

自航式ビークル「HORNET—500」の開発

青木太郎^{*1} 服部陸男^{*1} 野本昌夫^{*1}
高橋賢一^{*1}

水深200mまで使用できる自航式ビークル JTV-1 を開発し、運用した経験からさらに水深500mまでの海底地質、生物、海中構造物等の調査に使用できるビークルを開発中である。良質なテレビ画像情報、信号伝送を確保するために光ファイバーと電力線を組み込んだ外径7mmのテザーケーブルを開発した。8ビットマイクロコンピュータを内蔵した船上の制御装置とビークル間の光波長分割多重通信によるデータ伝送、ビデオ信号伝送は、良好な結果が得られた。ビークル本体は、耐食アルミニウム合金製の球（外径430mm厚さ5mm）2個がアルゴン溶接により接合されている。中央部に2基（DC80W）、左右両側に2基（DC120W）のスラスタを有する。ビークル内部には、チルト機構付きの高品質カラTVカメラと低照度白黒TVカメラを装備している。

FIBER-OPTIC TETHERED VEHICLE “HORNET 500”

Taro Aoki^{*2} Mutsuo Hattori^{*2}
Masao Nomoto^{*2} Ken-ichi Takahashi^{*2}

A small vehicle “HORNET,” which is controlled using an optical fiber cable (800 m in length), is currently under development. The vehicle can be used for geological and biological surveys, and for inspecting submarine structures up to a depth of 500m.

A slender tether cable (7mm in diameter) which has two graded-index-multi-mode-optical fibers (50/125 μ m) and a pair of electric power lines (0.32mm x 7) was developed in order to receive high-quality-color TV signals, control digital signals, and to reduce water

*1 海洋利用技術部

*2 Marine Exploitation Technology Department

resistance. The optical-wavelength-division-multiplexing transmission system between the onboard computer and undersea electronic units was tested, and the results were excellent.

The vehicle has two spherical aluminum hulls (about 430mm in diameter and 5mm in thickness) jointed with a cylinder, and four thrusters (two attached on the cylinder (DC 80W) and the others on both sides of the vehicle (DC 120W)).

A high-quality color TV camera (broadcasting grade) and a low light black and white TV camera (0.5 Lux) were set on tilt devices in the spherical hulls with acrylic dome ports (15mm in thickness, 90° sector angle).

1. まえがき

近年、海底石油開発、海洋構造物等の海洋開発の進展にともなって調査・作業を行う自航式ビークルが、飛躍的に増加している。使用深度も200m以下の浅海から500m以上の深度で使用できる機種が増加しつつあり、世界中で250台(1982年末の統計)以上が建造されてる。わが国では、浅海用が10台程度建造されているだけで、500m級以上の無人探査機は建造されていない。

海洋科学技術センターでは、ケーブルを極力細くしてビークルの運動性能を高め、高品質なテレビ画像を得られるビークルを開発するため、昭和57年(1982)より500m級の無人探査機「ホーネット」の設計を始め、制御システム、テザーケーブル、通信システム等の性能テストを行って来ている。船上装置とビークル間の通信手段として光ファイバーを用いた光通信方式を採用した。ケーブルで船上装置と結ばれたビークルは、ケーブルが受ける水の抵抗によりその運動性能が制約される。推進装置に使用する電動機から発生する誘導ノイズ

等の電気的外乱に強く、低損失で広帯域の特性をもつ細径の光ファイバーを用いたテザーケーブルは、流体抵抗も少なく、自航式ビークルの通信手段として最適と考えられる。今回のHORNETのテザーケーブルは、昭和56(1981)年から実施してきた古河電気工業(株)との共同研究によって開発した光・電力線の複合ケーブルを使用している。

2. システム構成の概要

制御システムは、先に開発し、実用化されている200m級ビークルJTV-1^{1), 2), 3), 4)}の制御方式を基礎にして、演算速度を2倍(基本クロック4MHz)に高め、データ表示方式等オペレータの操縦性を高める機能を追加した。

本システムの概略構成図を図1に示す。船上装置は、電源ユニット、制御ユニット、光通信ユニット、TVモニター、コントロールボックス、ケーブルおよびケーブルリールから構成される。水中部は、ビークル本体と重錘から構成される。

本システムの主な仕様を表1に示す。

表1 ホーネットの仕様
Specifications of HORNET-500

項目 item	仕様 specifications
使用深度 operation depth	500m
寸法 dimension	120(L)×96(W)×56(H) (cm)
重量 weight	約120 kg
浮力 buoyancy	約1 kg about 1 kg
速度 speed	最大3ノット max. 3kt.
構造 structure	アクリルドーム(厚さ15mm)窓付耐食アルミニウム合金製耐圧球殻(外径43cm)2個の内部に各種装置を収納 electronics and sensors are installed in two spherical pressure hulls of casted aluminum alloy with acrylic dome ports (thickness 15mm)
電源 power source	AC 1,100V 3kVA
スラスタ thrusters	DC 100V, 120W ×2 DC 100V, 80W ×2
ビークル装備 Vehicle instrumentation	1) カラーTVカメラ 最低照度80Lux S/N 53dB color TV camera sensitivity 80Lux 2) 白黒TVカメラ 最低照度0.3Lux S/N 44dB black and white TV camera sensitivity 0.3Lux 3) ハロゲンランプ 300w×2, 150w×2, (300w×2) halogen lamp 4) 方位計 compass 5) 回転角速度計 rate gyro 6) 深度計 depth sensor
船上機器 deck equipment	1) コンピュータコントロール ユニット computer control unit 2) 光通信コントロール optical fiber communication unit 3) VTR 4) モニタテレビ monitor TV 5) 電源 power unit
ケーブル tether cable	800m, 7mmφ

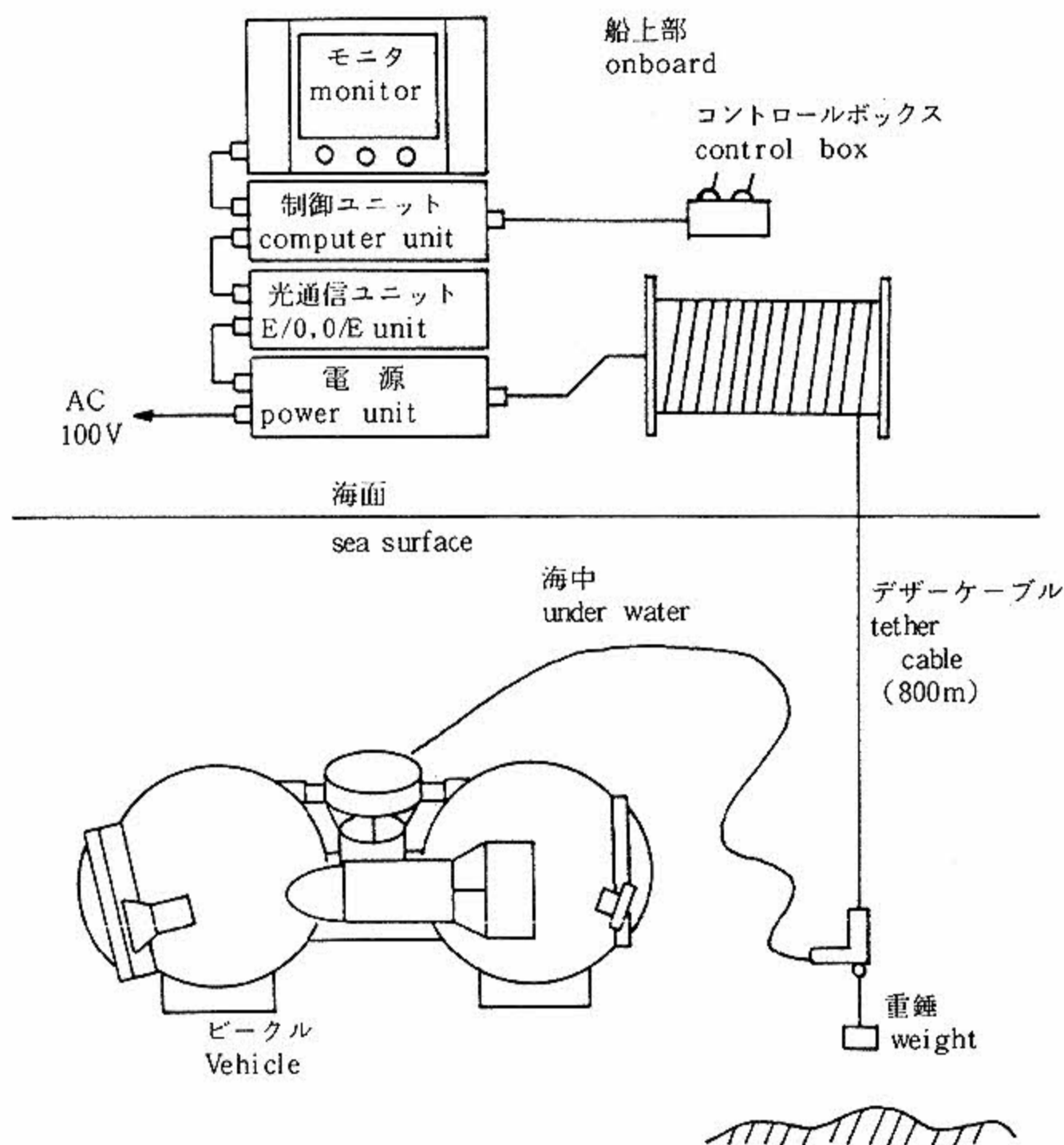


図1 HORNET 500 のシステム
System description



写真1 船上制御システム
Onboard control system

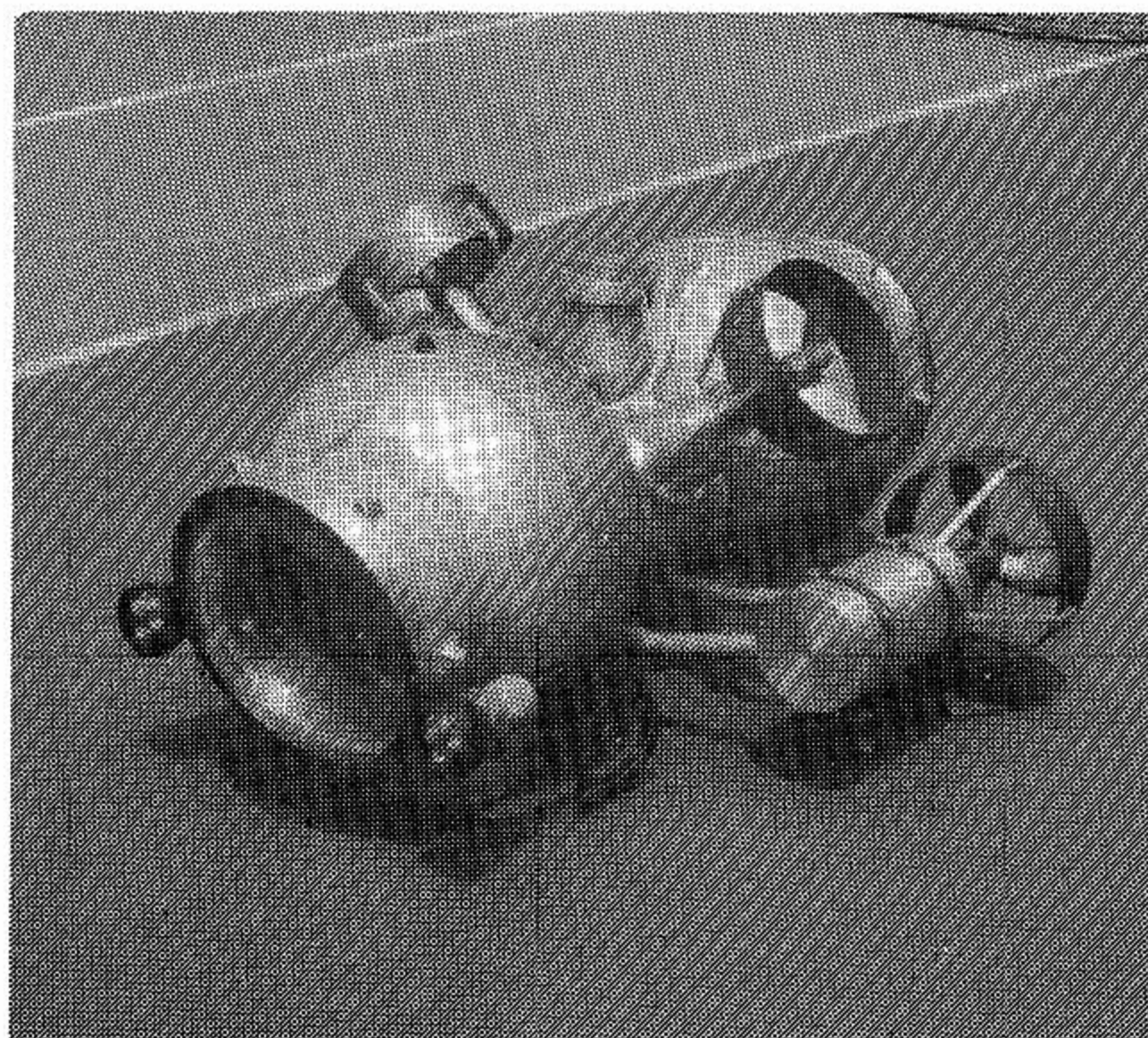


写真2 ビークル (HORNET-500)
Vehicle

3. ビークルの形状と構造

制御回路、TVカメラ等搭載ユニットをなるべく同一耐圧殻に納める方式を採用した。この方式は、故障要因を減少させ、耐圧殻自体の浮力を生かすことによりシタックチックフォーム等の浮力材を必要とせず、小型軽量化できる利点がある。

ビークル本体は、外径430mm、厚さ5mmの耐食アルミニウム合金球2個を、外径200mm、長さ160mm、厚さ10mmの高張力アルミニウムパイプで接合し、前後球の下部に、1KVAのトランス2セットが収納できる外径195mm、高さ140mmの円柱を取り付けた構造である。

上下および左右進用バーティカルスラスタ2基は、中央のパイプの斜め上部に取り付けられている。前後進および回頭用サイドスラスタ2基は、ビークル本体の左右中央部にアルミパイプで支持されている。サイドスラスタと支持フレームは、輸送の簡便さを考慮して、本体より着脱できる。

ビークルの前後球の内部にTVカメラが設置されている。このTVカメラの透視窓として厚さ15mm扇形角90°の亚克力樹脂製のドームポートを用いている。亚克力ドームは、アルミニウム製取り付けフランジに固定され、ビークル本体と着脱する。前球の亚克力ドームは、ビークル下方の視野を得るため水平から下に約10度傾斜して取り付けられている。

デザーケーブル引き留めを兼ねる水中コネクタ

は、ビークル中央上部に取り付けられる。テザーケーブルは、曲げ半径120mm以下に湾曲すると内部の光ファイバが破損する恐れがある。また、1%以上伸延すると光ファイバが破断する可能性がある。このため引き留め部は、当初考えていた寸法より大きなものになった。

4. デザークケーブル

現在開発されてる光ファイバには、ステップインデックス形マルチモード (S I形)、グレーデッドインデックス形マルチモード (G I形)、シングルモードの3種類がある。

S I型は、モード分散が大きいため伝送帯域が狭く長距離伝送には適さない。

シングルモードファイバは、モード分散がなく伝送帯域が100GHz/km以上と、長距離大容量伝送が可能であり、しかも耐圧特性が良い⁵⁾。しかしコア径約10 μ mと細いため接続精度の高い光ファイバコネクタを使用しなければならず、取り扱いには高度の技術を要する。

G I形光ファイバは、伝送帯域1GHz/km以上で比較的広く、大量生産されて信頼性も高い。G I形光ファイバ用コネクタも電電公社の規格に沿ったコネクタが市販されている。本システムで使用する信号の帯域は、約6MHz \times 2である。特性、経済性、保守性から考えてG I形光ファイバを選択した。

G I形光ファイバは、コア径50 μ m、クラッド径125 μ mである。この光ファイバを繊維強化ブ

ラスチック (FRP) で包み、張力と水圧から保護している。(仕上げ外径1.6mm)。抗張力材として1.2mm径のFRPロッドを使用し、最大30kg、常用120kg以上の張力に耐える。またビークルの動力および制御用電力線として0.32mm \times 7本の撚線を2本使用して、最大8アンペアの電流を供給できる。

外被は、厚さ1.0mmのポリエチレンを使用している(仕上り外径約7mm)。

今後光ファイバを使用する機会が増加すると思われるので海洋科学技術センターの高圧実験水槽に開発した全長800mのケーブルを納め、600気圧(深度6,000m相当)まで加圧し、光ファイバの光伝送損失を測定した。大気圧から600気圧までの光伝送損失の変動は、0.5dB/km(光波長0.85 μ mの光源を使用)と良好な結果を得た。また圧力による損傷等の異常もなかった。

5 光通信システム

今回のシステムで船上装置とビークル間で必要とする信号は、ビデオ信号2系統、船上からビークルへのコマンド信号(DOWNLINK)、ビークルから船上へのステータス信号(UPLINK)の4信号である。1信号に対して光ファイバ1本を対応させる光通信方式は、簡単で安価であるが光ファイバ芯数が増えてケーブル外径が太くならざるを

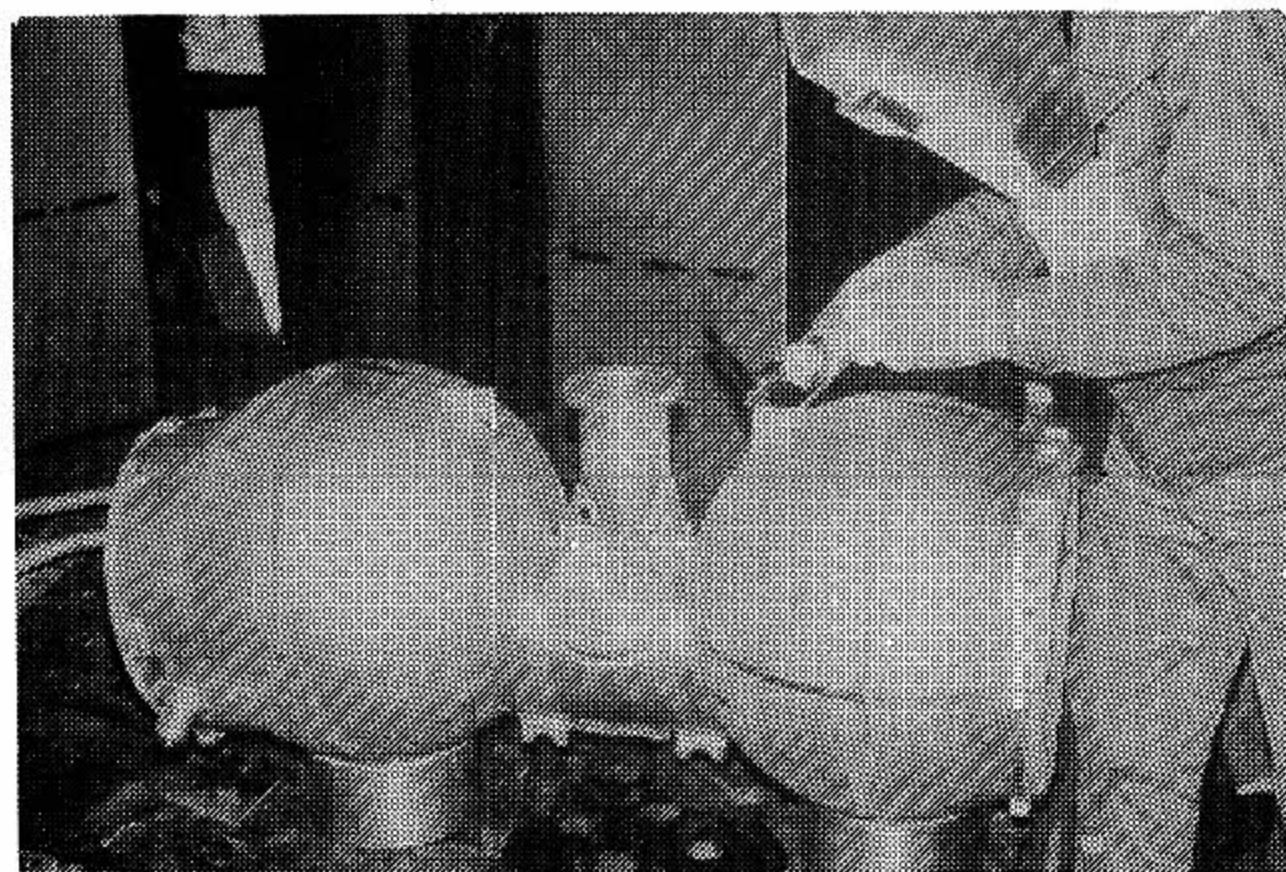


写真3 耐圧殻の溶接過程

Welding process of the pressure hulls



写真4 ケーブルの耐圧試験

Pressure test of the cable

えない。一方、1本の光ファイバに異なる波長の複数の光を通して通信する光波長分割多重方式は、光ファイバ芯数を減少させケーブルを細くできる。しかし、多重する光波長数が多くなると、高強度発光の光源素子を必要とし、光波長ドリフトの抑制も問題となる。また、光通信装置が大きくなり、取り扱いに高度の技術を要し、価格も高くなる。

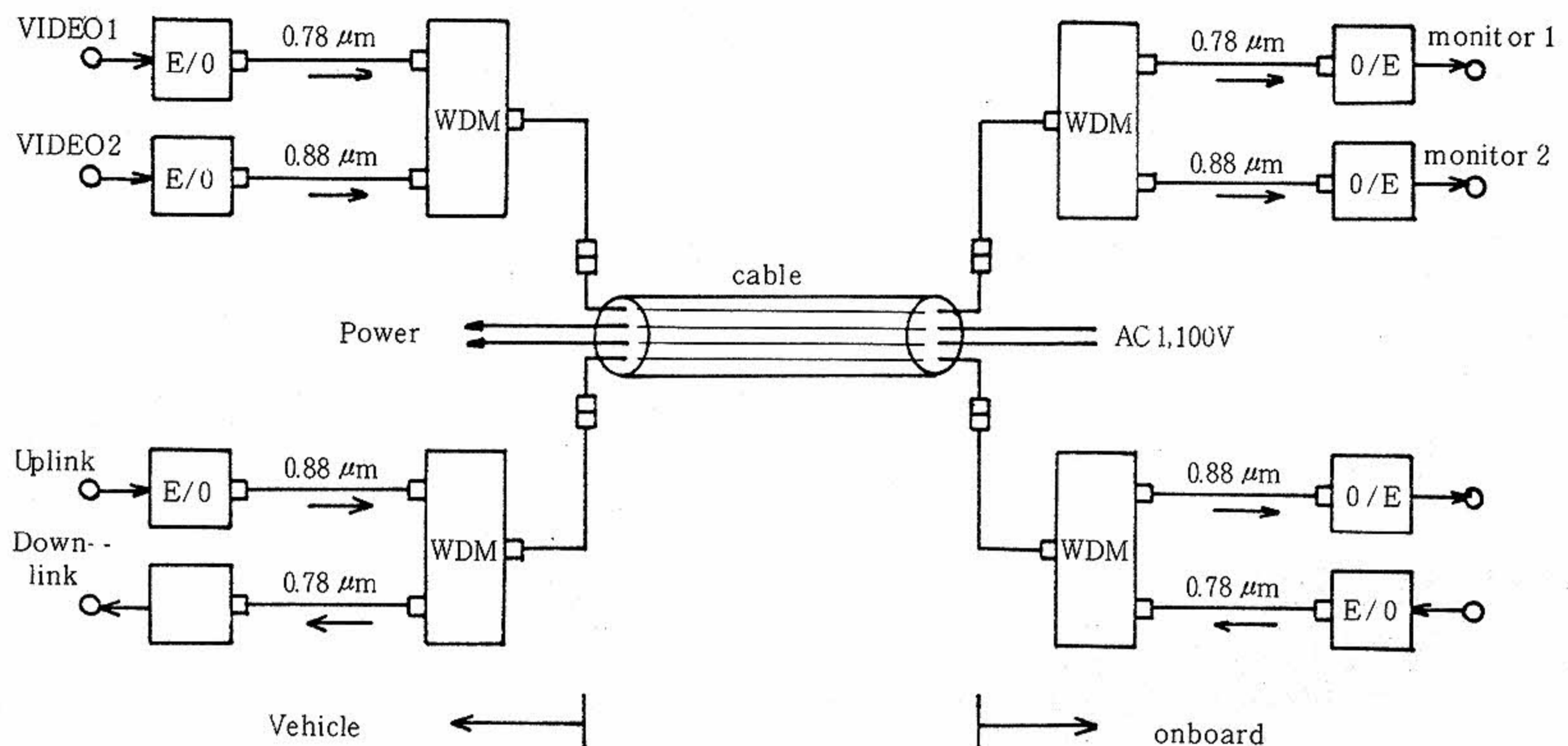
本システムでは、光ファイバ2本を用いて、1本の光ファイバに2波長を通す光多重方式を採用した。1,000m級伝送では、比較的安価で信頼性も高いと考えられる。

使用した光通信方式を、図2に示す。

第1の光ファイバには、ビデオ信号(NTSC)2系統を光波長 $0.78\mu\text{m}$ 、 $0.88\mu\text{m}$ の2波を用いて船上へ伝送する。伝送方式は、直接光強度変調のアナログ伝送である。光送信器E/Oは、ビデオ信号(30HZ-6MHZ, 1VP-P/75Ω)をアンプ回路により増幅し、補正回路により等価補正したのち発光素子(LED)を駆動する。E/Oから出力された光(波長 $0.78\mu\text{m}$ 、 $0.88\mu\text{m}$)は、

多重反射形干渉膜光合分波器(WDM)により1本の光ファイバに2波長を合成した光を出力する。船上の合分波器により2波の光に分波されたのち、光受信器(O/E)に入力し受光素子で電気信号に復調され、アンプ回路(AGC回路内蔵)で増幅し、補正回路で特性補正された後、ビデオ信号を出力する。

第2の光ファイバには、船上らビークルへのコマンド信号と、ビークルから船上へのステータス信号の2信号を双方向伝送する。伝送方式は、NRZ(no return zero)調歩式のデジタル伝送を用いた。船上のコンピュータから出力されるモーター回転数パラメータ等デジタル信号は、光波長 $0.78\mu\text{m}$ の光でビークルへ伝送される。また、ビークルから深度、方位、侵水センサ等のデジタル信号は、光波長 $0.88\mu\text{m}$ の光で船上へ伝送される。ビットレートは、1M bps以上の速度が可能であるが、本システムでは100K bpsで使用している。使用した光デバイスの特性を表2に示す。



- E/O: 電気-光変換器
electronics - optical converter
- O/E: 光-電気変換器
optical - electronics converter
- WDM: 光合分波器
optical wavelength division
multiplexer / demultiplexer

図2 光通信システム
Optical transmission system

表2 光波長分割多重通信方式の仕様
Specification of the optical fiber transmission

諸元 specifications	アナログ analog signal		デジタル digital signal	
波長 (μm) wavelength	0.780	0.880	0.780	0.880
発光素子 light element	発光ダイオード (AlGaAs - LED) lighting emitting diode			
受光素子 transmission element	Si - APD avalanche photo diode		Si - PIN - PD PIN type photo diode	
伝送方向 transmitted direction	ビークル → 船 uplink		ビークル → 船 uplink	船 → ビークル downlink
光ファイバ optical fiber	GI型マルチモード 50/125μm graded index silicon fiber			
伝送距離 transmission distance	800m			
伝送方式 transmission code	光強度変調 intensity modulation		調歩式 (NRZ) asynchronous	
帯域幅 frequency band	30 Hz ~ 6 MHz		—	
伝送速度 bit rate			100 kbps	
S/N	47dB以上		—	
誤り率 error rate	—		10 ⁻⁹ 以下	
光送出レベル output light power	-14.5dB	-14.5dB	-16.9dB	-16.9dB
最小受光レベル input light power	-30.5dB	-29.1dB	-36dB	-36dB
線路損失 line and connectors loss	3dB		3dB	
WDM損失 WDM loss	9dB		9dB	
入出力インタフェース signal interface	1V p-p / 75Ω		TTL - IC	

6. ビークルの装備

6.1 カラーTVカメラ

前方監視用として放送業務用カラTVカメラを使用した。水平解像度400TV本以上, S/N53 dB以上, 最低照度80 Lux以下。レンズは, オートアイリス機構付きの広角3.5倍ズームである。

$f = 6.5 \sim 23\text{mm}$, 対角 $80^\circ 28' \sim 26^\circ 54'$ 水平 $68^\circ 11' \sim 21^\circ 29'$, 垂直 $53^\circ 50' \sim 16^\circ 19'$ 。船上でズーム, フォーカスのリモートコントロールができる。水平から上方へ 30° , 下方へ 60° のチルト機構を有する。

6.2 低照度白黒TVカメラ

後方監視用TVとしては, ニュービコン管を使用した。水平解放度650本以上, S/N44 dB以上, 最低照度0.3 Lux, レンズ $f = 8.5\text{mm}$, 水平 61° , 垂直 53° ,

6.3 ライト

前方にチルト機構付のハロゲンランプ300W(散光型) 2灯, 後方に150W(散光型) 2灯を通常使用する。船上からの切り換え指令により後方2灯を消灯し, 前方300W(集光型)を追加点灯できる。さらにスラスト4基の電力の余力を使用して300W(集光形)を追加点灯できる。したがって前方に大1,200Wのライトを点灯できる。

6.4 マグネットコンパス

32分割の光スリット方式のデジタル出力のコン

パスを使用して, ビークルの方位を検知する。

6.5 レートジャイロ

マイクロコンピュータ演算方式のガスレートセンサを使用した。レートセンサからは, ビークルが回転すると, その回転角速度に応じた電圧が生じる。この電圧を最適サンプリング時間ごとにマイクロコンピュータに入力し積分を行う。演算精度は, センサのドリフト以内に抑えることができた。ドリフト $0.1^\circ/\text{S}$, 検出範囲 $\pm 100^\circ/\text{S}$ 。マグネットコンパスは, 絶体方位を検出できるが, 応答性がよくない。この短所をレートジャイロで補完し, ビークルの操縦性を良くすることができる。

6.6 深度計

半導体ストレインゲージ方式の圧力変換器を使用した。側定範囲は $0 \sim 70\text{kg f/cm}$, ヒステリシス $\pm 1\% \text{FS}$ である。

7. 制御システム

ビークルのスラスト(直流電気モータ)の回転数演算, 自動深度保持, 自動方位保持, テレビカメラ・ライトのチルト制御等ビークルの制御は, 船上のマイクロコンピュータで演算し, 光ファイバを介してビークルに指令する。図3に制御系統図を示す。マイクロコンピュータは, メモリとして4 KbyteのROMと2 KbyteのRAMを装備している(64K byteまで拡張可)。

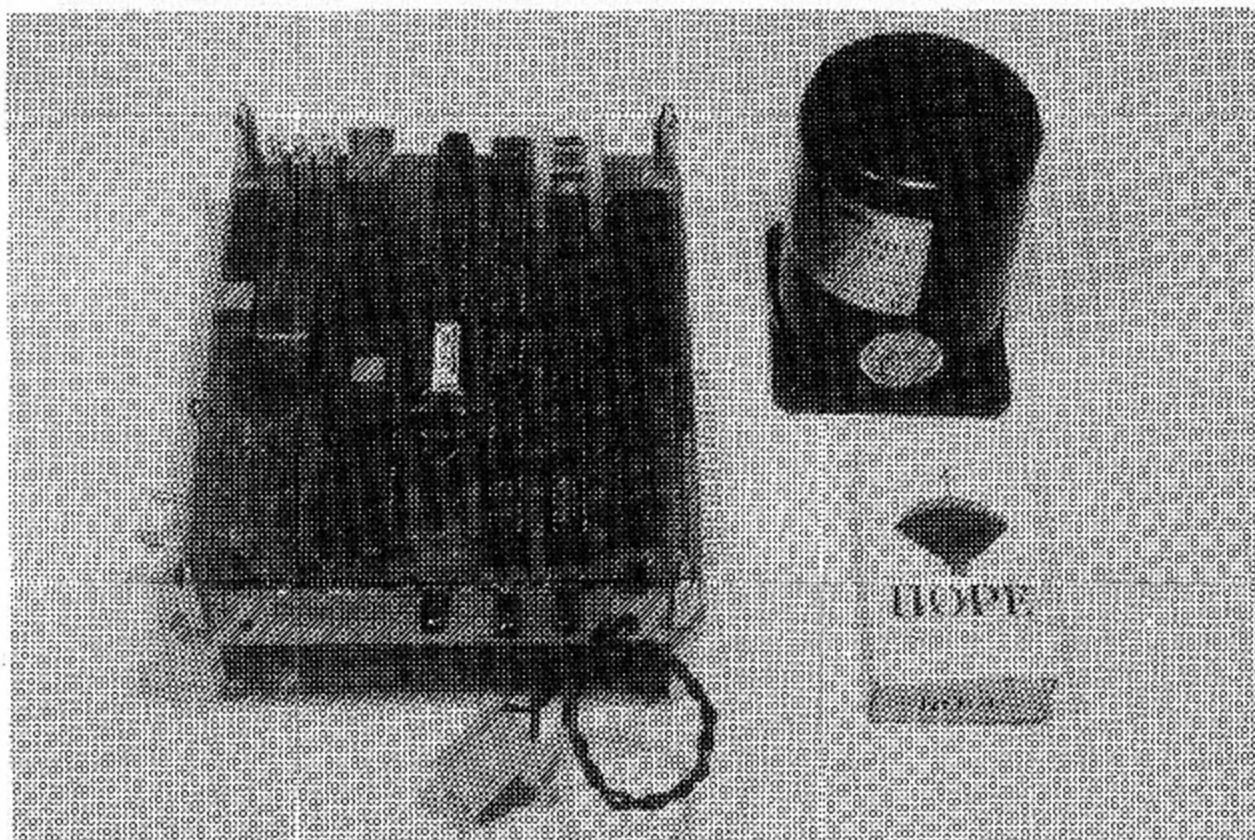


写真5 レートジャイロ
Rate - gyro

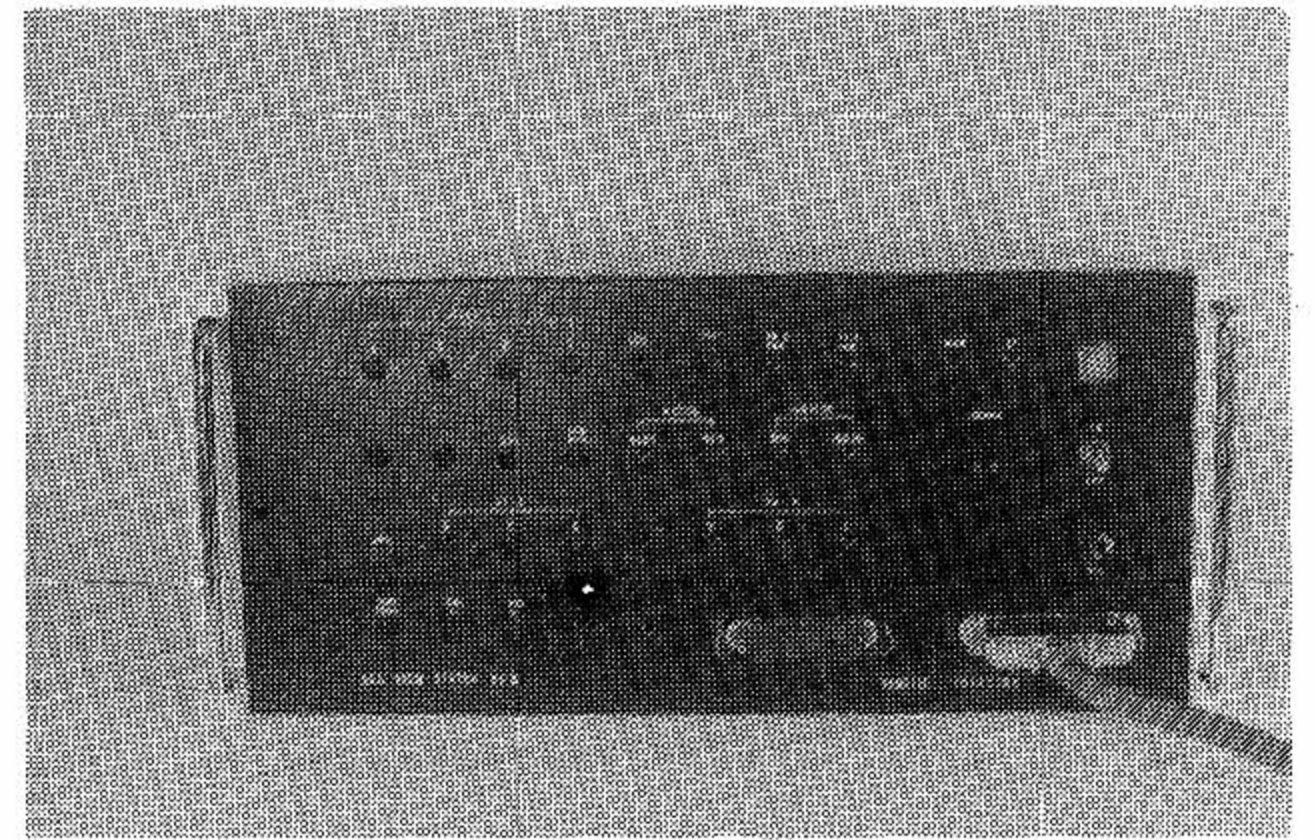


写真6 コンピュータ制御ユニット
Computer control unit

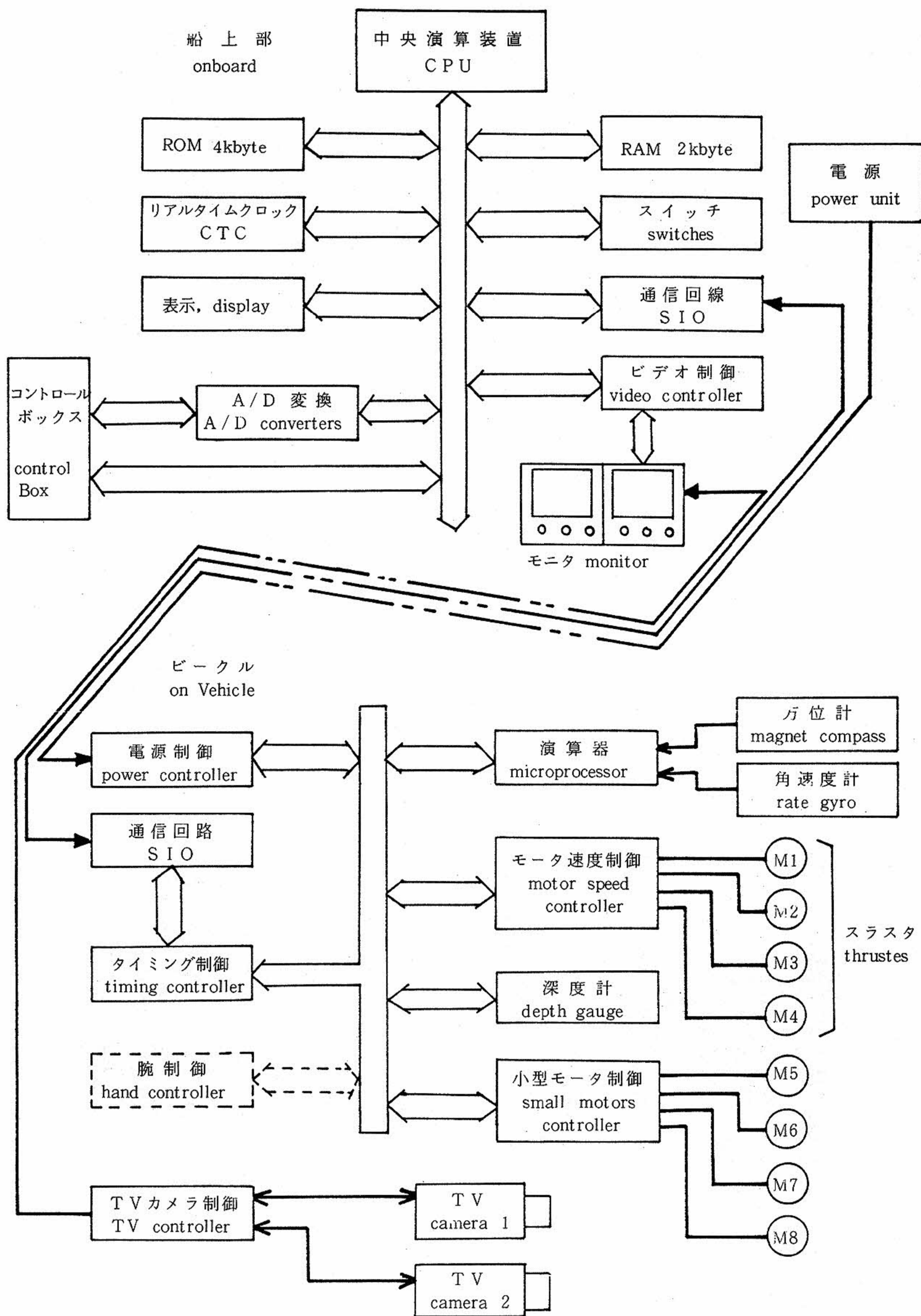


図3 制御系統図
Control block diagram

ビークルの制御用ジョイスティック2本には、おのおのX軸とY軸に2個のポテンショメータがついていて、前後進、左右進、上昇下降、左右回頭のアナログ値を出力する。このアナログ信号は、アナログ/デジタル(A/D)変換回路を介してコンピュータに取り込まれる。この4データとビークルから入力する深度データ、方位データのフィードバックデータを基に演算し、4基のスラストのモータ回転数パラメータを算出する。モータ回転数パラメータは、シリアル伝送で光ファイバを介してビークルのFETサーボ制御回路にラッチされモータを回転させる。

ライトON/OFF、ライトのチルト、カメラのチルト制御は、コントロールボックスに取り付けたスイッチ信号をコンピュータに入力した後、ビークルへ伝送され各制御回路にラッチされる。制御プログラムは、モータ回路数演算、スイッチ制御、表示制御、入力制御、出力制御のタスクに分割され、CTCを用いたりアルタイムクロックで時間管理されている。

オペレータの操作性を良くするために、深度、方位、時刻等のデータをグラフィック表示して、テレビ画面にスーパーインポーズする機能を製作中である。また昭和58年度中に2自由度のハン

ド(腕)を取り付ける予定である。

8. 電源

電源ユニットを写真8に表す。

8.1 船上制御装置用電源

船上の制御システム、TVモニタ、VTRの電源(AC100V)の電圧を自動調整するユニットである。出力電圧AC100V \pm 0.2%以内、容量500VA。

8.2 ビークル用高圧電源

ビークルの消費電力は、約2KVA(スラスト; 約600W, ライト; 1,200W, 制御回路等その他; 約100W)である。テザーケーブルは、最大8アンペアまでの電流を使用できるが、ケーブルの内部抵抗による発熱、電圧降下を考慮して、船上からAC1,100V(单相)の電圧でビークルに電力を供給している。ビークル内にAC1,100VをAC100Vに降圧するトランス(1KVA 2基)が収納されている。ビークル内でAC100V \pm 10%(無負荷-2KVA負荷)の電圧が得られる。また、電力線とアース間が1M Ω (可変)以下になると、1次入力(AC100V)を遮断する漏電検出が付加されている。

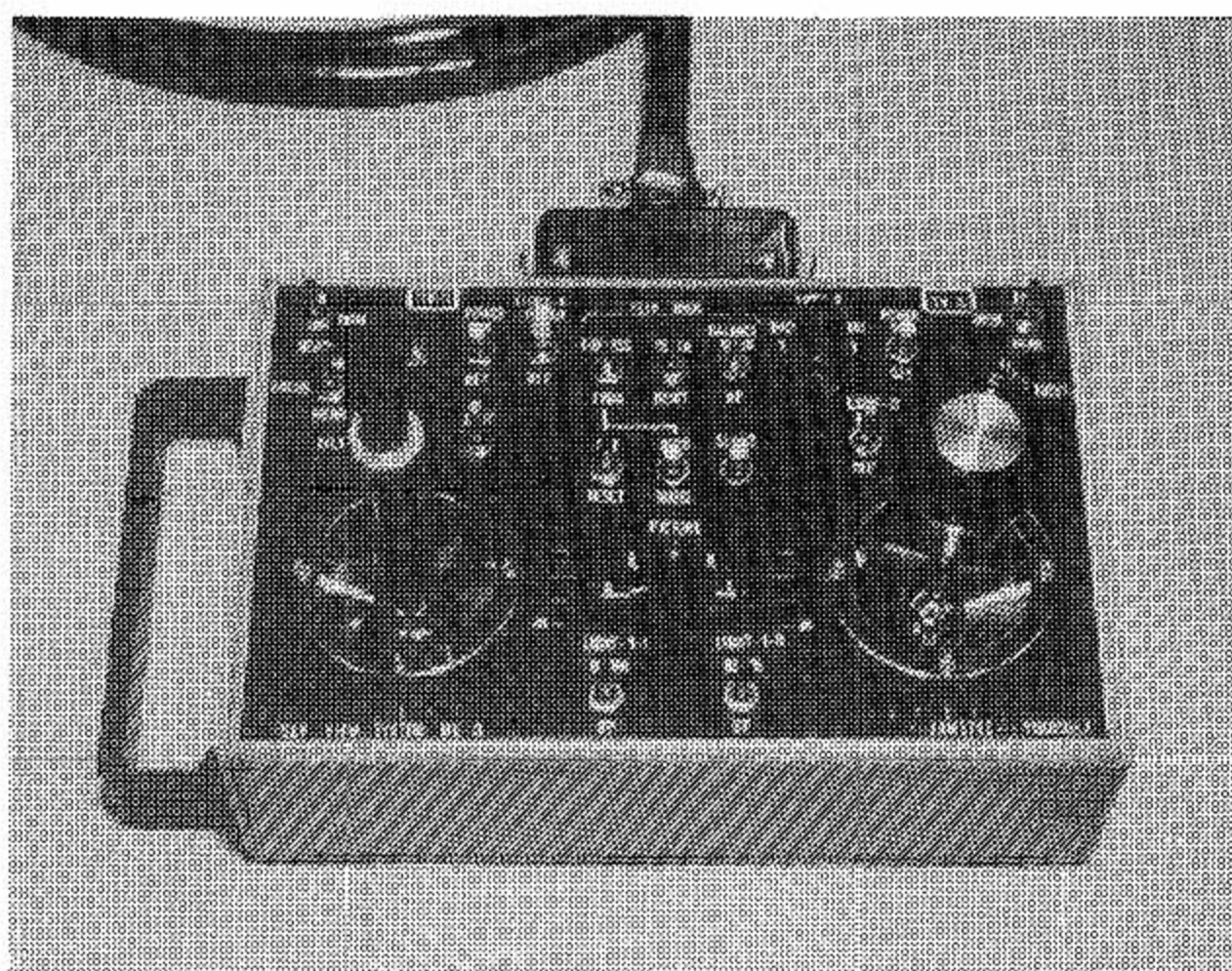


写真7 コントロールボックス
Control box

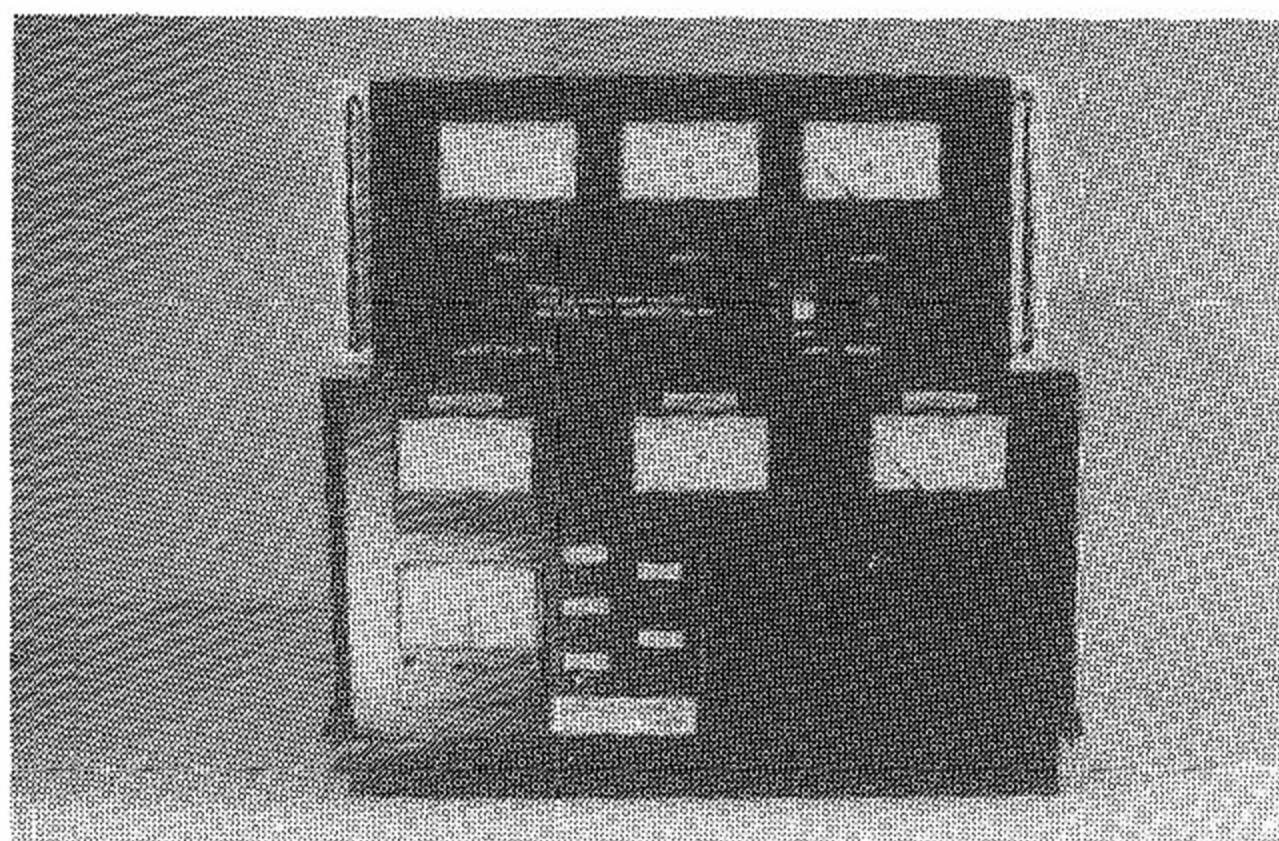


写真8 電源ユニット
Power unit

9. あとがき

昭和58年度は、ビークル本体、船上制御装置等主装置に製作費が費やされ、深度計、マグネットコンパスは、低精度のセンサを使用した。自動制御特性を高めるために、今後精度の高いセンサに替えたい。実海域で運用する場合は、光ファイバケーブルが、曲げ、張力、光損失に制約があるため、揚収装置、ケーブルウィンチ、光スリッピング等の開発しなければならない装置が残されている。とくに、光スリッピングは、1芯のスリッピングが市販されている。しかし、減衰率5dB前後とあまり良くない。本システムに使用するには、光伝送路の変動を考慮して、減衰率3dB以下の光スリッピングが必要となる。

おわりに、この研究を進めるにあたって、電気通信大学の望月仁教授、竹内俱佳助教授、当センター潜水技術部の小黑至、深海開発技術部の小原孝文、電気通信大学実習生の川永義則、佐々木一成の各氏にご協力を頂いた。また、テザーケーブルの共同研究では、古河電気工業株式会社にご協力をいただいた。以上の各位に謝意を表す。

文 献

- 1) 名執薫ほか“ケーブルコントロール式テレビシステムの試作”, JAMSTECTR(5), P.69-78 (1980)
- 2) 服部陸男, 名執薫“ケーブルコントロール式テレビシステムの試作(第2報)”, JAMSTECTR(7), P.25-32 (1981)
- 3) 青木太郎, 服部陸男“自航式ビークルJTV-1の開発と実用試験”, JAMSTECTR(9), P.39-49 (1982)
- 4) Hattri, M.“A Microcomputer Controlled Tethered Vehicle, JTV-1”. Proc.OCEANS 81. Boston, 1981-09, IEEE/MTS, 1981, p.1139-1142.
- 5) 西村真雄ほか.“光ファイバ被覆構造と水圧特性”. 昭和54年度電子通信学総合全国大会予稿集, 1858, P.297.
- 6) Iwamoto, Y. et al. "Fiber-Optic-Tethered Submersible for Searching Submarine Cables". Proc.OCEANS 82. Washington, D.C., 1982-09, MTS/IEEE, 1982, P.65-72.