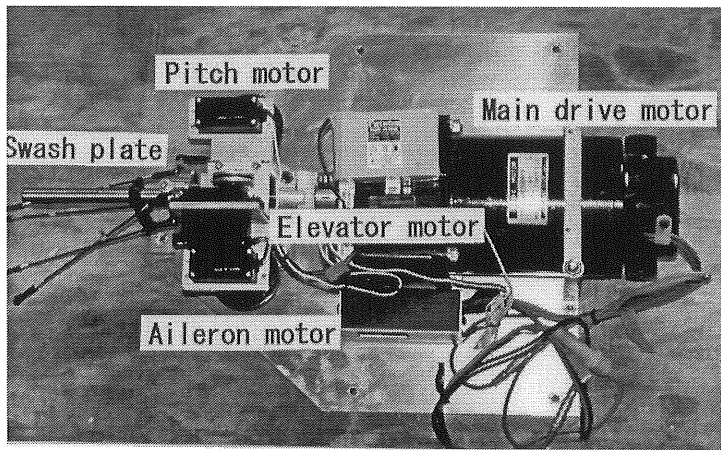
2. 3 可変ベクトル推進器

2. 3. 1 可変ベクトル推進器の構成と原理

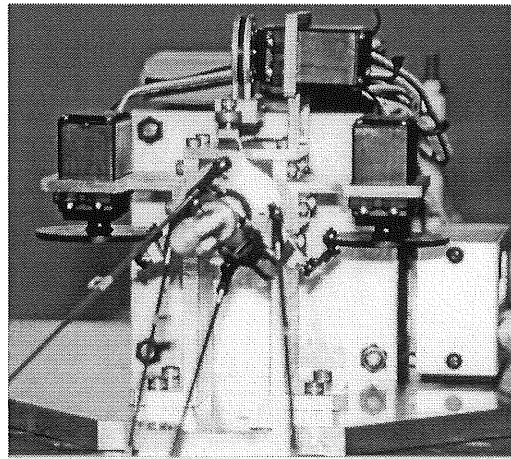
可変ベクトル推進器は、可変ピッチプロペラと同じように前後方向に推力を発生させるコレクティブピッチモードと、フォイトシュナイダープロペラのように横方向に推力を発生させるサイクリックピッチモードの両モードを持っている。本研究では可変ベクトル推進器を小型に製作するために、ラジコンヘリコプタの翼角制御用に使用されているスワッシュプレート（回転斜版）とラジコン用超小型DCサーボモータを用いた。後方スワッシュプレートはピッチ変節レバーに連結され、プロペラとともに回転する。一方、前方スワッシュプレートは3自由度の動きを与える3個（エルロン動作、エレベータ動作、ピッチ動作）のDCサーボモータと120度の間隔で連結し、回転を止められている。更に、スワッシュプレートと4枚の可変翼間も連結棒で各々固定した。更に、推進器全体を駆動するメイン用DCサーボモータには、日本サーボ製 DM100/125(50W)を使用した。試作した可変ベクトル推進器の制御機構及び可変翼部を Photo2.5 に示す。

可変ベクトル推進器のピッチ可変機構の動作原理図を Fig.2.10 に示す。可変ベクトル推進器の動作は、以下の4つの基本モードから構成される。

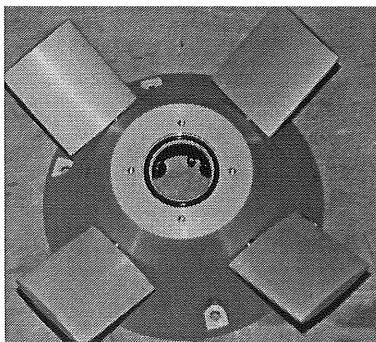
- (1)スワッシュプレートが中立状態(Neutral Pitch)の位置にある場合には、推力はゼロとなる。
- (2)スワッシュプレートが前後方向に移動(Collective Pitch)した場合には、すべての翼を一様に変節して推進軸の前後方向に推力を発生させる。
- (3)中立状態を基準点として、それを中心に上下、左右移動してスワッシュプレートに傾斜をつけた場合(Cyclic Pitch)、1回転を1サイクルとした変節を行い、プロペラシャフトと直角方向に推力を発生する。
- (4)コレクティブピッチとサイクリックピッチを組み合わせることにより、任意の方向への推力を発生させることが可能となる。



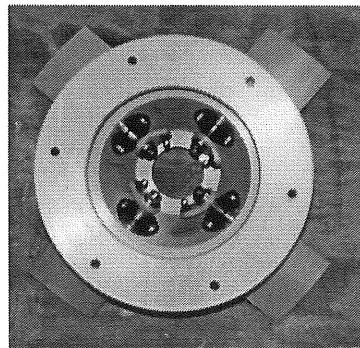
(Top View)



(Front View)



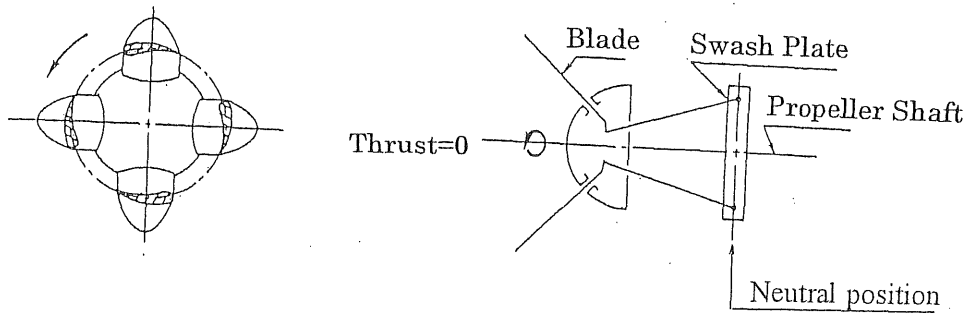
(Surface of Blade)



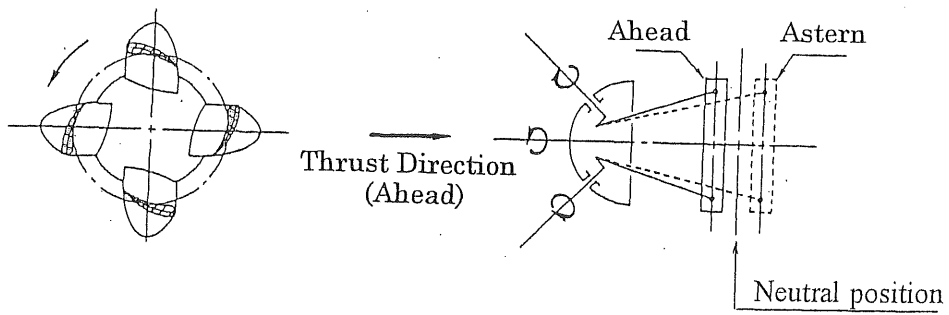
(Back of Blade)

Photo 2.5 Variable vector propeller control unit

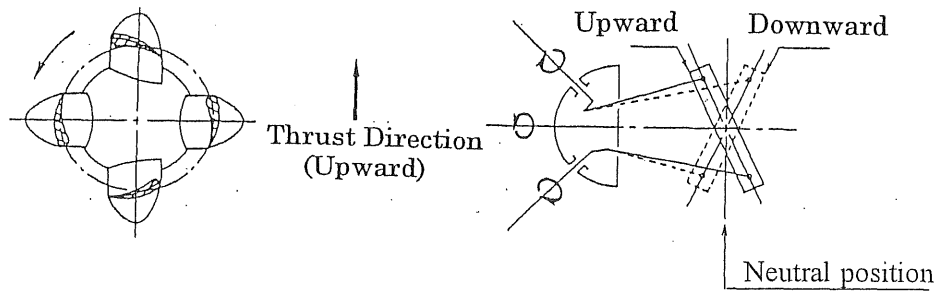
(1) Neutral Pitch



(2) Collective Pitch



(3) Cyclic Pitch



(4) Collective Pitch + Cyclic Pitch

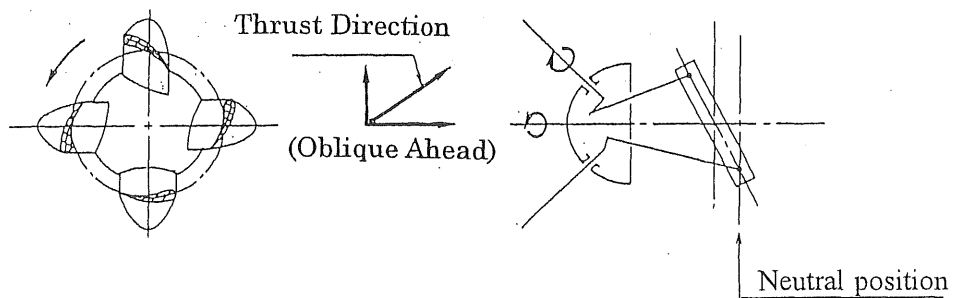


Fig.2.10 Principle of variable vector propeller

2. 3. 2 可変ベクトル推進器の制御方式

可変ベクトル推進器のスワッシュプレートを自在に動作させるためのサーボモータには、ラジコン用の超小型DCサーボモータ（双葉電子工業製S9203）が軽量(53g)、小型、高トルク(5.5Kg-cm)、高動作スピード(0.11sec/60°)であり、信頼性も高いために使用した。DCサーボモータの回転角度を制御するには約14.52ms周期のパルス信号が必要で、そのパルス幅をFig. 2.11に示すように変化させることにより行う。主駆動モータの回転数の制御も同様の方式であり、幅が狭くなると高速に、広がると低速となる。CPUからのデータにより4チャンネルのDCサーボモータ制御用パルス信号を作る電子回路には、小型、高速、高信頼化が図れるように、FPGA素子を用いて Fig.2.12 のように設計製作した。FPGA 素子からのDCサーボモータ制御用PWM波形例を Fig.2.13 に示す。外観写真を Photo.2.6 に示す。

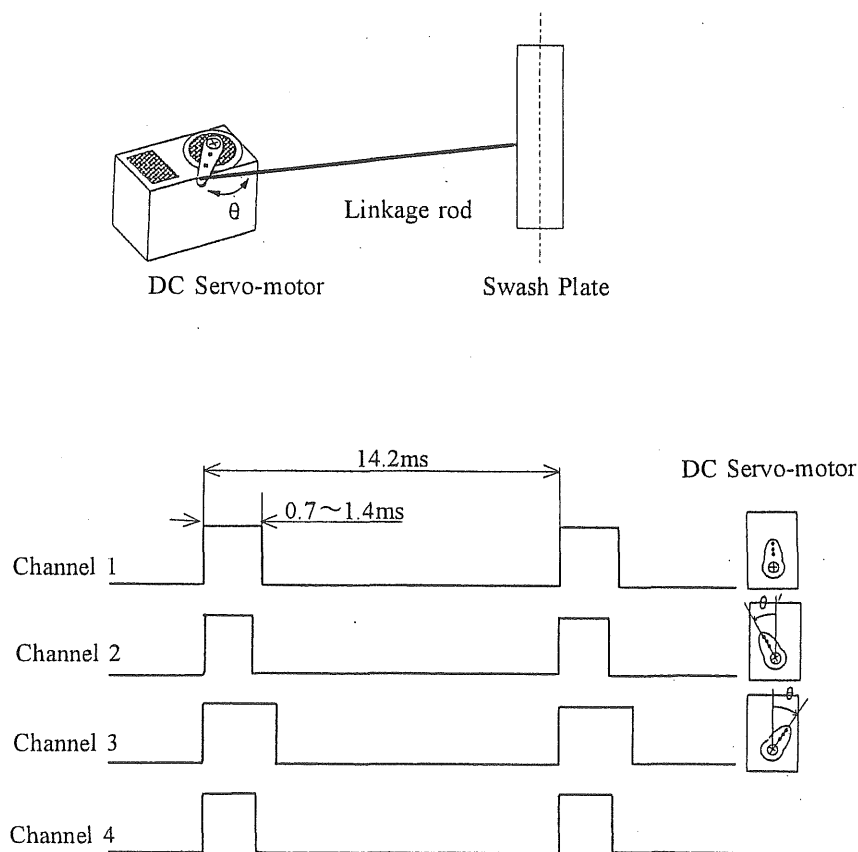


Fig.2.11 Control method of DC servo motor

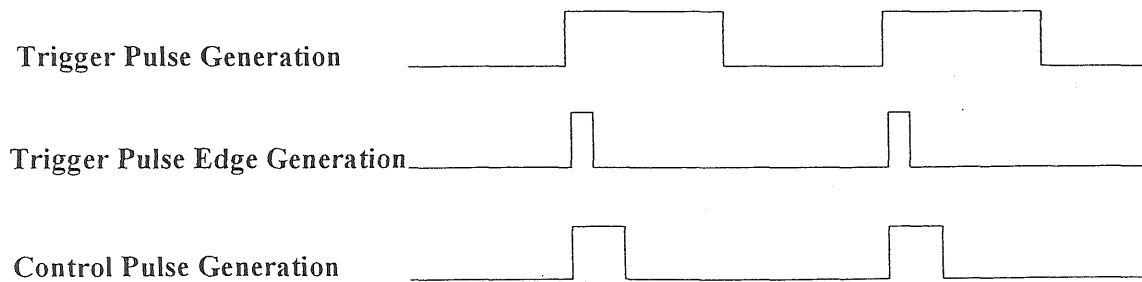
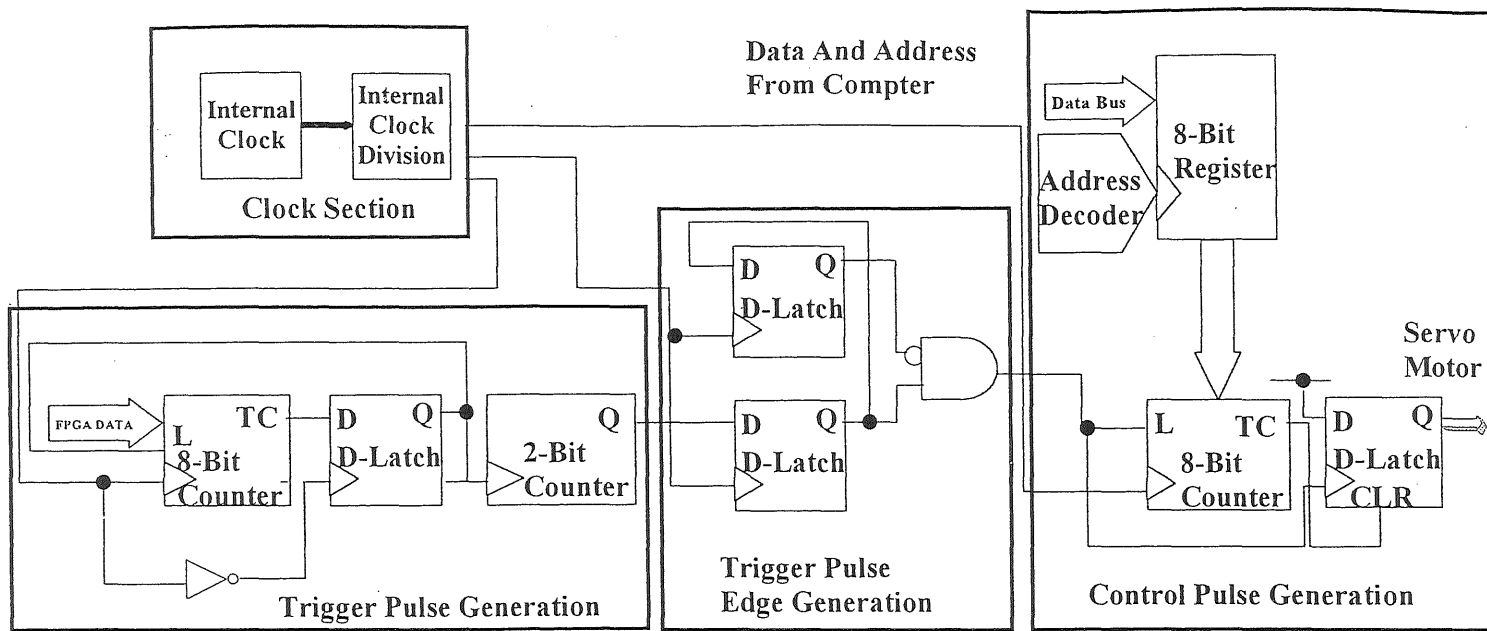
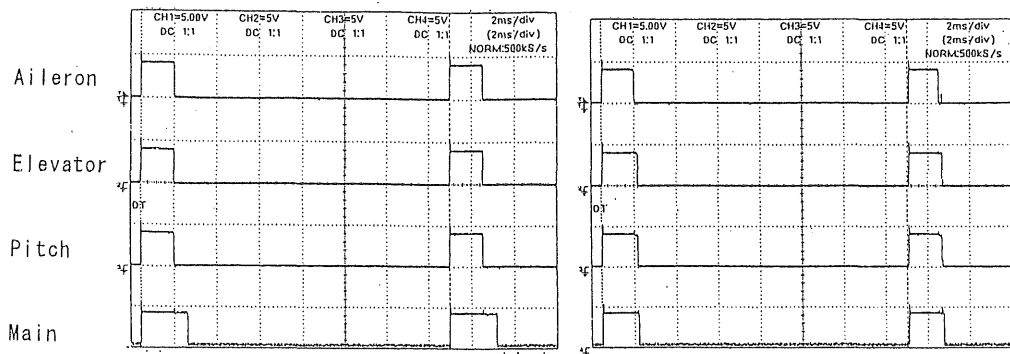
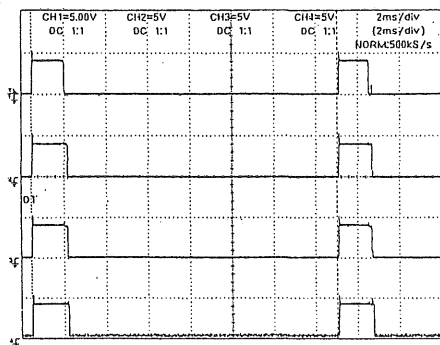


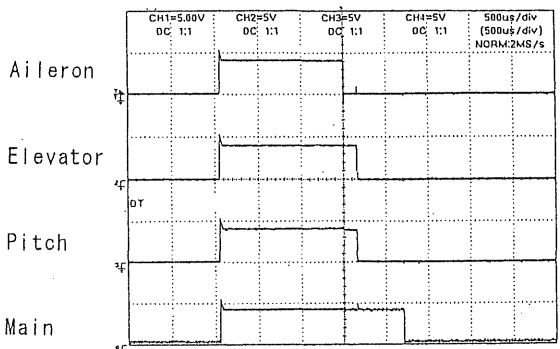
Fig.2.12 Block diagram of FPGA Circuit



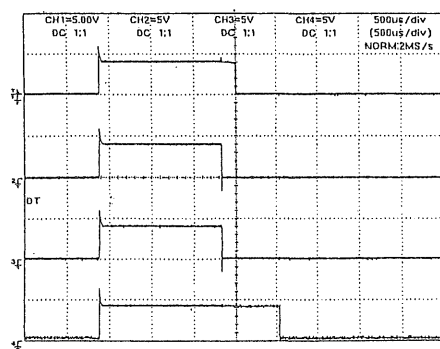
(a) Neutral



(b) Ahead



(b) Ahead



(c) Astern

Fig.2.13 Examples of PWM signal

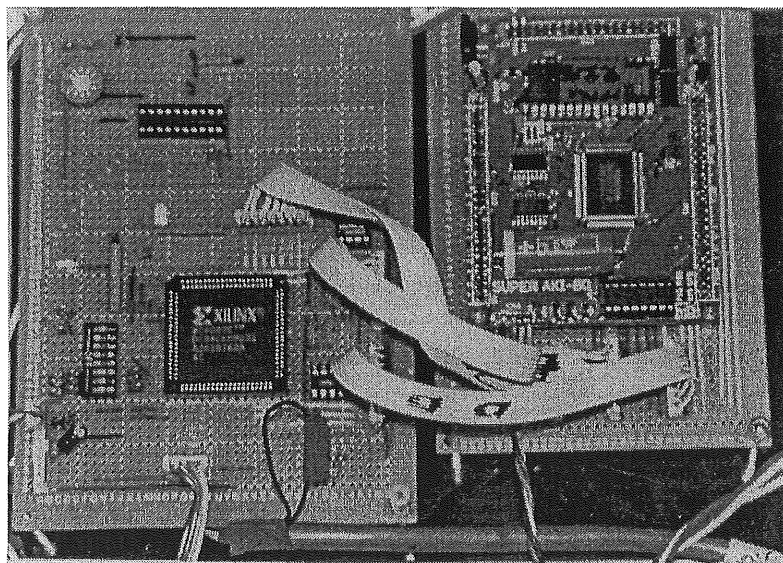


Photo.2.6 FPGA Circuit

2. 4 海中ロボットの水槽実験

2. 4. 1 水中情報伝送実験

海中ロボットと支援母船との間にはテザーケーブルはないので、海中ロボットへのミッション指令やロボットの動作状況をモニタするには、水中超音波を用いた信頼性の高い双方向の情報伝送装置が必要である。製作した水中情報伝送モジュール単体の性能評価を行うために、送信側および受信側にミッション指令の送・受信を行うパーソナルコンピュータを接続した。海中ロボットの9種類の運動内容に応じて割り当てたASCIIコード1語を200回送信し、受信したコードをディスプレイに表示し、送信した文字がどの程度正確に受信できたかを伝送率(Transmission Rate %)として計算した。ASCIIコードは数字と特殊記号を用い変調速度は75 bpsを使用した。実験は佐世保工業高等専門学校に設置されている大型無響水槽[10m(L)×5m(W)×4.2m(H)]及び水深約7mの佐世保湾で実験を行った。

大型無響水槽で送受波器間が約10mの場合は100%で伝送できた。実海域で数字の0から9までについて、送受波器間の距離を変えて伝送した結果をFig.2.14に示す。30mまでの伝送率は平均98%以上、50mでは平均約93%程度、200mでは、“0”や“2”の文字での伝送率がよくないために約91%であった。一方、特殊記号の“%”や“'”などは94%以上の伝送率であった。伝送率のよくないASCIIコードのビットデータ構成と海面や海底での反射信号の影響と考えられたため、同じコードを1秒間隔で5回送信し、受信側では3回以上同じ文字と認識した場合にのみ正しい情報と判断する多数決方式を使用した結果、ほぼ100%で伝送が可能になった。実海域でロボットの制御を行うには伝送率のよいコードを使用し、さらに多数決方式を併用することにより伝送率の改善が図れることがわかった。

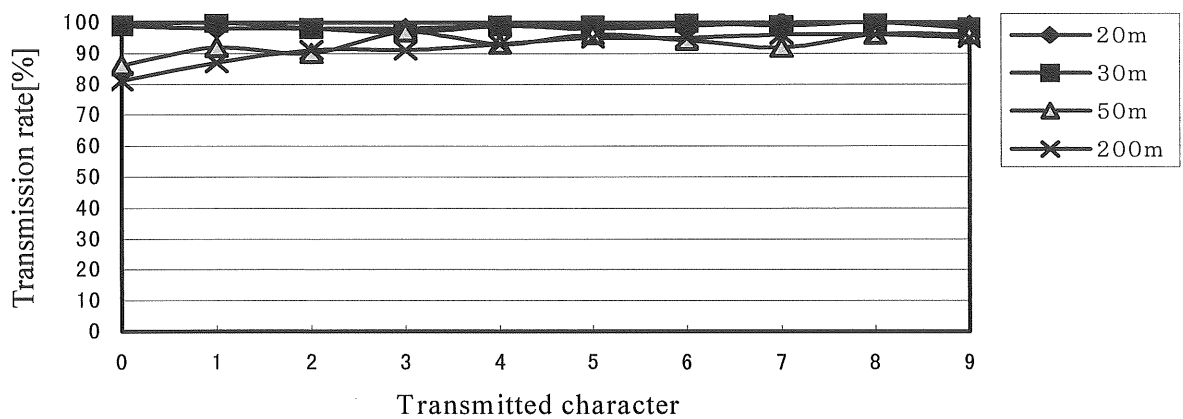


Fig.2.14 Results of underwater transmission test

2. 4. 2 センサ実験

海中ロボットに搭載した電子コンパス、深度センサ、衝突防止センサについての検定実験を行った。方位角、ピッチ角、ロール角を調節できる実験装置上に電子コンパスを固定し、電子コンパスの方位や傾斜を分度器により測定しながら、電子コンパスデータ収録用プログラムを作成して、データを収集した。

(1)方位角

方位角は0度から360度について計測を行った結果をFig.2.15に示す。最大で±2.2度の測定誤差があったが、直線性、再現性とも良好であった。

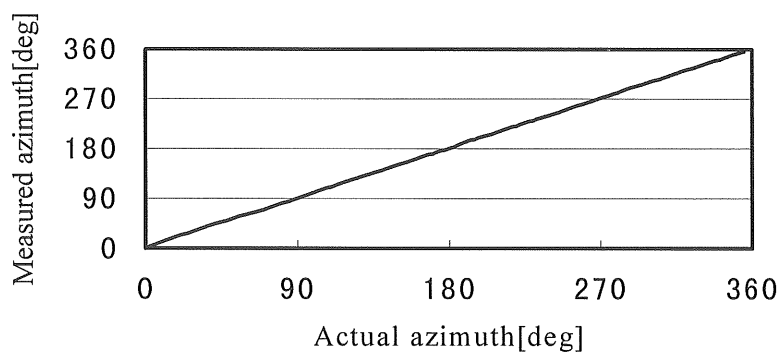


Fig.2.15 Calibration results of compass sensor

(2)傾斜角（ピッチ角、ロール角）

傾斜角も方位角と同様の装置で実験を行った結果をFig.2.16に示す。ピッチ角で最大±1.1度の測定誤差があったが、比較的直線性のよい結果が得られた。

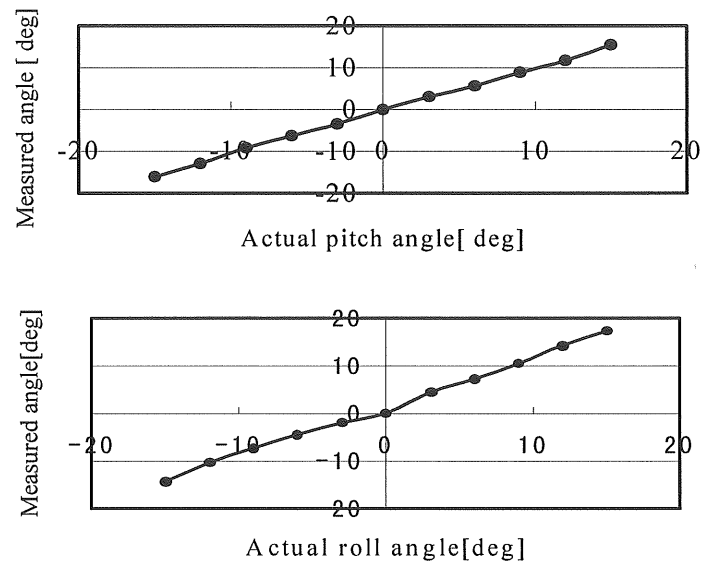


Fig.2.16 Calibration results of inclinometer

(3)深度センサ

深度センサに圧力計測装置(Druck製 DPI510)を用いて水深50mまでと同じ圧力を印加した場合の出力電圧をFig.2.17に示す。精度、再現性とも良好であった。

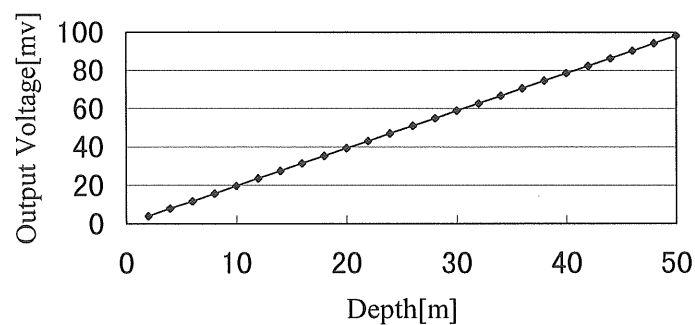


Fig.2.17 Calibration results of depth sensor

(4) 衝突防止センサ

水深 4 m までの距離を測定した結果を Fig.2.18 に示す。2 チャンネル共、分解能以下の誤差であり、直線性、再現性ともに良好であった。

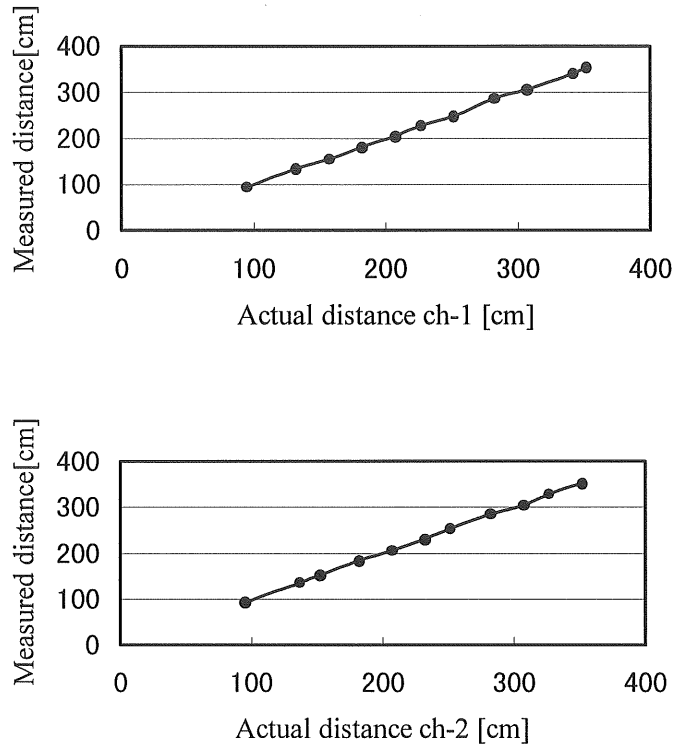


Fig.2.18 Calibration results of collision avoidance sensor

2. 4. 3 自由航走実験

無索式海中ロボットが超音波を用いた指令信号により、遠隔制御できることを確認するために大型無響水槽で実験を行った。水槽上部の電動台車に指令信号を送信するパーソナルコンピュータと送信制御モジュールを設置し、送波器は水深1.5mの位置に固定した。送信側から運動指令に対応したASCIIコードをFSK変調して間欠的に5回送信し、海中ロボットでは受信した信号を多数決処理し、3回以上同じ内容の信号と判断した場合のみ運動を開始するようなプログラムを用いた。伝送速度は75 bps、送信間のインターバルは水槽内の反射波を十分減衰させて影響を無くすために約1秒間取った。メインコンピュータから、推進器を低速モード(約0.14m/s)、中速モード(約0.2m/s)で航走するように指令し、中立状態、前進、後進、左・右のその場回頭、前進しながらの左・右の旋回について、指令通りの運動ができることを目視で確認すると同時に、電子コンパスによる方位と傾斜角のピッチ角及びロール角及び3軸磁気力を計測した。

(1) 超音波指令による基本運動制御

ミッション指令用パーソナルコンピュータから、前進、後進、右その場回頭、左その場回頭、前進しながらの右旋回、前進しながらの左旋回用の遠隔制御信号を送信し、それに基づいた運動を目視で確認できた。従って、可変ベクトル推進器のピッチ変節角度を決定するエルロン用、エレベータ用、ピッチ用の小型DCサーボモータの調整が良好であることがわかった。

(2) 連続的に右その場回頭動作時の、1回転中の方位計の出力結果を

Fig.2.19に示す。約150度付近を境に旋回速度にわずかな変化が観測された。その理由として、その場回頭時には推進器が1回転する間に可変翼がサイクリックに変節し、ごくわずかな後進の力が作用したためだと考えられる。回頭半径は短軸が約940mmから長軸が約1000mmの楕円を描いた。なお、前進動作を伴う旋回動作の場合はほぼ真円に近い軌跡を描いて旋回できることを目視で確認した。

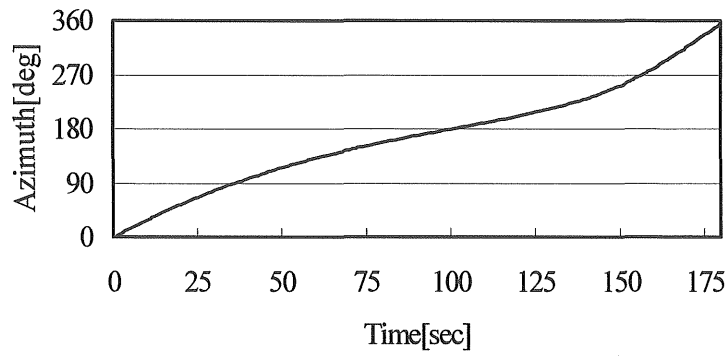


Fig.2.19 Results of Compass Data

(3)右その場回頭時のピッチ角とロール角の測定結果をFig.2.20に示す。ピッチ角及びロール角共に約0.2度傾斜した程度であり、航走が安定していることを示した。

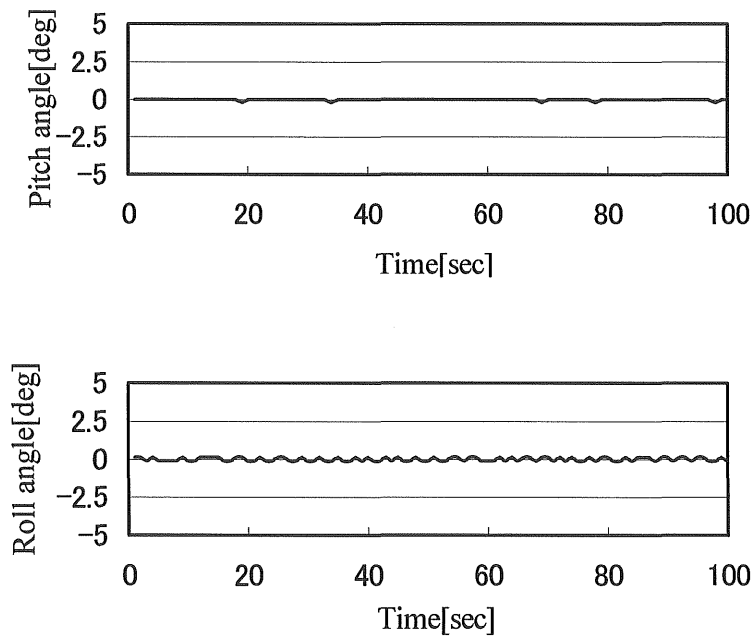


Fig.2.20 Experimental results of inclinometer

2. 4. 4 流体力実験

自由航走実験の目視検査の結果、基本的には可変ベクトル推進器の変節機構が十分に機能していることを確認したが、前進時に極わずかに左に片寄って航走する傾向があった。また、その場回頭時には楕円を描いて航走することが判明した。このような動作の原因として、可変ベクトル推進器のエロン用、エレベータ用、ピッチ用DCサーボモータを制御するソフトウェアに組み込んでいるデータのわずかな調整ずれが考えられた。それを確認することと、今後、海流のある実海域で運用する場合に、位置や姿勢を一定に保持・制御することが必要になるので、その検討用データを収集するために、回流水槽での基本的な流体力の計測実験を行った。

実験内容としては海中ロボットに作用する流体力を把握するための斜航実験と、推進器の制御力を調査するための推進器試験を行った。実験は2インペラー式縦型循環回流水槽（株式会社西日本流体技研に設置、観測部の長さ7m、幅1.5m、深さ1.2m）で行った。海中ロボットはFig.2.21に示す通り、水深350mmの位置に逆さまの状態でも円柱の支持棒を用いて3分力計に支持した。海中ロボット単体に働く流体力は、支持棒付きの海中ロボットに加わる流体力から支持棒だけに加わる流体力を差し引いて求めた。

(1) 斜航実験

まず、位置制御システムの基礎データ収集のためにロボット本体に作用する流体力の把握と、推進器と本体の干渉を確認する事を目的として斜航試験を行った。流速は0.15m/s一定とし、推進器を停止した場合と360rpmの回転数で駆動させた場合について行った。Fig.2.22に実験で使用した座標系の定義を示す。

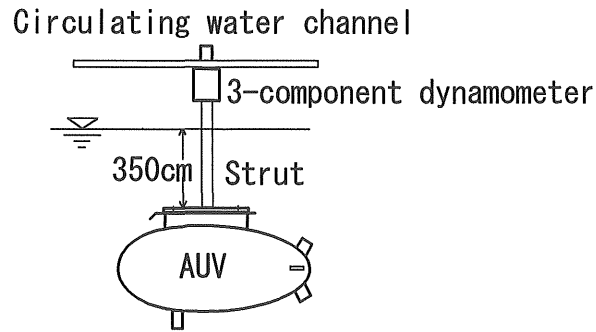


Fig.2.21 Experimental setup of oblique towing test

計測された3分力（抗力 F_x 、揚力 F_y 、モーメント M_z ）から、流速や船体の寸法などの影響を除去するために、次の無次元化式を用いて抗力係数 F_x' 、揚力係数 F_y' 、モーメント M_z' を計算した。ただし、 $\rho = 101.97$ 、 L =長さ、 B =幅、 U =流速とする。

① 抗力係数(Longitudinal force coefficient) : $F_x' = (F_x / 0.5 \rho L B U^2)$ (1)

② 揚力係数(Lateral force coefficient) : $F_y' = (F_y / 0.5 \rho L B U^2)$ (2)

③ モーメント(Moment) : $M_z' = (M_z / 0.5 \rho L^2 B U^2)$ (3)

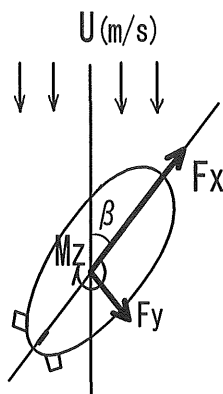
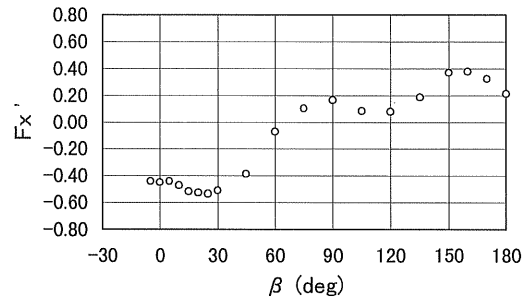


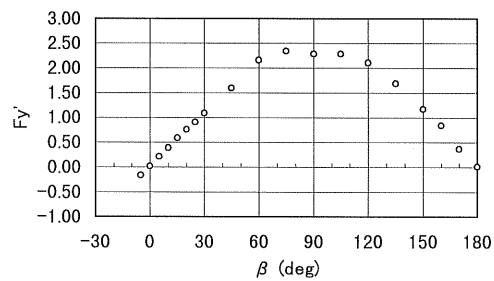
Fig.2.22 Definition of coordinate system for oblique towing test

① 推進器停止時：斜航角 β を変化させた場合の抗力係数 F_x' 、揚力係数 F_y' 、及びモーメント M_z' をFig.2.23に示す。抗力係数は β が約65度から正に転じてそれ以降も同じ傾向であった。揚力係数は全体的に比較的大きな値を示し、 β が70度から80度付近で最大となった。Z軸周りのモーメントは β が約60度付近で正の最大となり、約120度付近で負の最大値となったが、海中ロボッ

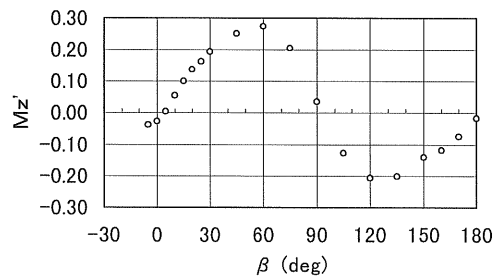
トの形状が円筒太胴型であり、前後方向の非対称性が強いために、正から負に転ずるのが90度より前にあることがわかった。以上の結果は、一般の船舶や海中ロボットと近似した傾向を示した。



(1) Longitudinal force coefficient (F_x')



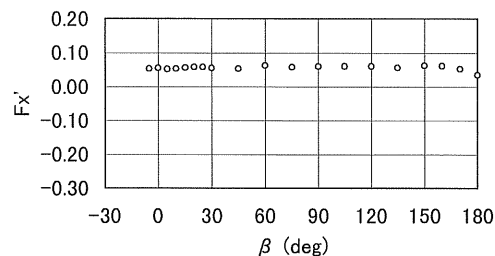
(2) Lateral force coefficient (F_y')



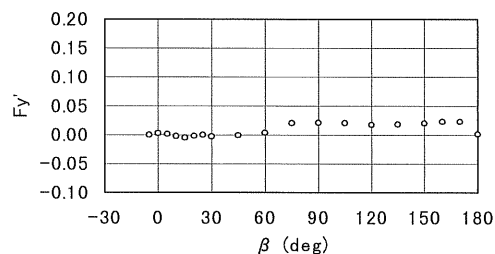
(3) Moment (M_z')

Fig.2.23 Experimental results of oblique towing test (Propeller stop)

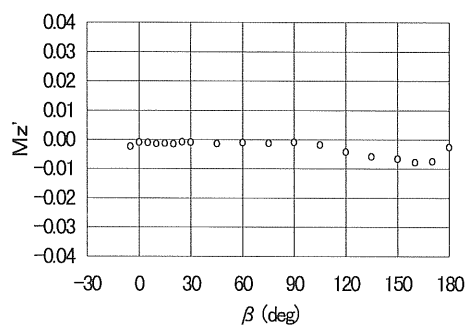
②前進制御時：360rpmで前進制御時の各係数の変化をFig.2.24に示す。抗力係数は β が180度付近でわずかに小さくなる程度でほとんど変化がなく、揚力係数も β が60度付近まではプロペラの影響はほとんどなかった。モーメントは β が120度から170度で負に大きくなっているが、プロペラ後流の影響で船体後部の抗力が大きくなったためだと考えられる。



(1) Longitudinal force coefficient (F_x')



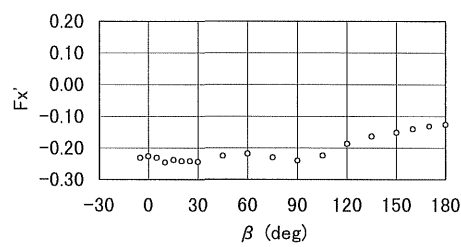
(2) Lateral force coefficient (F_y')



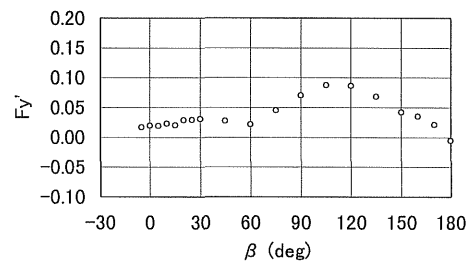
(3) Moment (M_z')

Fig.2.24 Experimental results of oblique towing test (Ahead control)

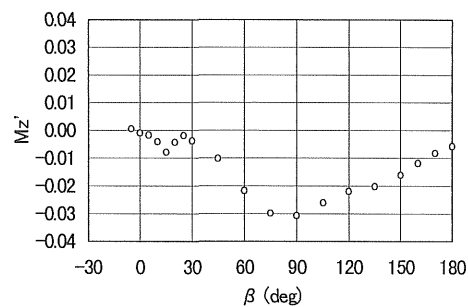
③後進制御時：360rpmで後進制御時の各係数の変化をFig.2.25に示す。抗力係数は β が90度までは推力のかかり方の変化は小さいが、90度から180度の間では、見かけ上推力が小さくなった。プロペラの後流で加速された流れが船体に当たり、抵抗が増すためだと考えられる。揚力係数は全体的にプロペラの影響で横力が大きくなり、 β が70度付近で顕著になったが、プロペラ後流が船体の下流側を加速したためだと考えられる。モーメントは β は90度付近を中心に船体後方に揚力が作用し、負に大きくなった。



(1) Longitudinal force coefficient (F_x')



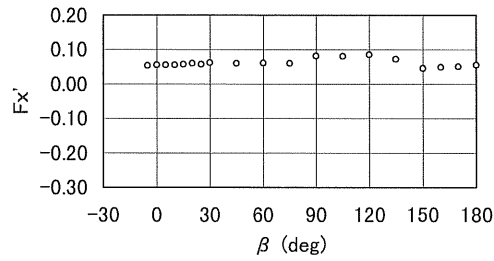
(2) Lateral force coefficient (F_y')



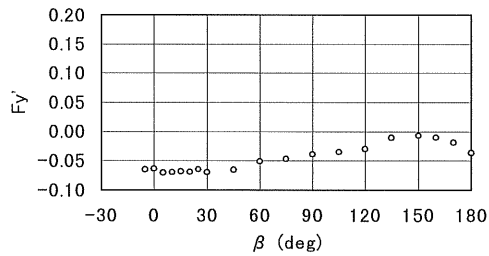
(3) Moment (M_z')

Fig.2.25 Experimental results of oblique towing test (Astern control)

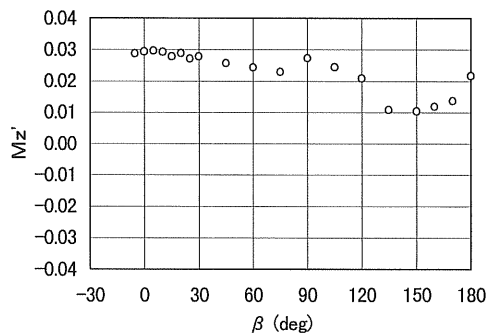
④右旋回制御：前進しながら右旋回動作時の各係数の変化をFig.2.26に示す。抗力係数は β が90度から135度では見かけ上推力が増加した。プロペラによる流れが船体の下流側の抗力を少なくしたためだと考えられる。揚力係数は β が45度から左向きの横力が少なくなり、150度で最も少なくなった。モーメントも β が150度付近で最も少なくなった。



(1) Longitudinal force coefficient (F_x')



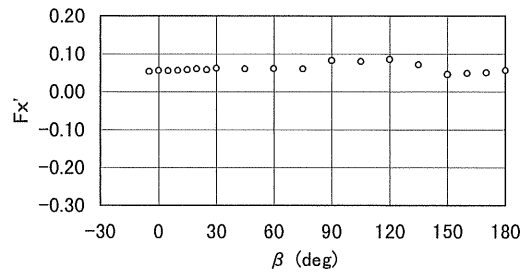
(2) Lateral force coefficient (F_y')



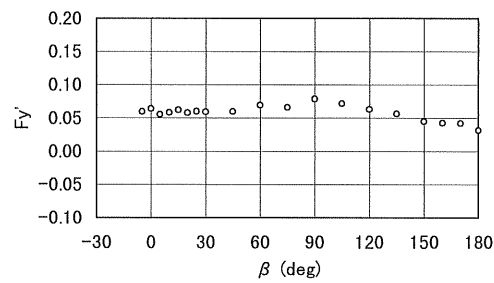
(3) Moment (M_z')

Fig.2.26 Experimental results of oblique towing test (Turn Right control)

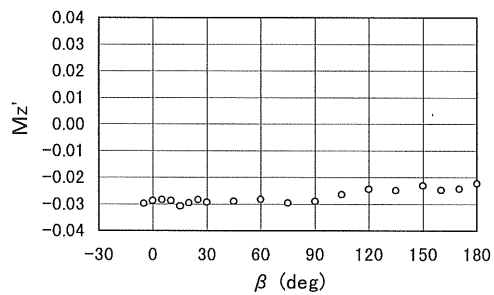
⑤左旋回制御：前進しながら左旋回動作時の各係数の変化をFig.2.27に示す。抗力係数では、水槽の流れとプロペラ後流の相対角度の関係から右旋回のよ
うな傾向はみられなかった。揚力係数も右旋回ほど変化は無かった。モーメントも β による変化は少なかった。



(1) Longitudinal force coefficient (F_x')



(2) Lateral force coefficient (F_y')



(3) Moment (M_z')

Fig.2.27 Experimental results of oblique towing test (Turn left control)

(2)推進器実験

推進器の制御力を調査する目的で推進器試験を行った。Fig.2.28に実験で使用した座標系の定義を示す。なお、推進器の回転数はストロボ式の回転計で計測した。計測された3分力（推力 T_x 、横力 T_y 、トルク TM_z ）から、船体の寸法などの影響をのぞくために、次の無次元化式を用いて、推力係数 T_x' 、横力係数 T_y' 、トルク係数 TM_z' を算出した。ただし、 $\rho = 101.97$ 、 L =長さ、 n =プロペラ回転数(rps)、 D =プロペラ直径とする。

①推力係数(Longitudinal thrust coefficient) : $T_x' = (T_x / \rho n^2 D^4)$ (4)

②横力係数(Lateral thrust coefficient) : $T_y' = (T_y / \rho n^2 D^4)$ (5)

③トルク係数(Moment) : $TM_z' = (TM_z / \rho n^2 D^4 L)$ (6)

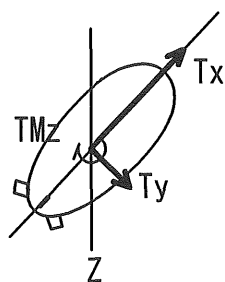
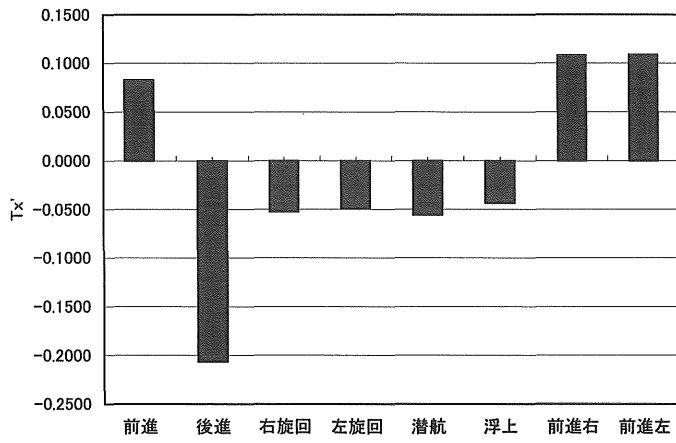
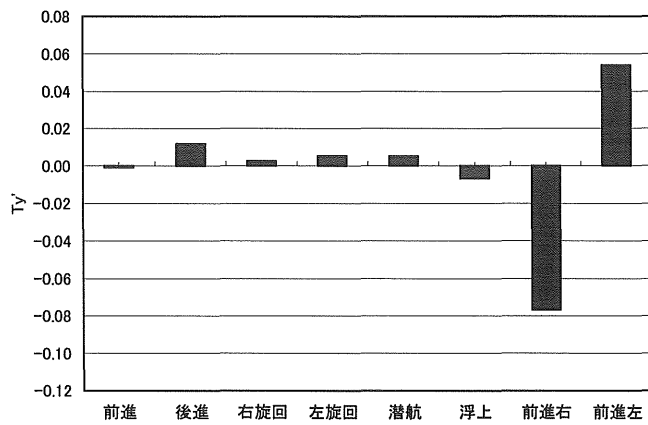


Fig.2.28 Definition of coordinate system for propeller test

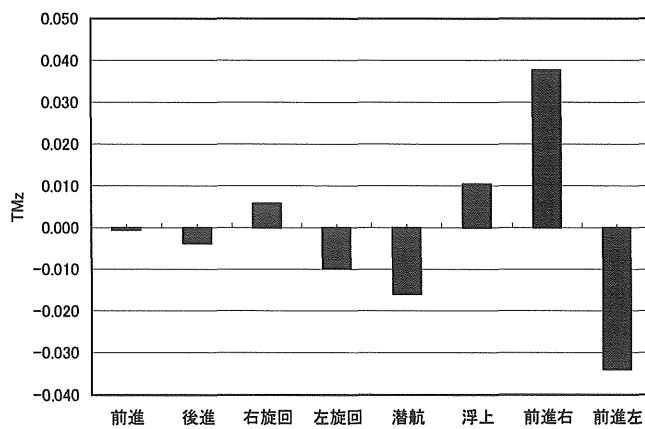
①プロペラ試験：本研究で製作した可変ベクトル推進器の最高回転数に近い360rpmで回転した場合の推力係数 T_x' 、横力係数 T_y' 及びトルク係数 TM_z' をFig.2.29に示す。前進よりも衝突防止など危険回避のために後進時の推力を大きく取った。自由航走試験時に判明した左右の回頭時のわずかな後進が伴う理由は計測結果からも証明された。前進しながらの左右の旋回時の推力が前進よりも大きい理由は、回頭時と前進時のエレベータ動作用モータの角度に前進分の角度が合計されるからである。左右の回頭時の横力係数は小さいが、前進しながらの旋回時の左右のバランスがずれていることがわかった。このような場合にはスワッシュプレートを動かしている3個のDCサーボモータの角度データをソフト的に調整することで改善が可能である。トルク係数は、潜航時には負、浮上時には正のモーメントが作用していることがわかった。



(1) Longitudinal thrust coefficient (T_x')



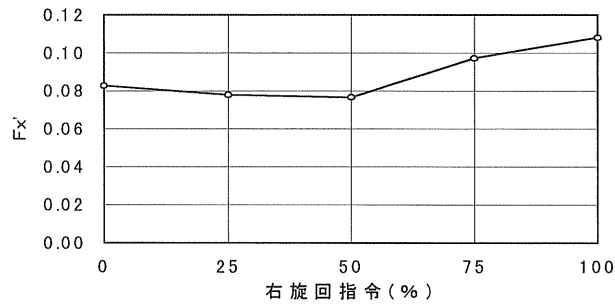
(2) Lateral thrust coefficient (T_y')



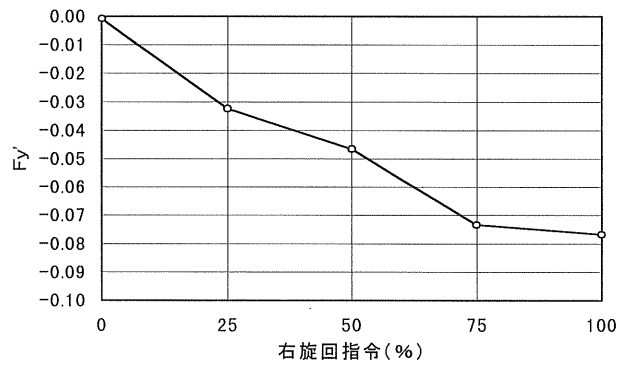
(3) Moment (T_{Mz}')

Fig.2.29 Experimental results of propeller test

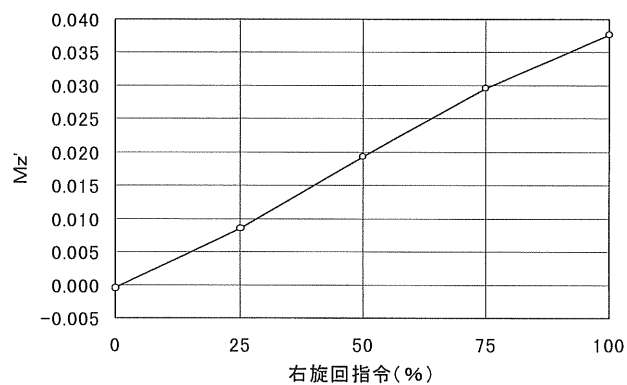
②サイクリックピッチ右側可変試験：旋回制御をする場合のサイクリックピッチの割合を変化させた場合に、3分力がどのように変化するかを確認した。まず、右旋回の割合を増加するに従って、Fig.2.30に示す通り、前進推力が増加する傾向を示した。



(1) Longitudinal force coefficient (F_x')



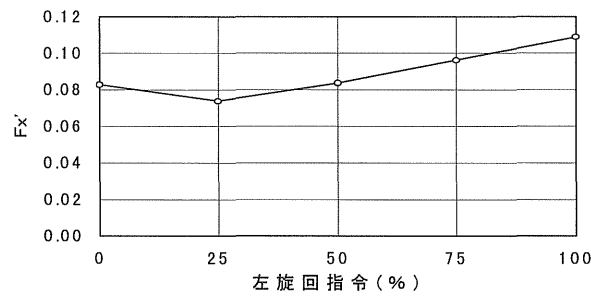
(2) Lateral force coefficient (F_y')



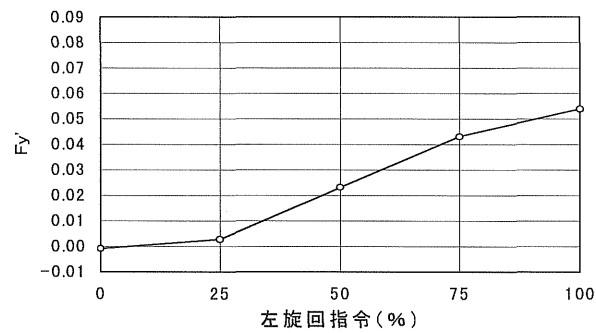
(3) Moment (M_z')

Fig.2.30 Experimental results of cyclic pitch test (Turn right)

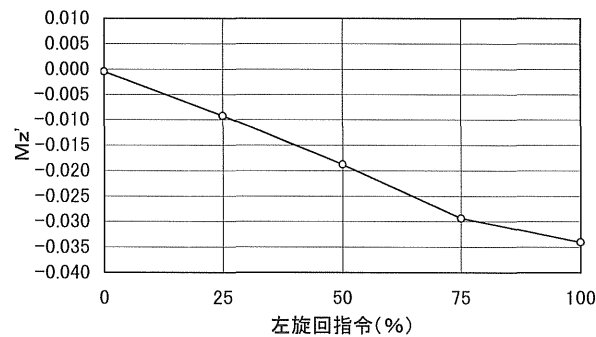
③サイクリックピッチ左側可変試験：左旋回指令時も右旋回指令とほぼ同様であったが、Fig.2.31に示す通り右旋回時より横力がすこし小さくなった。しかし、双方とも左右のバランスは良好であった。以上の結果より、姿勢や位置保持制御時にどの程度の割合でサイクリックピッチを与えればよいかの指標が得られた。



(1) Longitudinal force coefficient (F_x')



(2) Lateral force coefficient (F_y')



(3) Moment (M_z')

Fig.2.31 Experimental results of cyclic pitch test (Turn left)

2. 5 まとめ

大村湾などの閉鎖性海域での海洋環境計測や栽培漁場での水産資源の生育状況や行動生態の精密調査等に、日常的に少人数で使用できる、軽量、コンパクトな自律型海中ロボットシステムの研究に取り組み、水中超音波で遠隔制御のできる海中ロボットを実現した。

- (1) 海中ロボットのコンパクト化のために、まず、推進器の小型化と搭載数の削減を図ることに着目し、ラジコンヘリコプタ用翼角制御機構と超小型DCサーボモータを利用することで、極めてコンパクトな可変ベクトル推進器を実現できた。
- (2) 可変ベクトル推進器を搭載した軽量、コンパクトな海中ロボットが製作できた。
- (3) 可変ベクトル推進器を制御するDCサーボモータの調節用電子回路にFPGA素子を用いて設計製作し、小型化、高速化、及び信頼性の向上が図れた。
- (4) 海中ロボットの制御用コンピュータには、小型化、省エネルギー化を図るために超小型ワンチップマイコンを使用した。制御システムの構築に当たっては、信頼性、保守性の向上、及び開発時に伴うシステムの変更や拡張に柔軟に対応できる分散制御方式が実現できた。
- (5) 機能モジュールとしては、支援母船からの行動指令を送出する送信制御モジュール、海中ロボット内で信号を受信・判断する受信制御モジュール、搭載したセンサ類のデータを収集・識別するセンサ制御モジュール、及び可変ベクトル推進器を制御するモータ制御モジュールから構成した。各モジュールはネットワーク化して、必要な情報のみを伝送する分散制御システムを構築できた。
- (6) 支援母船と海中ロボット間での高品質な情報伝送ができるように、送信制御及び受信制御モジュールの変・復調部、フィルタ部、増幅部を新たに設計製作し、分散制御システムに対応できるようにワンチップマイコンを組み込んだ。さらに、水中情報伝送の信頼性向上

のために多数決方式を採用し、安定性を向上できた。

- (7) 搭載する航行用センサには方位計、ピッチ角とロール角を計測する2軸傾斜計、3軸磁気力計、及び温度計から構成された超小型電子コンパスを使用することにより海中ロボットの小型化に貢献できた。
- (8) 大型無響水槽において、水中超音波を用いた指令信号により、海中ロボットの基本的運動を制御できた。
- (9) 回流水槽での基本的流体力試験として斜航試験及び推進器試験を実施し、可変ベクトル推進器の可変ピッチ変節角度の調整が良好であることを確認すると同時に、従来の推進器を搭載した海中ロボットと同程度の運動性能を有していることを確認した。

第3章 モルフォロジを用いた魚種識別

3.1 はじめに

我が国の水産業を取り巻く現状は、資源状況の悪化、魚価の低迷、外国産水産物との競合の激化、就業者の減少と高齢化など一層厳しさを加えており漁業生産活動の停滞を招いている[14-15]。このような閉塞状況を解決するためには、これまでの漁業開拓、漁獲能力の向上などの拡大策で生き延びてきた方法から脱却し、資源管理型、作り育てる漁業を指向すべきである。その支援策として、自動化、ロボット化を図り、漁業環境計測、資源計測の自動化、資源管理の容易化・正確化等が挙げられる[16-19]。

従来の水産資源調査は、魚群探知機に代表されるように、音響による方法に頼ってきたため、魚種毎、体長毎の資源量を求めるのは極めて難しいのが現状である。そこで、魚群への接近が可能な海中ロボットに高感度のCCDカメラと画像処理装置を搭載し、直接的に魚種識別ができると、水産資源の生育状況や生態の精密調査の効率が向上すると考えられる[20-21]。

本研究では、軽量、コンパクトな自律型海中ロボット本体の実現だけでなく、今後、ロボットを実海域で運用する場合に必要な機能の一つとして期待されている、水中での魚群調査、魚種識別システムに関する基礎的研究にも取り組んだ。

これまでの魚種識別に関する研究は、魚市場において漁船からの荷揚げ直後の魚種を迅速に選別するためのものがほとんどであり、海中においてカメラから取り込まれた画像を直接的に識別しようとするものでは無かった。例えば、魚の体長や周囲長等の物理量の比を統計的データと比較・照合して判別した[64-65]例や、魚の特定部分の色彩情報とテクスチャ解析から識別し、それをDSPを用いて高速化する手法について提案された[66-70]。さらに、ラインセンサカメラから取り込まれたシルエット画像の物理量を計算して魚種の識別に関する手法が提案されたが[71-73]、いずれも魚種を限定したものであり、同種でも、個体サイズに大小がある場合には識別が困難であった。本研究では、魚種の識別手法に魚の個体に影響されにくい、

体側面の斑紋や鱗の形状を特徴として着目し、画像認識を行ってその可能性、有効性を検討する。

特徴抽出の手法としては、近年、肺ガンや乳ガン等の早期発見のために CT 画像からのガン候補領域の粗決定をしたり、MRI画像からの脳軟部抽出等に適用され、その成果が注目を集めているモルフォロジ演算[74-81]を使用する。モルフォロジ演算はフィルタの形状やサイズに強く依存するため使用するフィルタの表現方法によって処理時間に大きな違いがある[82-85]。特に、フィルタサイズを大きくすると処理時間が著しく増加する。そこで、本研究では処理時間を短縮するために有効な手法の一つである、マルチプロセッサを用いた分散並列処理の適用を試みた[96-101]。

本章では、まず基本的なモルフォロジ演算の理論及び前処理や特徴抽出に関する手法について述べる。次に、使用した並列処理用プロセッサと MIMD 型並列画像処理装置について述べる。モルフォロジ基本演算についてフィルタの寸法とプロセッサ数を変化した場合の演算時間、高速化率、並列処理時のプロセッサの実行効率、画像データの伝送時間を計算し、並列処理化の効果を評価する。次に、魚の体側面の斑紋や鱗の形状に着目して、その模様を特徴抽出するためのフィルタの設計と、具体的に魚種を識別するアルゴリズムと実験結果について述べ、本手法の有効性を評価する。

3. 2 モルフォロジによる認識手法

3. 2. 1 モルフォロジ演算の特徴

モルフォロジ演算は確固たる数学的基盤を持ち、体系化された手法であるところに特徴がある。この手法は処理対象画像とモルフォロジカルフィルタとの間の基本的な4種の集合演算の組み合わせで特徴抽出や前処理ができるため、目的に応じたフィルタを作成できれば、他の手法より良好な結果を得ることができる。

モルフォロジ演算における集合は2値あるいは多値の画像で表された形状を表す。ユークリッド空間上でモルフォロジ的に変換された点は選択された点と見なし、その補集合は選択されなかった点と見なす。この観点か

らのモルフォロジは2値のモルフォロジと呼び。一方，ユークリッド空間上の関数で画像の濃淡を表すものとする場合を多値のモルフォロジという。

3. 2. 2 2値画像における基本演算

E^N 空間の集合 A , B と，その元 a , b を次のように定義する。ここで E^N 空間とは N 次元のユークリッド空間のことである。

$$a = (a_1, a_2, \dots, a_N) \quad (1)$$

$$b = (b_1, b_2, \dots, b_N) \quad (2)$$

(1) Dilation (膨張)

2つの集合の和に関する変換規則，集合要素のベクトル和で示す。

A の B による Dilation を $A \oplus B$ と書き，

$$A \oplus B = \{c \in E^N \mid c = a + b, \text{ for any } a \in A \text{ and } b \in B\} \quad (3)$$

と定義する。集合 A (1画像の全体) の元 a と，集合 B (フィルタの全体) の元 b 間の，可能な全てのベクトル和をとることである。

画像に適合した場合，画像領域を拡張・膨張し，線に対して用いると線の太め処理となる。

(2) Erosion (浸食)

2つの集合の差に関する変換規則，集合要素のベクトルの差で表現する。

A の B に対する Erosion を $A \ominus B$ と書き

$$A \ominus B = \{x \in E^N \mid x + b \in A, \text{ for every } b \in B\} \quad (4)$$

と定義する。全ての b に対して常に $x + b \in A$ となるような共通項 x の集合のことである。画像に適合した場合，画像領域の縮小・細線化処理となる。

(3) Opening (開孔)

A の B による Opening $A \circ B$ と書き

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (5)$$

と定義する。AをBで Erosion した後，更にBで Dilation を行うことである。画像に応用するとフィルタを包容する領域のみを残したり，ノイズ除去にも使用できる。

(4) Closing (封孔)

AのBによる Closing を $A \blacksquare B$ と書き

$$A \blacksquare B = (A \oplus B) \ominus B \quad (6)$$

と定義する。AをBで Dilation した後，更にBで Erosion を行うことである。画像に応用すると画像領域の欠け部分の補充や穴埋め処理に使用できる。

3. 2. 3 多値画像におけるモルフォロジ演算

多値のモルフォロジでは E^N 空間で定義された集合Aに対して，最初の(N-1)次元は集合Aの座標，最後のN次元目は集合Aの濃度を与える。

多値のモルフォロジでは max 演算，min 演算により以下のように定義する。f(x, y)を入力画像、k(x, y)をフィルタ関数、実行結果をg(x, y)とする。Fを画像定義域，Eを濃度方向，Kをフィルタ定義域とし，fをFからEへ写像，kをKからEへの写像とし、zはフィルタのx座標である。4種の基本演算の定義式は以下の通りである。

(1) Dilation

$$(f \oplus k)(x) = \max\{(f(x-z) + k(z)) \mid (x-z) \in F, z \in K\} \quad (7)$$

(2) Erosion

$$(f \ominus k)(x) = \min\{(f(x+z) - k(z)) \mid (x+z) \in F, z \in K\} \quad (8)$$

(3) Opening

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (9)$$

(4) Closing

$$A \cdot B = (A \oplus B) \ominus B \quad (10)$$

多値画像における応用演算としては、

(5) Tophat 処理

原画像と現画像を半球フィルタ $R(x,y)$ で Opening した画像との差により、原画像に乗っているバイアス分を除去し、抽出対象の強調処理に使用できる。

$$g(x,y) = f(x,y) - \{f(x,y) \circ R(x,y)\} \quad (11)$$

(6) Quoit 処理

原画像をディスクフィルタ $D(x,y)$ で Dilation した画像とリングフィルタ $R(x,y)$ で Dilation した画像との差により求められる。主として孤立性陰影を抽出するために使用する。

$$g(x,y) = \{f(x,y) \oplus D(x,y)\} - \{f(x,y) \oplus R(x,y)\} \quad (12)$$

3. 3 並列画像処理装置

3. 3. 1 並列処理用プロセッサ

本研究では、トランスピュータ T9000(SGS-THOMSON 製)を使用して並列画像処理システムを構成した。トランスピュータとは RISC 型の並列処理用シングルチップマイクロプロセッサであり、高速処理 (T9000-20MHz : 80MIPS, 10MFlops) と同時に並行して、高速シリアル通信 (100Mbps) が可能である。マルチプロセッサ型並列処理システムを容易に構築できる専用ハードウェア VCP(Virtual channel Processor)を内蔵している。プロセッサ間の通信は 32 バイトの packets 通信をベースにしており、VCP と通信用 IC(C104:SGS-THOMSON 製)を使用することにより、ネットワーク上の任意の T9000 の任意のプロセス間の通信が可能である。Parallel Cluster (コンカレントシステムズ製) は、T9000 を搭載したモジュールを最大 16 個搭載できるコンパクトな並列処理システムである。システム内には T9000 間の通信のため

めに C104 を 4 個搭載しており、任意の T9000 間のメッセージルーティングが高速にできる。使用した並列画像処理装置の構成図を Fig.4.1 に示す。

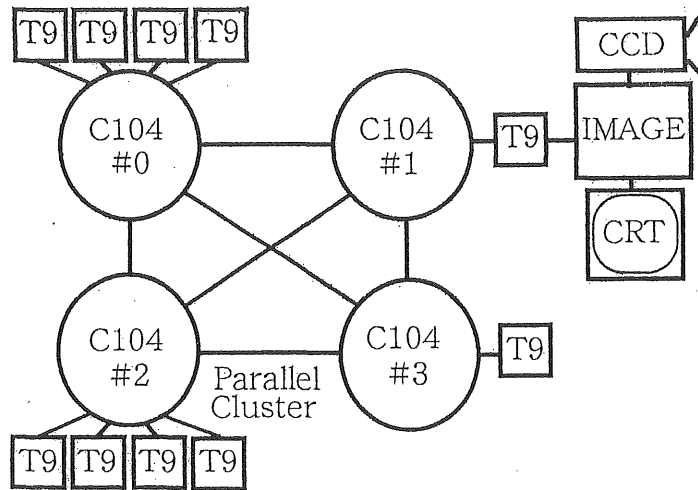


Fig. 4.1 System configuration of parallel image processing

3. 3. 2 並列プログラミングモデル

本研究で使用する並列プログラミングは、Oxford 大学の Hoare 教授が提唱した CSP(Communicating Sequential Processes)理論を基礎として、チャンネルを通して相互通信しながら、同時動作するプロセス群から構成される。チャンネルは 1 方向の通信経路で、プロセス間でのデータ交換に用いられる。各プロセスは、任意個数の並列プロセスから構成されており、全体のソフトウェアシステムは、並列プロセスの階層構造として記述する。

プロセス間通信は同期をとって行われ、ネットワーク内のどのプロセッサ上でも実行できるように配置するためのコンフィグレーション言語が用意されている。この言語を用いることにより、複雑なマルチプロセッサシステムを簡単にプログラムすることができる。トランスペュータの並列処理機能は、並列プロセスを直接的かつ効果的に実現するハードウェア、並列プロセスに優先順位をつける機能、ソフトウェア割り込みを高優先度プロセスとして実現できる機能などにより、リアルタイムプログラミングが

可能である。本研究では T9000 用 ANSI-C 言語を用いて全てのプログラムを作成した。

3. 3. 3 並列画像処理装置の性能評価

並列画像処理システムの性能や効率の測定は、計算機システムの効率的な使用を計画するために必要である。従来の計算機では、効率向上のためにキャッシュメモリと主メモリをうまく使ったプログラミング手法が重要な要素であった。これらの一般的な事柄に加えて並列プログラミングでは、アイドル状態のプロセッサがないようにプロセッサを効率的に使わなければならない。

並列処理システムの効率を計算するための1つの指標は、1プロセッサ上でプログラムを実行するのに必要な時間と並列システム上で同じ内容のプログラムを実行するのに必要な時間の比で以下のように与えられる。

$$\text{効率(\%)} = \frac{\text{逐次型計算システム上での実行時間}}{\text{並列システム上での実行時間} \times \text{プロセッサ数}} \times 100(\%) \quad (13)$$

並列計算システムの一般的な性能測定の2番目の指標は高速化率である。並列計算システムの高速化率は、並列システム上での実行時間と単一プロセッサの逐次型計算機上での実行時間との比で表される。

$$\text{高速化率(\%)} = \frac{\text{逐次型計算機上での実行時間}}{\text{並列システム上での実行時間}} \times 100(\%) \quad (14)$$

3. 4 モルフォロジを用いた画像認識実験

本研究では512画素×480画素、256階調の濃淡画像を使用した。画像の形式はCCDカメラからの直接入力した画像とスキャナより取り込んだBMP形式をIMG形式に変換した画像を用いた。まず、4種のモルフォロジ基本演算に関してT9000単独による処理プログラムを開発した後、処理時間を計測した。次に、T9000を2個から20個まで増やした場合の並列処理プログラムを開発し、画像処理時間、画像データ伝送時間を計測した。得られたデータより並列処理の高速化率や並列処理時の実行効率について評価した。

次に、モルフォロジによる特徴抽出と並列処理による高速化の応用として、魚の識別を行った。識別する魚種は真鯛、マアジ、真鯖の3種について行った。魚種の識別には、それぞれの側面の模様や鱗の形状等、斑紋を抽出するモルフォロジカルフィルタを設計し、真鯛は体側の斑点、マアジは尾鰭付近の盾状鱗であるゼイゴ、真鯖は背面の縞模様を抽出した後、統計的な処理結果と組み合わせて各魚種を識別した。

3. 4. 1 単独プロセッサによるモルフォロジ基本演算

CCDカメラにより取り込まれた画像データをT9000により制御された画像処理ボードTRP-IMG2(コンカレント・システムズ製)に入力する。デジタル化されたデータをルートトランスピュータへ送信し、各種基本演算を行う。その結果を再度TRP-IMG2へ転送して、モニタディスプレイに表示する。画像に対してモルフォロジの基本演算であるDilation, Erosion, Opening, Closing及び、応用演算としてTophatとQuoitの各演算の単独プロセッサ用

1	3	1
3	5	3
1	3	1

Fig.4.2 3x3 Gray-scale filter

のプログラムを作成した。フィルタ寸法は 3×3 、 5×5 及び 9×9 と変化させて各演算の処理時間を計測した。Fig.4.2 に 3×3 フィルタの例を示し、各処理結果を Fig.4.3 ~ Fig.4.6 に示す。

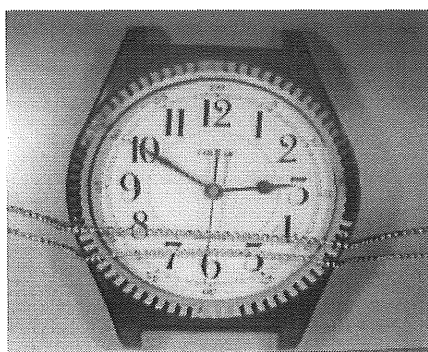


Fig.4.3 Original image

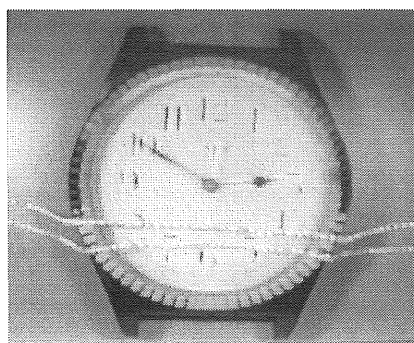


Fig.4.4 Dilation image

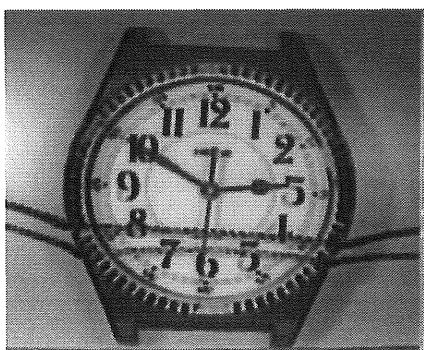


Fig.4.5 Erosion image

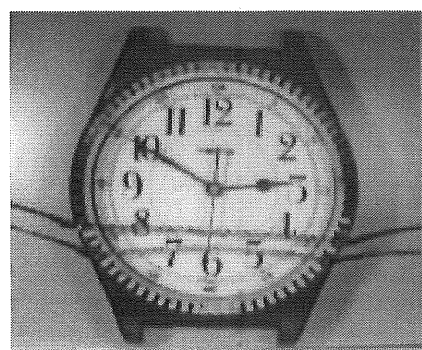


Fig.4.6 Opening image

以上の図よりモルフォロジカル基本演算の定義通りの結果が得られた。

- (1)Dilation では、白い領域が全体的の太められ、輝度の高い部分が強調された。
- (2)Erosion では、Dilation とは逆に、フィルタのサイズ範囲に応じて黒い部分が太められた。
- (3)Opening は、原画像とほとんど同じ大きさを保ちつつ、輝度の平坦化やノイズ除去ができた。
- (4)Closing は、細い欠け部分を補充した画像が得られた。

3. 4. 2 並列処理によるモルフォロジ演算の高速化

マルチプロセッサによるモルフォロジ演算の高速化を評価するために、プロセッサを2個から20個まで使用する場合についての並列処理用プログラムを作成した。モルフォロジカルフィルタのサイズを3×3、5×5、9×9の3種類について実験を行った。まず、TRP-IMG2ボードにより取り込まれた画像を並列処理数nに応じて水平方向にn分割し、各領域を分割数に応じた数のT9000に転送する。各T9000上では1/n画像についての各種モルフォロジ演算を行い、処理結果を再びルート用T9000に転送する。受信された画像を合成し、画像処理ボードに表示すると同時に実行時間を計測した。使用した5×5及び9×9フィルタをFig.4.7～Fig.4.8に、処理結果をFig.4.9～Fig.4.11に示す。

1	1	3	1	1
1	3	5	3	1
3	5	9	5	3
1	3	5	3	1
1	1	3	1	1

Fig.4.7 5x5 Gray-scale filter

1	1	1	1	3	1	1	1	1
1	1	1	3	5	3	1	1	1
1	1	3	5	9	5	3	1	1
1	3	5	9	15	9	5	3	1
3	5	9	15	21	15	9	5	3
1	3	5	9	15	9	5	3	1
1	1	3	5	9	5	3	1	1
1	1	1	3	5	3	1	1	1
1	1	1	1	3	1	1	1	1

Fig.4.8 9x9 Gray-scale filter

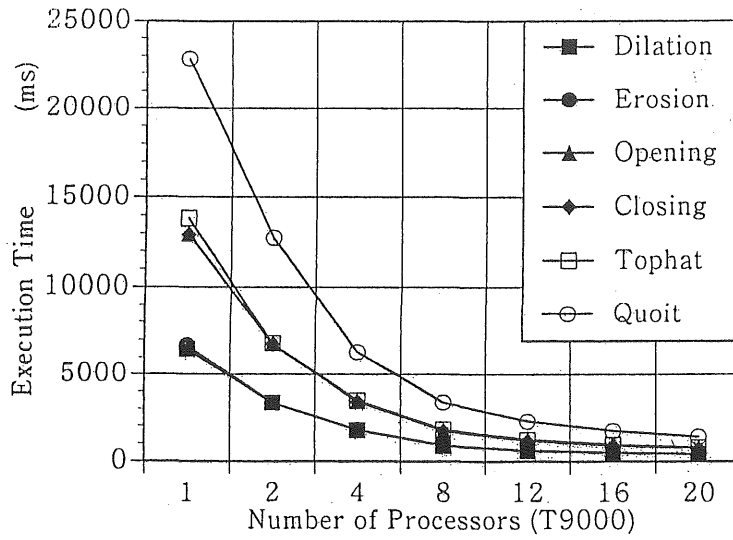


Fig.4.9 Processing time(3x3 filter)

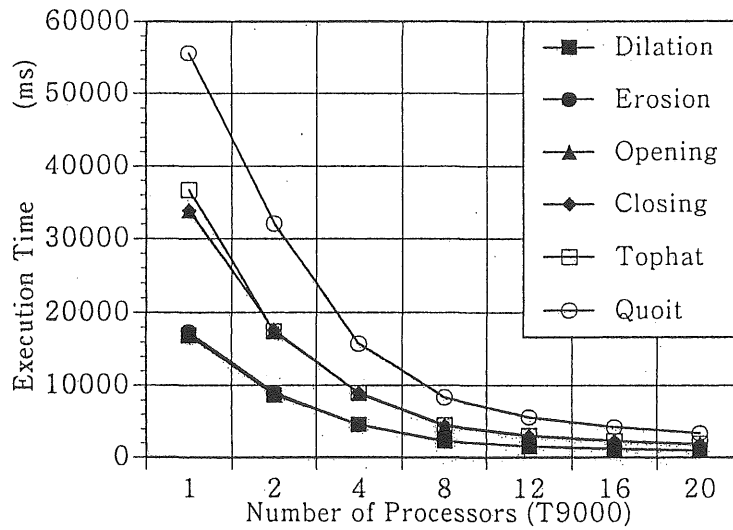


Fig.4.10 Processing time(5x5 filter)

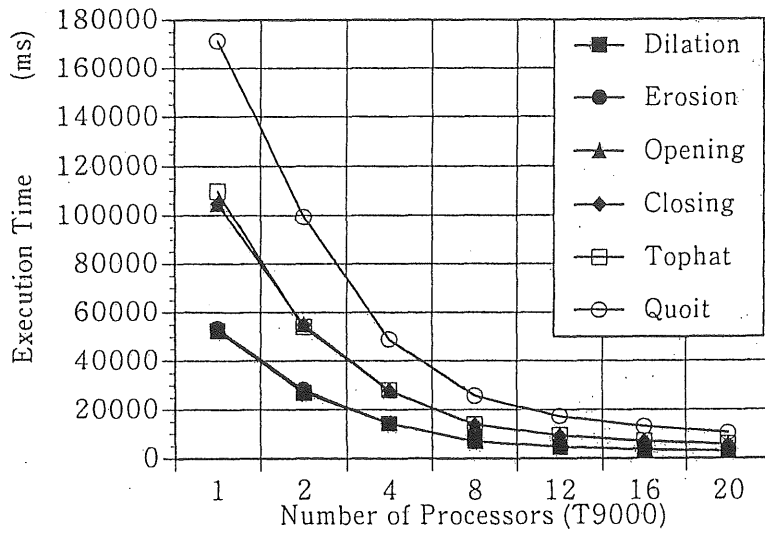


Fig.4.11 Processing time(9x9 filter)

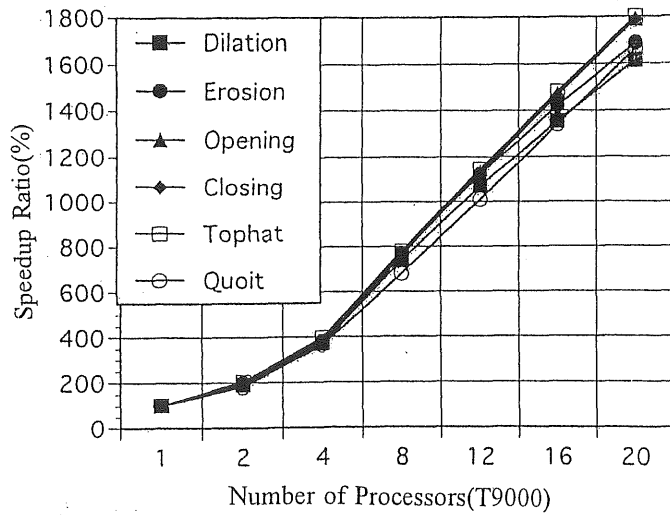


Fig.4.12 Speedup ratio

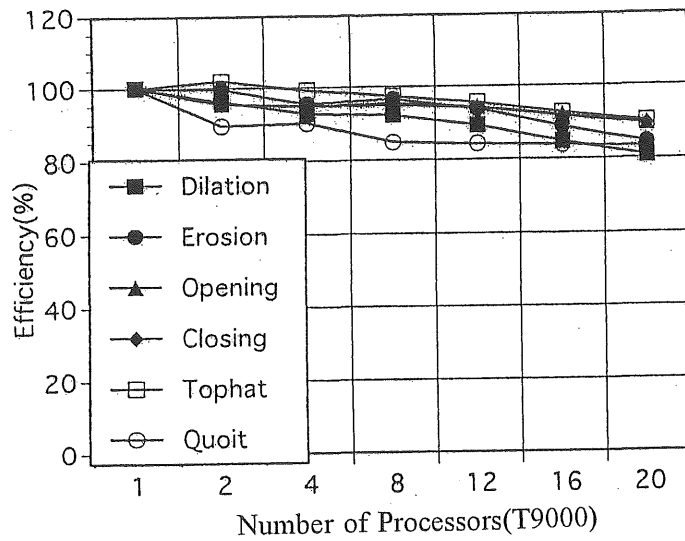


Fig.4.13 Efficiency of a T9000

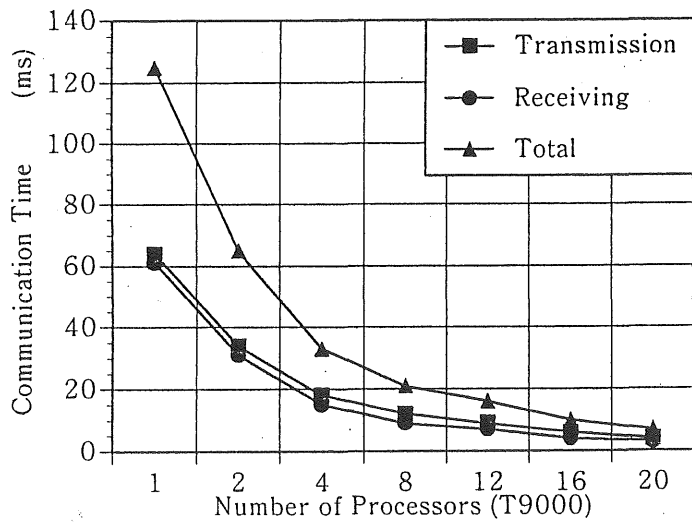


Fig.4.14 Image data transmission time

9 × 9 フィルタを使用した場合の高速化率を Fig.5.12 に示す。使用したプロセッサにほぼ比例した高速化率が実現した。

次に、並列処理した場合の1チップ当たりの実行効率を Fig.4.13 に示す。チップを増やした場合でも、各チップは90%以上の高効率で演算を行っていることがわかった。画像データをプロセッサ間で伝送時間は Fig.4.14 に示す通りであり、画像処理時間全体に占める割合は極わずかで、バーチャルチャンネルプロセッサのデータ転送性能が優れていることがわかった。以上により、トランスピュータ T9000 及びパケットルーティングスイッチ C104 を組み合わせた並列処理装置を用いると、モルフォロジ演算の高速化が実現できることを確認できた。

3. 4. 3 モルフォロジによる魚種識別手法

一般に、成魚の斑点、縞模様等の斑紋や鱗の形状はわずかの変異はあるが、種類によりほぼ一定で個体差が少なく、魚種の分類形質として利用できる。

本研究ではその点に着目し、それぞれのモルフォロジカルフィルタを設計し、特徴抽出や前処理等のモルフォロジ演算のみにより魚種識別を試みた。

(1)真鯛：真鯛の特徴は体側面の黒い斑点であるので、斑点の平均的なサイズから Fig.4.15 に示す抽出用 3 × 3 グレイスケールフィルタを設計した。バイナリフィルタは斑点抽出後のノイズ除去用に設計した。更に、ラベリ

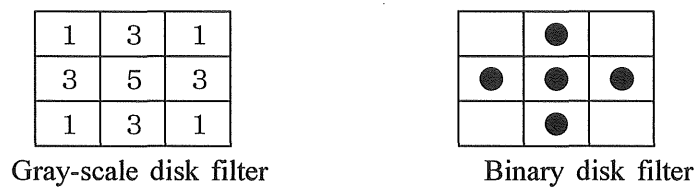


Fig.4.15 Filters of pilchard sardine

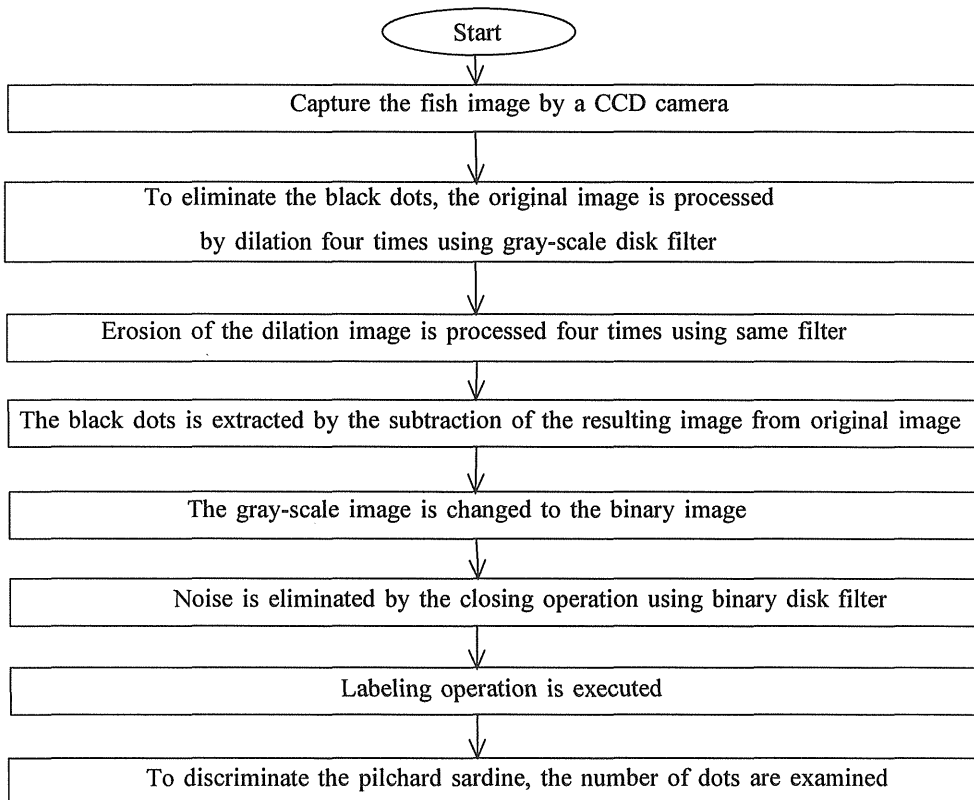


Fig.4.16 Flowchart of pilchard sardine

ング処理後、同じ座標上に一定範囲の面積をもつ斑点の数を計数し、判定基準範囲内ならば真鯛と判定した。真鯛識別用の詳細なフローチャートを Fig.4.16 示す。

(2) マアジ：マアジの特徴は縦状のゼイゴであるので、選択的平滑化処理を適用して、一旦ゼイゴを消去するために Fig4.17 に示す 1×3 フィル

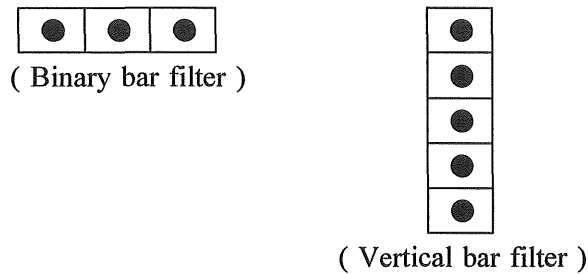


Fig.4.17 Filters of Japanese horse mackerel

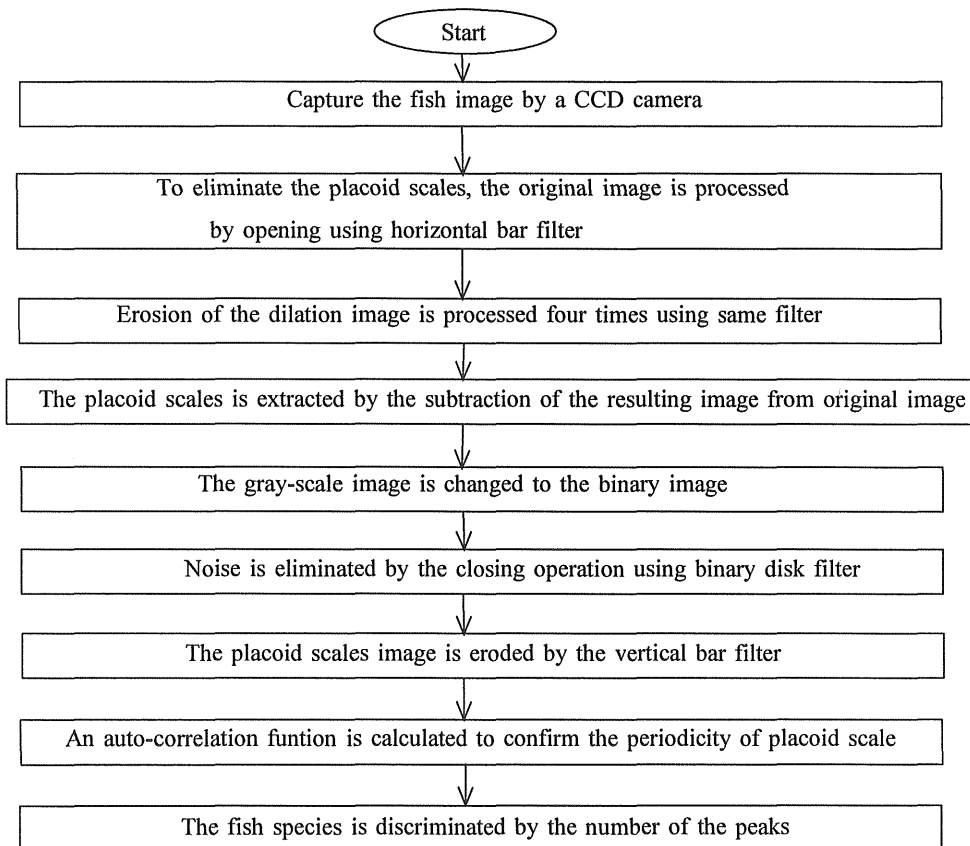


Fig.4.18 Flowchart of Japanese horse mackerel

タを設計した。5 × 1 フィルタはゼイゴ抽出後のノイズ除去用に設計した。更に、ゼイゴの周期的な配列に着目し、自己相関関数を計算して、ピーク間隔が判定基準範囲内ならばマアジと判定した。詳細なフローチャートを Fig.4.18 に示す。

(3) 真鯖：背面の縞模様を真鯖の特徴として着目し、縞模様を明確化するために使用する Closing 処理のために 1 × 7 バイナリフィルタを設計した。真鯖識別のために、2 値化、抽出した縞模様をラベリング処理し、独立した縞の面積と周囲長の比を計算し、その比と各縞の重心の座標の間隔が一定範囲内ならば、真鯖と判定した。真鯖識別用の詳細なフローチャートを Fig.4.19 に示す。

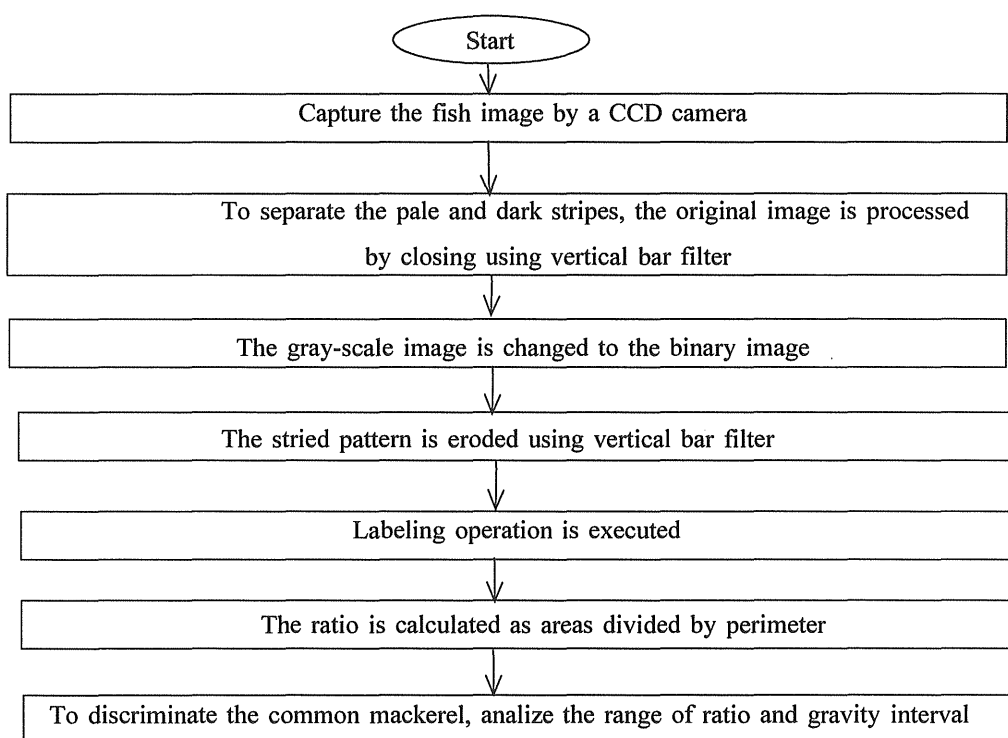
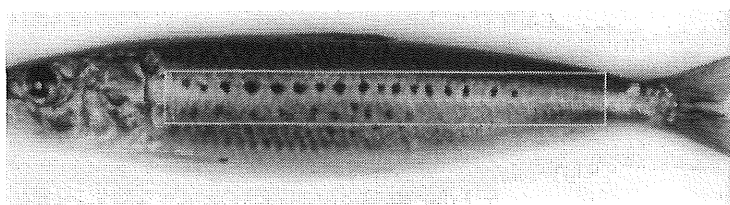


Fig.4.19 Flowchart of common mackerel

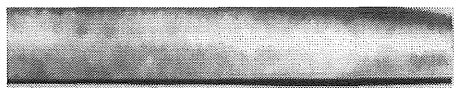
3. 4. 4 魚種識別実験結果

①真鯛

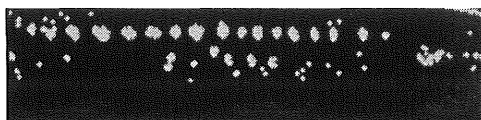
真鯛50尾を用いて特徴抽出と魚種識別の実験を行った。使用した原画像例から処理プロセスごとの途中経過の画像を Fig.4.20 に示す。側面のほぼ中心に沿って黒い斑点が抽出され、一定範囲の面積が4個以上あれば真鯛と判断した。識別率は約95%であり、従来の識別率が90%程度なので、良好な結果が得られた。しかし、斑点抽出にモルフォロジカル演算を繰り返し使用するために、処理時間は1尾当たりやく0.98秒を要した。



① Original image of pilchard sardine



② Elimination of black dots



③ Extraction result of black dots

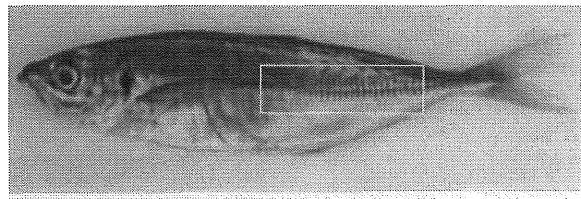


④ Labeling of black dots

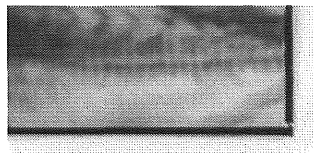
Fig.4.20 Discrimination process of pilchard sardine

② マアジ

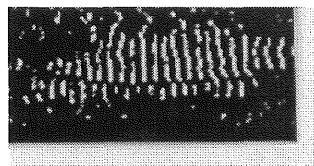
マアジも 50 尾を用いて魚種識別実験を行った。原画像例から各プロセスごとの画像と自己相関関数の計算結果を Fig.4.21 に示す。ゼイゴの自己相関関数のピークがほぼ 3 から 5 ドット毎に現れるので、これを基準としてマアジであるか否か識別した。識別率は 50 尾の標本を使用して約 94 % であった。処理時間は約 0.79 秒かかった。



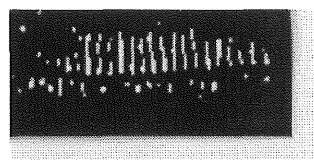
① Original image of Japanese horse mackerel



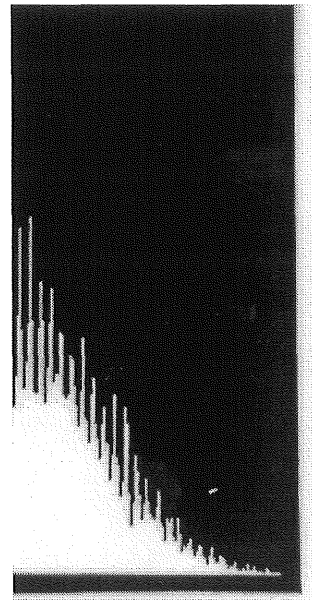
② Elimination of zeigo



③ Extraction result of zeigo



④ Erosion result of zeigo

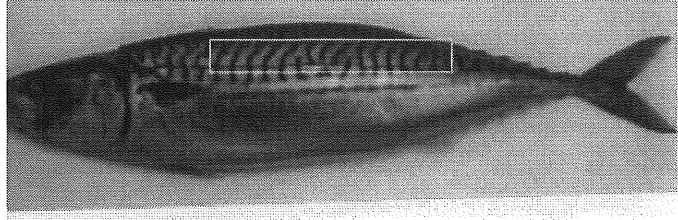


⑤ Auto-correlation results

Fig.4.21 Discrimination process of Japanese horse mackerel

④真鯖

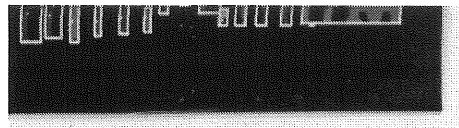
真鯖の原画像、特徴抽出例、ラベリング例を Fig.5.22 に示す。識別率は20尾の標本を使用して約92%であった。処理時間は約0.61秒を要した。



① Original image of common mackerel



② Extraction result of stripes



③ Labeling of stripes

Fig.4.22 Discrimination process of common mackerel

以上のように魚の特徴である斑紋のみに着目し、モルフォロジ演算のみによる魚種識別は十分可能であることを示した。

3. 5 まとめ

本研究では、海中ロボットに必要な機能の一つとして期待されている、水中での魚種識別システムに関する基礎的研究に取り組んだ。

まず、近年の医用画像分野で有効性が注目されているが、処理時間の高速化が求められているモルフォロジ演算を並列処理し、その台数効果等について検討した。次にそのモルフォロジ演算を魚種識別へ適用して可能性を以下の通り検討した。

(1) 並列処理プロセッサであるトランスピュータ T9000 とパケットルーティングスイッチ C104 を使用した並列画像処理装置を構築することで、空間分割型並列処理用モルフォロジ演算プログラムが実現できた。

(2) T9000 を 20 個使用した並列処理を行った結果、プロセッサの数にほぼ比例して、約 1.8 倍の高速化を実現できた。また、並列化した場合の各プロセッサの実行効率も 95% 以上であり、本方式がモルフォロジ演算にも有効であることがわかった。

(3) 真鯛は体側面の斑点、マアジは鱗（ゼイゴ）の形状、真鯖は背面の縞模様をそれぞれの特徴として着目し、モルフォロジカルフィルタを設計することで、モルフォロジ演算のみによる魚種識別プログラムを開発できた。

(4) 真鯛の識別実験結果、1 尾当たり約 0.98 秒を要したが、約 95% の識別率であった。

(5) マアジの識別実験結果、1 尾当たり約 0.79 秒を要したが、約 94% の識別率であった。

(6) 真鯖の識別実験結果、1 尾当たり約 0.61 秒を要したが、約 92% の識別率であり、いずれも良好な識別結果が得られ、有効な手法であることがわかった。

(7) 魚種識別において、例えば 10 個の T9000 による並列処理を適用すると、いずれの魚種も 100 m 秒以下で識別が可能となる見通しを得た。

今後は、実際に水中での魚種識別を実現するための検討を行うことや、処理時間を短縮するアルゴリズムの検討に取り組む予定である。

第 4 章 結 論

可変ベクトル推進器を搭載し、水中超音波により遠隔制御ができる軽量、コンパクトな自律型海中ロボットの実現に関する研究、および海中ロボットの一機能として期待されている、魚種識別システムに関する基礎的な研究に取り組み、得られた結論を以下に述べる。

(1) 軽量、コンパクトな海中ロボットを実現するためには、まず、推進器の小型化、搭載数の削減を図ることが不可欠である点に着目し、推進器 1 個で 3 次元の自在な運動ができる可変ベクトル推進器を製作した。小型化のためには、ラジコンヘリコプタ用機構部品と超小型 DC サーボモータを利用することが効果的であることを示した。更に、可変ベクトル推進器を駆動するために必要な DC サーボモータ用パルス幅調節回路に FPGA を使用して、小型化、高速化、高信頼化を実現した。可変ベクトル推進器を搭載した極めて小型の海中ロボットシステムを製作し、水中超音波の指令で自在な運動が可能であることを、水槽実験により確認した。

(2) 自律型海中ロボットの必要な機能を分散化して設計し、超小型のワンチップマイクロコンピュータを用いてモジュール化を行い、各モジュールはシリアルインターフェースによりネットワーク構成として、分散制御システムを構築した。システムの開発時に伴う変更や拡張に柔軟に対応できるばかりでなく、フェールセーフシステム化による信頼性の向上や開発の効率化、省エネルギー化を実現した。

支援母船間との水中超音波を用いた情報伝送モジュールには、安定した通信が実現するように、ハード、ソフトの工夫を施して製作し、実海域において 90% 以上の伝送率で情報伝送ができる事を確認した。

(3) 自律型海中ロボットを海流のある実海域で利用する場合、位置や姿勢を一定に保持制御する必要があるため、ロボットの基礎的流体力を、回流水槽を用いて計測した。その結果、可変ベクトル推進器の可変ピッチ角度の調整で良好に対応できることを確認した。推進器及び可変ベクトル推進器を搭載した海中ロボット本体性能として、従来型のプロペラを搭載した海中ロボットと同程度の運動性能を有することを確認した。

(4) 魚の個体差が少ない斑紋や鱗の形状に着目し、モルフォロジ演算のみを用いて前処理や特徴を抽出するプログラムを開発し、実際の魚で実験を行った結果、真鯛では約95%、マアジでは約94%、真鯖では約92%という高い認識率を実現し、本方式の有効性を示した。さらに、魚種識別に並列処理を適用すると、リアルタイムに処理できる見通しを得た。

(5) モルフォロジを用いた画像処理には、繰り返し演算を多用するために処理時間がかかることが難点であったため、本研究では、画像データの空間的並列性に着目し、MIMD型の並列処理を適用するプログラムを開発した。実験結果から、使用したプロセッサの数にほぼ比例した高速処理化と、プロセッサを増加しても実行効率は95%以上を実現し、並列処理の有効性を確認できた。

今後の課題としては、実海域で運用するために必要な機能として、

- 1) 航行用センサ機能をさらに向上した自律航行の高度化
- 2) 母船から海中ロボットまでの方位と距離を計測する測位システム
- 3) バラスト自動切り離し機構の搭載等

の実現を図り実海域で実験を行う。

さらに、海洋環境計測や水産資源の調査に貢献できるように知的な自律型海中ロボットとして発展させたい。

謝 辞

平成9年度に、長崎大学大学院・海洋生産科学研究科に入学して以来、ご丁寧なご指導とご鞭撻を賜りました本学・海洋生産科学研究科教授石松隆和博士に心から感謝申し上げます。

同じく、本論文の審査に際してご指導を賜った、本学・海洋生産科学研究科教授 茂地 徹博士、同教授 岡林隆敏博士、同教授 吉武 裕博士に厚く感謝の意を表します。

また、本研究を進めるに当たり、ご協力いただいた長崎大学工学部 下本陽一博士、康 チュル ウン博士、今井清利技官、およびお世話いただきました、竹末うづき秘書を始め機械制御学研究室のJamal Tariq Mian氏及び各位に感謝し、御礼申し上げます。

装置類の開発に当たり、宇宙模型(有)の代表取締役 溝上孝章氏、(株)コンカレント・システムズの代表取締役 中井泰明氏を始め、社員の方々にお世話になりました、各位に感謝し、御礼申し上げます。

さらに、本研究の当初から絶えずご指導ご助言を賜り、終始暖かいご理解ある研究環境をお与え頂いた佐世保工業高等専門学校名誉教授 中園 彪氏並びに、佐世保工業高等専門学校電気工学科主任教授 吉田 直氏をはじめとする電気工学科の皆様方に謹んで感謝申し上げます。

また、本研究を行う機会を与えて頂き、深い理解と暖かいご援助を賜りました佐世保工業高等専門学校・前校長 徳永陽一博士並びに同・現校長 根本 實博士をはじめとする佐世保工業高等専門学校の皆様方に感謝し、御礼を申し上げます。

最後に、本研究を進めるにあたり絶えず励ましてくれた妻の京子及び両親、その他お世話になった全ての方々に深く感謝いたします。

平成11年12月

長嶋 豊

参 考 文 献

- [1]気象庁編:近年における世界の異常気象と気候変動～その実体と見通し～
(VI)各論, pp.40 - 148, 1999.
- [2]環境庁編:平成 1 1 年版環境白書, pp.387 - 434. 1999.
- [3]Kasahara.J, et-al.,: A submarine cable OBS by use of the retired submarine
telecommunication cable: GeO-TOC Program, Proceedings of International Workshop on
Scientific Use of Submarine Cables, pp.91 - 102, 1992.
- [4](社)国際海洋科学技術協会:沿岸域および海洋の環境保全・改善利用と技
術に関する調査研究報告書, pp.33 - 93, 1995.
- [5]笠原順三,佐藤利典:VENUS 計画の概要と広帯域地震観測,月刊海洋,Vol.28,
pp.213 - 218, 1996.
- [6]Duraton. R., Michel.J.L., and Grandvaux : EPAULAND: An Unmanned, Untethered
Vehicle for Deep Ocean Survey, Proceedings of OTC'80, pp.41 - 48, 1980.
- [7]Hartley, P. and Butler, B:AUV Fiber Optic Cable Laying-From Concept to Reality-,
Proceedings of Unmanned Untethered Submersible Technology'91, pp.20 - 27, 1991.
- [8]石谷久,正司公一:無索 ROV の位置及び姿勢制御,マリンビークルの運動制
御, -運動性能研究委員会・第 6 回シンポジウム-,日本造船学会, pp.153
- 190, 1989.
- [9]Must Mobile Undersea Systems Test Laboratory, Martine Marietta, 1991.
- [10]橋詰泰久:無索式水中ロボットの開発(WaterBird の実海域での無索航行ま
で), ROBOMECH'92, 講演論文集, 日本機械学会, Vol.B, pp.211 - 216, 1992.
- [11]浦環:無索無人機による海洋調査の可能性を探る,日本造船学会誌第 775
号, pp.9 - 14, 1994.
- [12]浦環,石井和男:自律型海中ロボットの研究開発動向,日本造船学会誌, 第
815 号, pp.373 - 378, 1997.
- [13]浦環:自律型海中ロボット,計測と制御,第 37 巻, 第 11 号, pp.783 - 786, 1998.
- [14]農林統計協会編:平成 9 年度図説漁業白書, pp.6 - 29, 1998.
- [15]高橋正征:生態学から見た海洋とその資源の利用の方向, 第 11 回海洋工

- 学シンポジウム, pp.15 - 23, 1998.
- [16]漁船機関技術協会:平成4年度漁業新技術開発事業,漁業生産流通機械等
実用化試験事業報告書, pp.26 - 50, 1993.
- [17]中村充:海洋環境制御技術と食料・環境,第11回海洋工学シンポジウム,
pp.293 - 298, 1998.
- [18]浜出雄一:コンピュータ式イカ釣りロボット,水産世界, pp.92 - 93, 1993.
- [19](社)日本深海技術協会:沿岸海域における海洋研究・海洋利用の動向及
びそれに必要な技術の抽出に関する調査報告書, 1993.
- [20]水産庁水産工学研究所:漁業資源量調査のためのマリノセンシング技
術の開発:平成8,9年度推進評価会議資料, 1998.
- [21]水産庁水産工学研究所:漁業資源量調査のためのマリノセンシング技
術の開発:平成10年度推進評価会議資料, 1998.
- [22]浦環,高川真一:海中ロボット:成山堂書店,初版, pp.26 - 82, 1997.
- [23]E.A.Barros,H.Maeda,S.Miyajima:A System Identification Experiment For an Underwater
Vehicle, 第11回海洋工学シンポジウム, pp.255 - 262, 1992.
- [24]Sagatun:A Situation Assessment System for the MSEL EAVE III AUVs, Proceedings of
Unmanned Untethered Submergible Technology'89, 1989.
- [25]Blidberg: Guidance Control Architecture for the EAVE Vehicle, IEEE Journal of Oceanic
Engineering, Vol.11, no.4, pp.449 - 461, 1986.
- [26]B.A.A.P Balasuria, M.Takai, W.O.Lam,T.Ura,and Y.Kuroda:Visual Feed-back Control for
Ummanned Underwater Vehicles,TECHNO-OCEAN'96, pp.437 - 442, 1996.
- [27]Smith: An Approach to Intelligent Distributed Control for Autonomous Underwater
Vehicle, Proceedings of AUV'94, pp.105 - 111, 1994.
- [28]A.J.Healey and D.B.Marco: Experimental Verification of Mission Planning by
Autonomous Mission Execution and Data Visualization Using The NPS AUV II,
Proceedings of AUV'92, pp.65 - 72, 1992.
- [29]Yoerger et al. : Near-Bottom Magnetic Surveys of the Coaxial Ridge Segment Using the
Autonomous Benthic Explorer Survey Vehicle, RIDGE Events, pp.5 - 9, 1996.
- [30]平林丈嗣,秋園純一,田中敏成:浅海域におけるAUV利用計画,TECHNO -

- OCEAN'98, pp.149 - 152, 1998.
- [31]T.Ura: Free swimming Vehicle "PTEROA150" for Deep Sea Survey, Proceedings of ROV'89, pp.263 - 268, 1989.
- [32]浦環:グライダー型潜水艇の設計に関する研究(その 8), 生産研究, Vol.43, No.3, pp.165 - 167, 1991.
- [33]川口勝義,浦環,友田好文,小林平八郎:シャトル型海中ロボットを用いた海洋計測,第 1 2 回海中工学シンポジウム, pp.24 - 25, 1994.
- [34]藤井輝夫,浦環,黒田洋司:自律型海中ロボットの知的行動の研究ーその 2 :テストベッド Twin-Burger の建造ー,生産研究, Vol.45, No.10, pp753 - 757, 1993.
- [35]藤井輝夫,浦環,黒田洋司:自律型海中ロボットの知的行動の研究ーその 3 :テストベッド Twin-Burger の動作試験ー,生産研究, Vol.45, No.10, pp758 - 761, 1993.
- [36]藤井輝夫,浦環,黒田洋司:自律型海中ロボットの知的行動の研究ーその 4 :スライディングモードを用いた運動制御ー,生産研究, Vol.45, No.11, pp805 - 808, 1993.
- [37]藤井輝夫,浦環,黒田洋司,荒牧浩二,能勢義昭,千葉裕之:海中ロボットの知能化に関する研究ーその 1 :汎用テストベッドの開発と水槽実験ー,日本造船学会論文集,第 1 7 4 号, pp.903 - 915, 1993.
- [38]藤井輝夫,浦環:自律海中ロボット「ツインバーガー」の開発, TECHNO-OCEAN'96, pp.421 - 426, 1996.
- [39]浦環:自律型海中ロボット「アールワン・ロボット」, 海洋産業定例研究会資料, pp.1-6, 1996.
- [40]大和裕幸,浦環,菅野崇,坂巻隆:海洋観測用 A U V 「R-one Robot」の航行システムの構築, TECHNO-OCEAN'96, pp.461 - 466, 1996.
- [41]小原敬史,浦環,山本喜多男,前田久明,大和裕幸:長時間可動が可能な航行型海中ロボットの研究開発, 第 12 回海中工学シンポジウム, p.6, 1996.
- [42]浦環,小原敬史:閉鎖式ディーゼルエンジン・システムを搭載した A U V 「アールワン・ロボット」の田辺市沖の自律航行,日本造船学会誌第 812

- 号, pp.113 - 118, 1997.
- [43]Kato, N. and Endou, M.:Guidance and Control of Unmanned, Untethered Submersible for Rendezvous and Docking with Underwater Station, OCEANS'89, Vol.3, pp804 - 809, 1989.
- [44]Asakawa, K., Kojima, J., Ito, Y., Shirasaki, Y. and Kato, N.:Development of Autonomous Underwater Vehicle for Inspection of Underwater Cables, Proc. of UNDERWATER INTERVENTION '93, pp208 - 216, 1993.
- [45]Ito, Y., Kato, N., Kojima, J., Takagi, S., Asakawa, K. and Shirasaki, Y.: Cable Tracking for Autonomous Underwater Vehicle, Proc. of 1994 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, pp218 - 224, 1994.
- [46]Kato, N., Ito, Y., Kojima, J., Takagi, S., Asakawa, K., and Shirasaki, Y.,:Control Performance of Autonomous Underwater Vehicle "AQUA EXPLORER 1000" for Inspection of Underwater Cables, Proc. of OCEAN'94, pp. I135 - I140, 1994.
- [47]加藤直三,伊藤嘉彦,小島淳一,浅川賢一,白崎勇一:海底ケーブル探査用自律型無人潜水機の運動制御 (その2 ケーブルトラッキング制御), 日本造船学会論文集,第 175 号, pp.219 - 226, 1994.
- [48]小島淳一: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, 計測と制御誌 Vol.36, pp.784 - 787, 1996.
- [49]海底ケーブル調査用自律走行式水中ロボット AQUA EXPLORER 1000,KDD R&D, No.155, pp5 - 20, 1996.
- [50]加藤直三,小島淳一,加藤洋一,松元重貴,浅川賢一:改訂ケーブル探査用自律型無人潜水機の機体形状の最適化,日本造船学会論文集第 182 号, pp.207 - 215, 1998.
- [51]小島淳一,加藤直三,浅川賢一,加藤洋一:自律走行式水中ロボットによる海底ケーブル調査, 第 11 回海洋工学シンポジウム, pp.203 - 210, 1998.
- [52]Yoerger, Cooke, and Slotine: The Autonomous Benthic Explorer ABE: An AUV Optimized for Deep Seafloor Studies, Proceedings of Unmanned Untethered Submersible Technology'91, pp.60 - 70, 1991.
- [53]Glynn.J., and Blindberg.D.R.: The UNH Eave-East Vehicle, Proceedings of OCEAN81,

- pp.104 - 108, 1981.
- [54]Bellingham: An Autonomous Submersible Designed for Software Development, Proceedings of OCEANS'89. pp.3 - 8, 1989.
- [55]E.A.Barros, H.Maeda, H.Yamato, S.Miyajima: A Cooperative Distributed Control System for an Underwater Vehicle, TECHNO-OCEAN'92, pp.325 - 332, 1992.
- [56]Stenovec, G.M., Goode, J.W. and Haselton, F.R. :The Tandem Propeller System, Proceedings of ROV'87, pp.257 - 261, 1987.
- [57]難波直愛,清水徹,渡辺永彦,星野徹二:全方向推力推進器の開発(その1), 関西造船協会論文集,第210号, pp.1-8, 1988.
- [58]極限作業ロボット技術研究組合海洋部会,海底石油生産施設支援ロボットの研究開発,極限作業ロボット研究開発成果発表会予稿集, pp.155 - 186, 1990.
- [59]星野徹二:V A R I V E Cプロペラ,次世代船開発のための推進工学シンポジウム,日本造船学会, pp.391-405, 1991.
- [60]永松哲郎:無索式無人潜水機の運動性能に関する研究,三菱重工技報, pp.55-59, 1990.
- [61]永松哲郎,石黒慎二:全方向推力推進器を備えた無人潜水艇の研究,自律探査潜水艇に関するセミナー講演論文集, pp.W8J-1 - W8J-27, 1990.
- [62]渡辺和夫,三島智範,中野民雄,稲垣雅也,岩崎泰典:3次元推進器"バリベックプロペラ"の開発(第1報),川崎重工技報,101号, pp.23 - 30, 1988.
- [63]渡辺和夫,岩崎泰典,田中泰太郎,井床利之,日野満伸,岡田正之,3次元推進器"バリベックプロペラ"の開発(第2報),川崎重工技報,104号, pp.30 - 38, 1989.
- [64]指方顕:高速魚種画像識別装置の開発研究,長崎県工業技術センター研究報告, pp.17 - 23, 1991.
- [65]指方顕:マルチプロセッサによる魚種識別の高速化,平成7年度電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, pp.1133, 1995.
- [66]黒川不二雄,浅野睦喜,矢野智裕,松尾博文:マルチプロセッサを用いた高速画像処理システムについて,信学技報, DSP92-35, pp.37 - 41, 1992.

- [67]榎本常利,矢野智喜,周景鎧,指方顕,黒川不二雄,松尾博文:高速魚種識別システムにおける画像分割処理アルゴリズムの効率化について,平成5年度電気関係学会九州支部連合大会講演予稿集, pp.1225, 1993.
- [68]黒川不二雄,榎本常利,周景鎧,松尾博文:テクスチャ解析による魚体の色特徴抽出について,第25回画像工学コンファレンス論文集, 3-3, pp.79 - 82, 1994.
- [69]榎本常利,周景鎧,黒川不二雄,松尾博文:テクスチャ解析による魚種識別について,平成6年度電気関係学会九州支部連合大会論文集, pp.
- [70]矢野智裕,榎本常利,浅野睦喜,指方顕,黒川不二雄,松尾博文:部分画像処理にヒストグラム法を適用した高速魚種識別システムについて,平成5年度電気関係学会九州支部連合大会論文集, pp.1227, 1993.
- [71]島立征夫,パターン計測技術応用による魚の種類、大きさの選別,日本食品工業学会誌, Vol.32, No.4, pp.70 - 80, 1985.
- [72]島立征夫,野村良忠,井出俊之,伊藤修慈:パターン計測技術応用の魚種一魚の自動選別装置, 三菱電機技報, Vol.56, No.3, pp.44-48, 1982.
- [73]N.J.C.Strachan:Recognition of fish species by colour and shape, Image and Vision Computing, Vol.2, No.1, pp.2-10, 1993.
- [74]磯部義明, 大久保なつみ, 山本真司, 鳥脇純一郎,小畑秀文: 孤立陰影抽出用 Quoit フィルタの性質とその乳癌 X線陰影抽出への応用, 電子情報通信学会論文誌(D-2), Vol.1-J76, D-2, No.2, pp.279 - 287, 1992.
- [75]金華栄, 小畑秀文: 多重構造要素を用いたモルフォロジフィルタによる微少石灰化画像の抽出,電子情報通信学会論文誌(D-2), Vol.1-J75, D-2, No.7, pp.1170 - 1176, 1992.
- [76]山本真司,田中一平,千田昌弘,館野之男,飯沼武,松本徹,松元満臣:肺癌検診用 X線CT (LSCT)の基本構想と診断支援用画像処理方式,電子情報通信学会論文誌(D-2) Vol.1- J76, D-3, No.2. pp.250 - 260, 1993.
- [77]山本真司:孤立性陰影抽出用 Quoit フィルタの性質とその癌病巣抽出への応用, Medical Imaging Technology, Vo.12. No.1, p.67 - 73, 1994.
- [78]山本真司,中山正人:3次元モルフォロジカルフィルタによる肺癌病巣陰

- 影の自動認識,画像の認識・理解シンポジウム講演論文集, pp.89 - 96, 1994.
- [79]江浩,今尾雅尚,山本真司:モデル駆動型画像解析アルゴリズムを用いた3次元頭部MRI場像中の軟部組織の自動抽出,医用電子と生体工学, Vol.3, No.3, pp.214 - 222, 1995.
- [80]顧力翔,田中直樹,金子豊久,R.M.Haralick:表紙画像からの文字領域抽出方式,電子情報通信学会論文誌 Vol.J80-D-2, No.10, pp.2696 - 2705, 1997.
- [81]苗村昌秀,福田淳,水谷肇伸,和泉吉則,山口孝一,二宮佑一: Morphology 処理による画像テクスチャ方向性検出と折り返し雑音除去を目的とした非線形フィルタ処理,電子情報通信学会論文誌 Vol.J80-D-2, No.10, pp.2733 - 2743, 1997.
- [82]横井茂樹, 鳥脇純一郎, 福村晃夫: 画像処理のための2次元フィルタリングの1次元分解について, 電子情報通信学会論文誌(D), Vol.1-J61-D, No.7, pp.512 - 513, 1978.
- [83]仁保勉,江浩,山本真司:各種モルフォロジー演算アルゴリズムの演算速度の比較,信学技法 PRU-94-9, 1994.
- [84]Y.Yanuardi,T.Adiono, and T.L.R Mengko: TMP5X5T1M: A Configurable Binary Morphological and Template Matching Processor, Proceedings of MVA'96 IAPR Workshop on Machine Vision Applications, pp.174 - 177, 1996.
- [85]Y.Fujita,N.Yamashita, and S.Okazaki: IMAP-VISON: An SIMD Processor with High-Speed On-chip Memory and Large Capacity External Memory,Proc. of MVA'96 IAPR Workshop on Machine Vision Applications, pp.170-173, 1996.
- [86]小畑秀文:モルフォロジー,コロナ社刊,1996
- [87]Charkes R. Giardina, Edward R. Dougherty: Morphological Methods in Image and Signal Processing, Prentice-Hall,Inc, 1988.
- [88]Jean Serra:Image Analysis and Mathematical Morphology Vol.1, Academic Press, 1990.
- [89]Jean Serra:Image Analysis and Mathematical Morphology Vol.2, Academic Press, 1990.
- [90]P.E.Undrill,Digital Image Processing and the Application of the Transputer, IOS PRESS, pp.1-25, 1992.
- [91]長嶋豊, Jamal Tariq Mian, 石松隆和, 溝上孝章;可変ベクトル推進器を用い

た無索式海中ロボットの基本制御～第1報 ロボットの構築と水槽実験～, 西部造船会会報第98号, pp.151 - 160, 1999.

- [92]Yutaka Nagashima, Takakazu Ishimatsu, Jamal Tariq Mian; Implementation of a Distributed Control System for Autonomous Underwater Vehicle with VARIVEC Propeller, Proceedings of the 14th Korea Automatic Control Conference, pp.E9 - E12, 1999.
- [93]Yutaka Nagashima, Jamal Tariq Mian, Takakazu Ishimatsu; Development of Compact Autonomous Underwater Vehicle Using Variable Vector Propeller, Proceedings of 30th International Symposium on Robotics, pp.347 - 354, 1999.
- [94]Jamal Tariq Mian, Yutaka Nagashima, Takakazu Ishimatsu; Underwater Vehicle control by Acoustic Communication System, Proceedings of the 3rd International Workshop on Advanced Mechatronics, pp.146 - 151, 1999.
- [95]Yutaka Nagashima, Takeshi Nakazono; Modular, Transputer-Based Traveling Control System for Mobile Robot, Proceedings of the 5th Transputer/Occam International Conference, pp.121 - 129, 1993.
- [96]Yutaka Nagashima, Takeshi Nakazono, Takakazu Ishimatsu; Parallel Implementation of Feature Extraction Using Morphological Filter, Proceedings of MVA'96 IAPR Workshop on Machine Vision Applications, pp.426 - 429, 1996.
- [97]Yutaka Nagashima, Takeshi Nakazono, Takakazu Ishimatsu; An Efficient Feature Extraction for Fish Discrimination Using Morphological Filter, Proceedings of the 2nd International Workshop on Advanced Mechatronics, pp.34 - 37, 1997.
- [98]Yutaka Nagashima, Takeshi Nakazono, Takakazu Ishimatsu; A Morphological Approach to Feature Extraction for Fish Discrimination Robot, Proceedings of the third International Symposium on Artificial Life and Robotics, pp.626 - 629, 1998.
- [99]Yutaka Nagashima, Takakazu Ishimatsu; A Feature Extraction for Fish Recognition Using Morphological Filter, Proceedings of Meeting on Image Recognition and Understanding, pp.301 - 306, 1998.
- [100]Yutaka Nagashima, Takakazu Ishimatsu; Recognition of Fish Species Using Morphological Filters, Proceedings of 3rd International Conference on Advanced

- Mechatronics, pp.103 - 108, 1998.
- [101]Yutaka Nagashima,Takakazu Ishimatsu;A Morphological Approach to Fish Discrimination, Proceedings of MVA'98 IAPR Workshop on Machine Vision Applications, pp.306 - 309, 1998.
- [102]日本造船学会海中技術専門委員会編, 海中技術一般, 成山堂書店, 1992.
- [103]菊池年晃:水中音響機器と海洋観測, 第11回海洋工学シンポジウム pp.51 - 58, 1992.
- [104]海洋音響－基礎と応用－, 海洋音響研究会刊, pp.12 - 13, 1993.
- [105]超音波とその使い方, 日刊工業新聞社刊, 1987.
- [106]X I L I N X プログラマブル・ロジックデータブック, pp2 - 15, 1994/1995.
- [107]X I L I N X - THE PRACTICAL DESIGNER LAB BOOK -, p31, 1995.
- [108]若松清志, ロボットの制御, 計測自動制御学会刊, P239, 1985.
- [109]長谷川純一, 興水大和, 中村晶, 横井茂樹, 画像処理の基本技法, 技術評論社, (1986), pp41-43.
- [110]Inmos 刊: Transputer Databook, 1985.
- [111]山本正樹: Occam, 日刊工業新聞社刊, 1991.
- [112]Ronald S. Cok, 梅尾博司監訳, 松田稔, 丸山公雄, 山本正樹訳: トランスピュータ/occamによる並列プログラミング入門, 共立出版刊, 1993.