

小型ROV (Remotely Operated Vehicle) 用制御 システムの開発 (Sea View System MK-III)

青木太郎*¹ 高橋賢一*¹ 服部陸男*¹

ROV 発達の歴史は、電子技術の進展と符合する。集積回路、コンピュータを使用し操作、運動の一部を自動化した ROV が数多く製作されるようになった。TV カメラも白黒からカラーに置換りつつある。高解像度の TV 画像を長距離伝送するため、光ファイバ通信技術が必要となる。高機能化した制御システムは、オペレータの負担を軽減し、より安全な作業環境を生みだしている。

電子技術を駆使し ROV が更に高性能化または知能化する予測のもとに首題の制御システム開発に着手した。高品質の画像、データ伝送を確保するため光ファイバ伝送方式を採用した。制御システムは、マイクロコンピュータを組み込み、ハードウェアの簡略化、拡張性を考慮して設計した。制御プログラムは、ROM に収納されており、コンピュータ立上げに通常必要とする処理を省き、電源スイッチを投入しさえすれば、ROV 運転状態となる方式とした。

A Control System for Small ROVs

Taro Aoki*² Ken-ichi Takahashi*² Matsuo Hattori*²

The history of Remotely Operated Vehicle (ROV) development has paralleled that of electronic technology. Recently, using integrated circuits or computers, a number of the functions and operations of ROVs have been automated. Black-and-white TV cameras have also been replaced with color. In order to transmit high-resolution TV picture signals, optical communication technology is needed. High-efficiency ROV controllers reduce the operators' workload and provide a safer working environment. As it is predicted that ROVs will increasingly be given higher capabilities and intelligence, development of an ROV control system has been started. An optical fiber transmission method is used in order to obtain high-quality video and data signals. The control system incorporates a micro-computer I.C., and has been designed with simplified and expansible hardware.

*¹ 深海開発技術部

*² Deep Sea Technology Department

1. ま え が き

有索方式のROV (Remotely Operated Vehicle) のコントロール方式は、コントロール部を収納する場所によって2方式に大別できる。その1方式は、各スラスト、TVカメラ等のビークル搭載機制御に対応した数量の電線を組み込んだ多芯ケーブルを用いて制御回路の多くを船上に置く方式である。他の方式は、制御信号を多重化し通信回路、機器駆動回路をビークルに搭載し、船上制御回路と1ないしは2本の同軸ケーブル(光ファイバ)を用いて双方向多重通信を行なう方式である。

前者は、ビークル本体を小型軽量で製作費も比較的安価にできる長所をもつ。ケーブルに拘束されながら行動するROVは、ケーブルの径、長さによりその運動性能が左右される。ケーブルで消費される電力を考慮するとケーブルを細径化することが難しく、更に長尺のケーブルに変更しようとする船上の駆動回路、ケーブルを変更あるいは新規設計し直さなければならない。これが前者の欠点である。後者は、ビークル内に通信回路、駆動回路等システム全体の多くを組み込むためビークルの寸法、重量は大きくなるをえず、また、悪環境下のビークル本体に組み込んだ電子部品は、高い信頼性を要求される。しかし、ケーブルを細径化でき、ケーブルの長短に対して比較的簡単に対応できる利点をもつ。

今回開発した制御方式は、後者の方式であり通信ケーブルに光ファイバを用い、数mから2,000mのケーブル長までシステム変更をすることなく対応できる。また、光通信装置とビークル用電力トランスだけの変更で更に大深度のビークルを制御できる。

2. システム構成の概要

本システムは、船上制御装置、ビークル内制御装置、ビークル用給電装置および光電気複合ケーブルから構成される。船上装置とビークル内制御装置は、光ファイバ2本を用いて、2系統のTV画像信号、双方向デジタル信号を送受する。船上装置は、前面アクリル扉、密閉型冷却ユニットを取り付け塩害を考慮した筐体に収納した。

2.1 船上制御装置

船上制御装置は、演算制御ユニットと表示ユニ

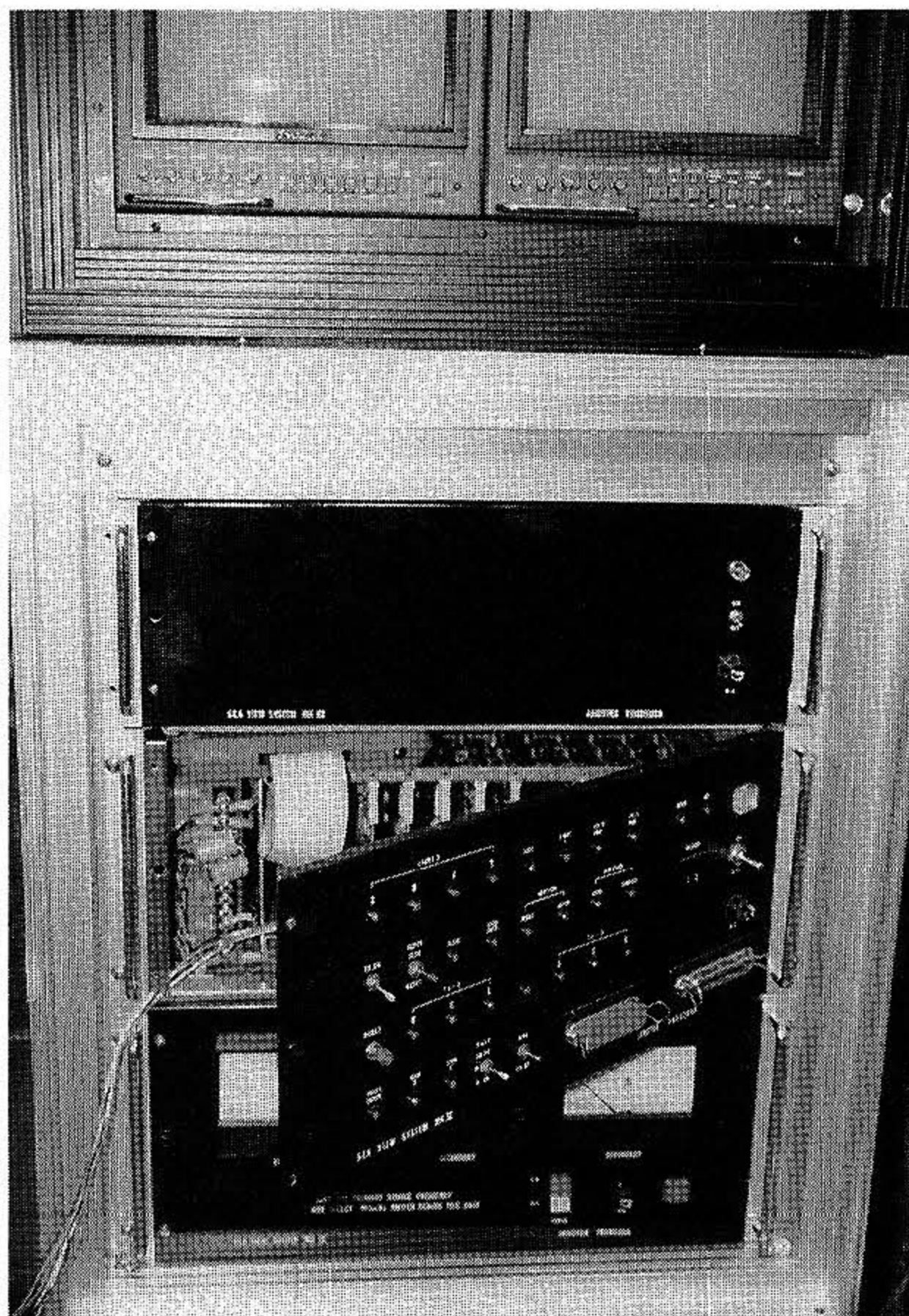


写真1. 船上制御装置
Onboard control unit

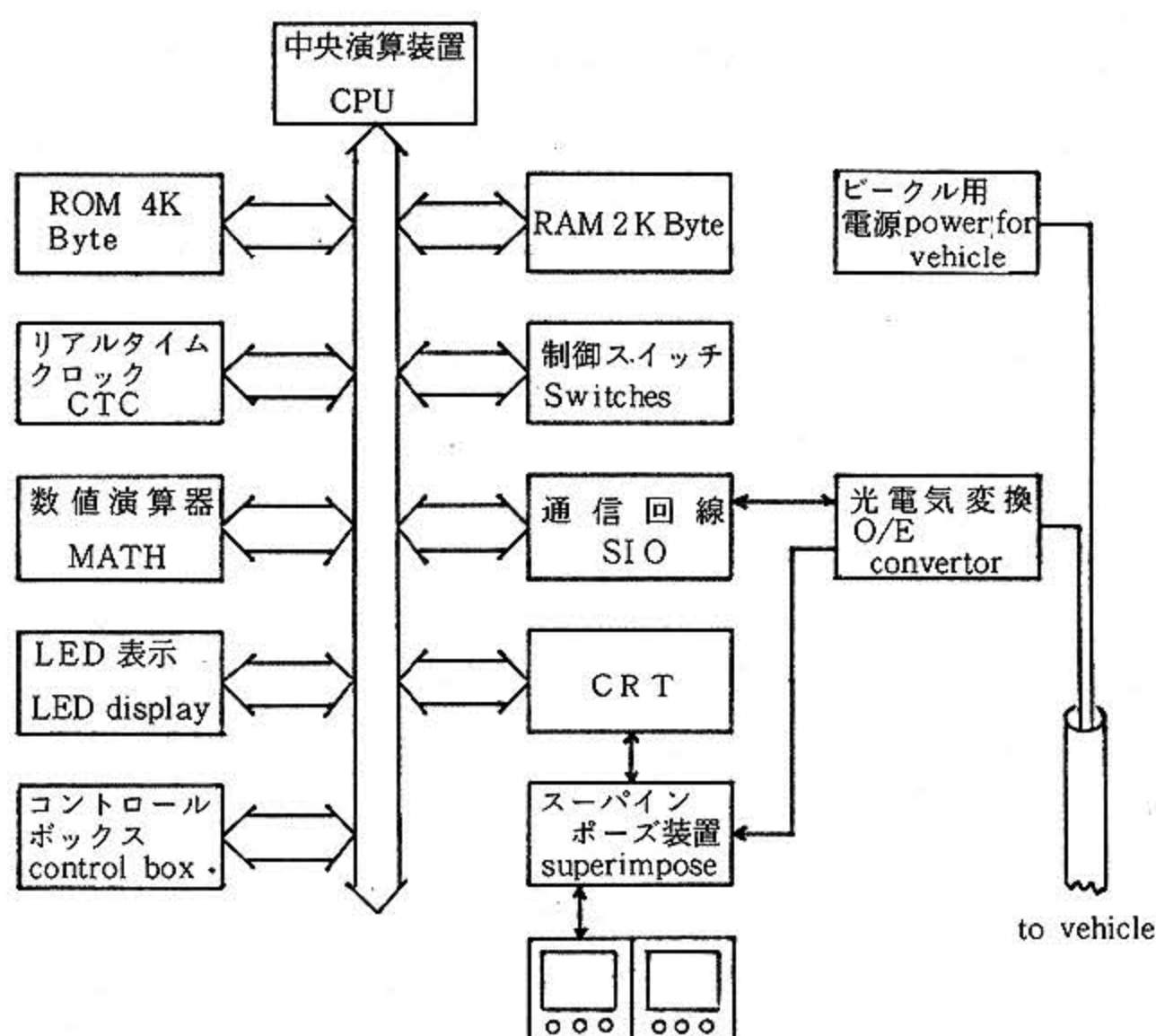


図1. 船上制御装置ブロック図
Onboard control system

ットで構成される。演算制御ユニットは、マイクロコンピュータZ80Aおよびマザーボードを使用したインターフェイス基板(165×115mm)8枚と操縦用ジョイスティック等スイッチの載ったコントロールボックスで構成されている。この制御ユニットで、コントロールボックスの指令信号と、ビークルから送信されてくるフィードバック信号とを演算し結果をビークルに伝送する。

表示ユニットは、TV モニタ、VTR、CRT、スーパーインポーズ装置で構成される。CRTにはビークル深度、方位等が表示され、ビークルから送信されてくるTV画像信号に重畳することができる。図1にその構成図を示す。

2.2 ビークル内制御装置

ビークルに搭載される制御装置は、通信回線、マルチプレクサ・デマルチプレクサ、センサインタフェイス、スラスト等駆動回路、TVカメラで構成される。各電子回路は、140×140mm角の基板で製作した。現状の装置にはCPU-ICを搭載していないが、各基板間は、将来CPUを搭載することと、装備の拡張を考慮してバスラインによって信号を授受する方式を採用した。図2に概略構成図を示す。

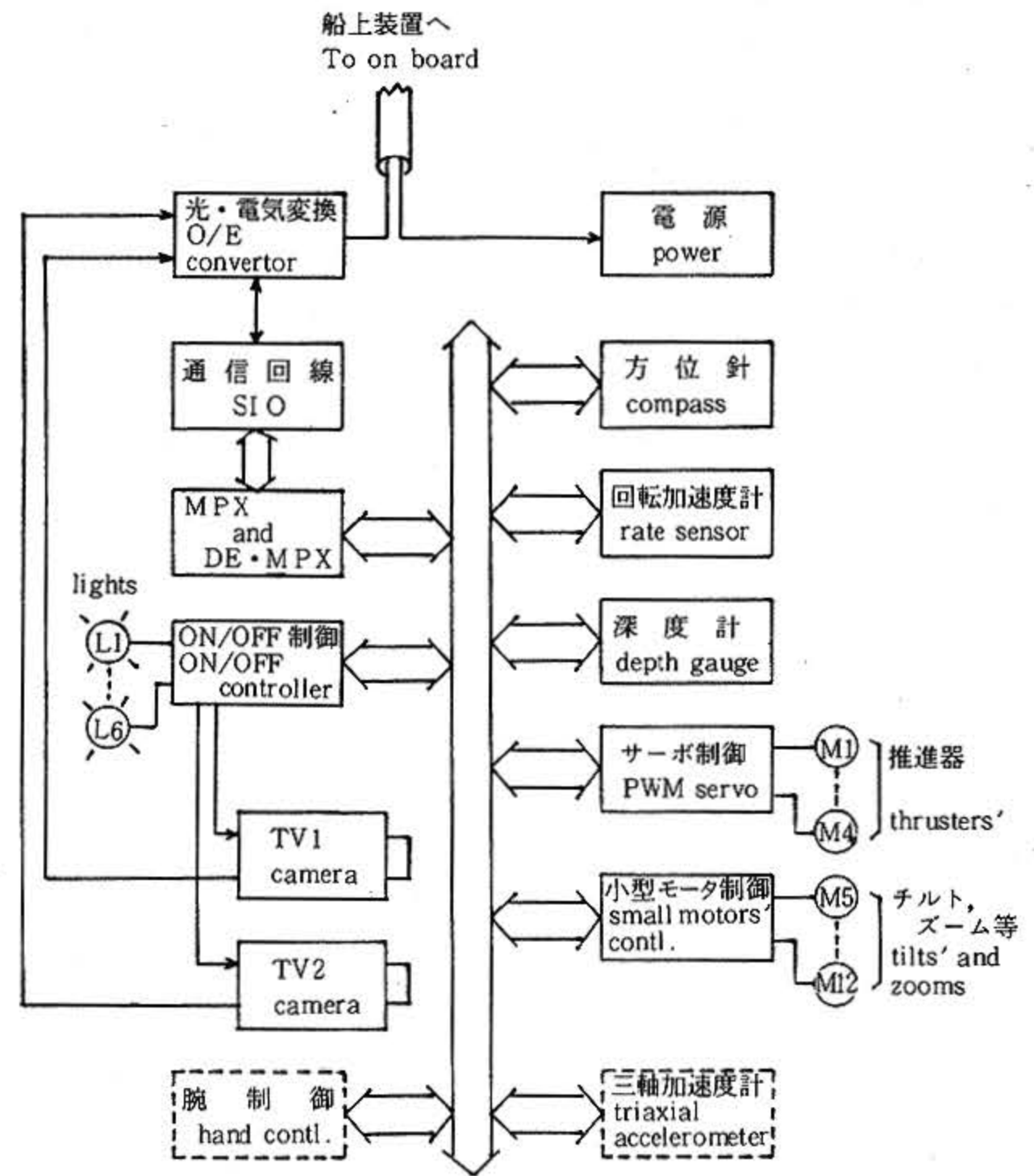


図2. ビークル搭載制御ブロック図
control system on vehicle

2.3 ビークル用給電装置

ビークルで消費する電力を最大2KVAとし、20Ω/kmの電力線(単相、1,000m)を使用して、電圧変動率を10%以内にするを前提に設計した。船上のトランスでAC100Vを1,200Vに昇圧しビークルに供电する。ビークル側のトランスで1,200Vから再び100Vに降圧する。トランスはケイ素鋼板積層のトロイダル型を使用した。ビーク

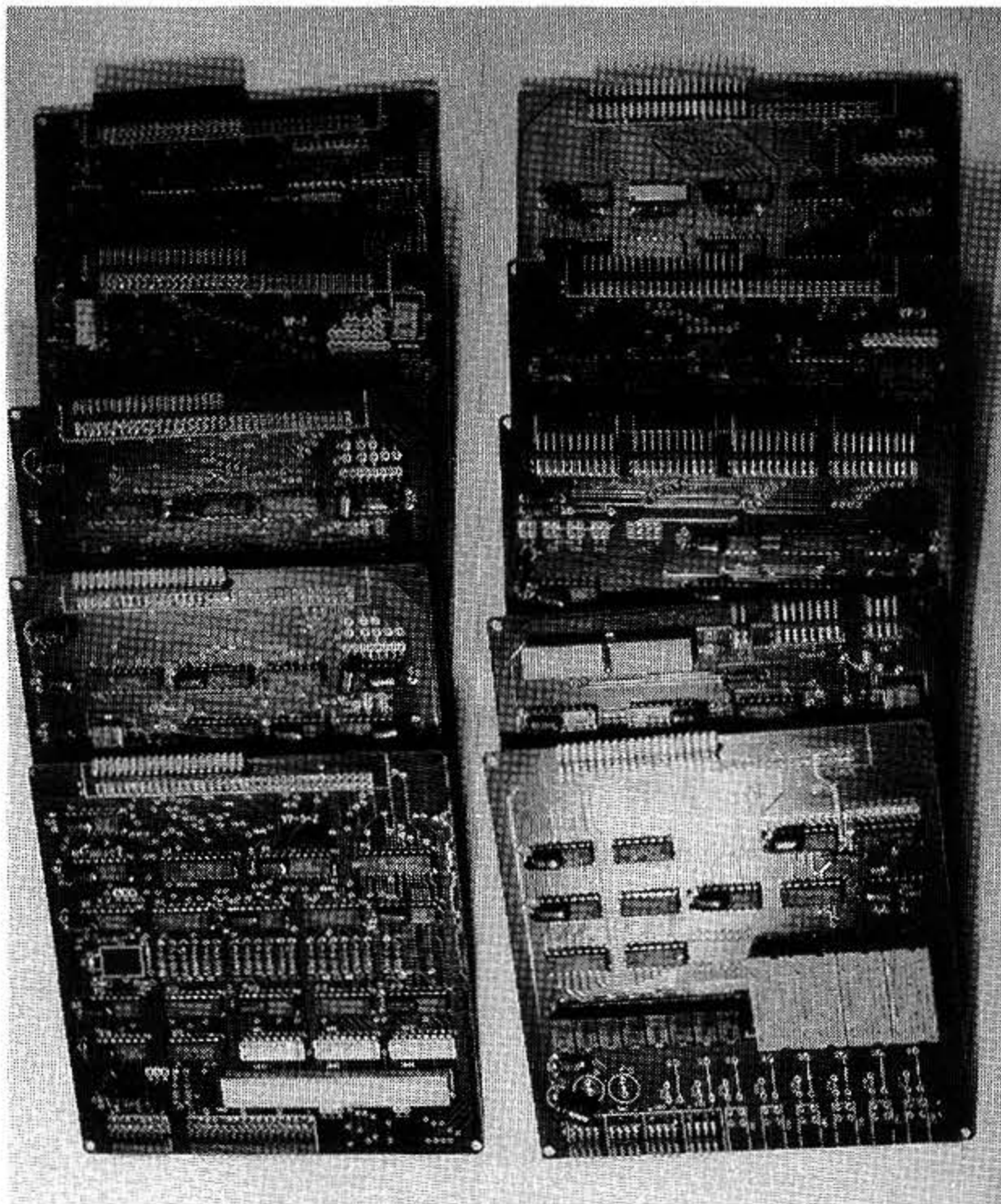


写真2. ビークル搭載制御電子回路
controllers on vehicle

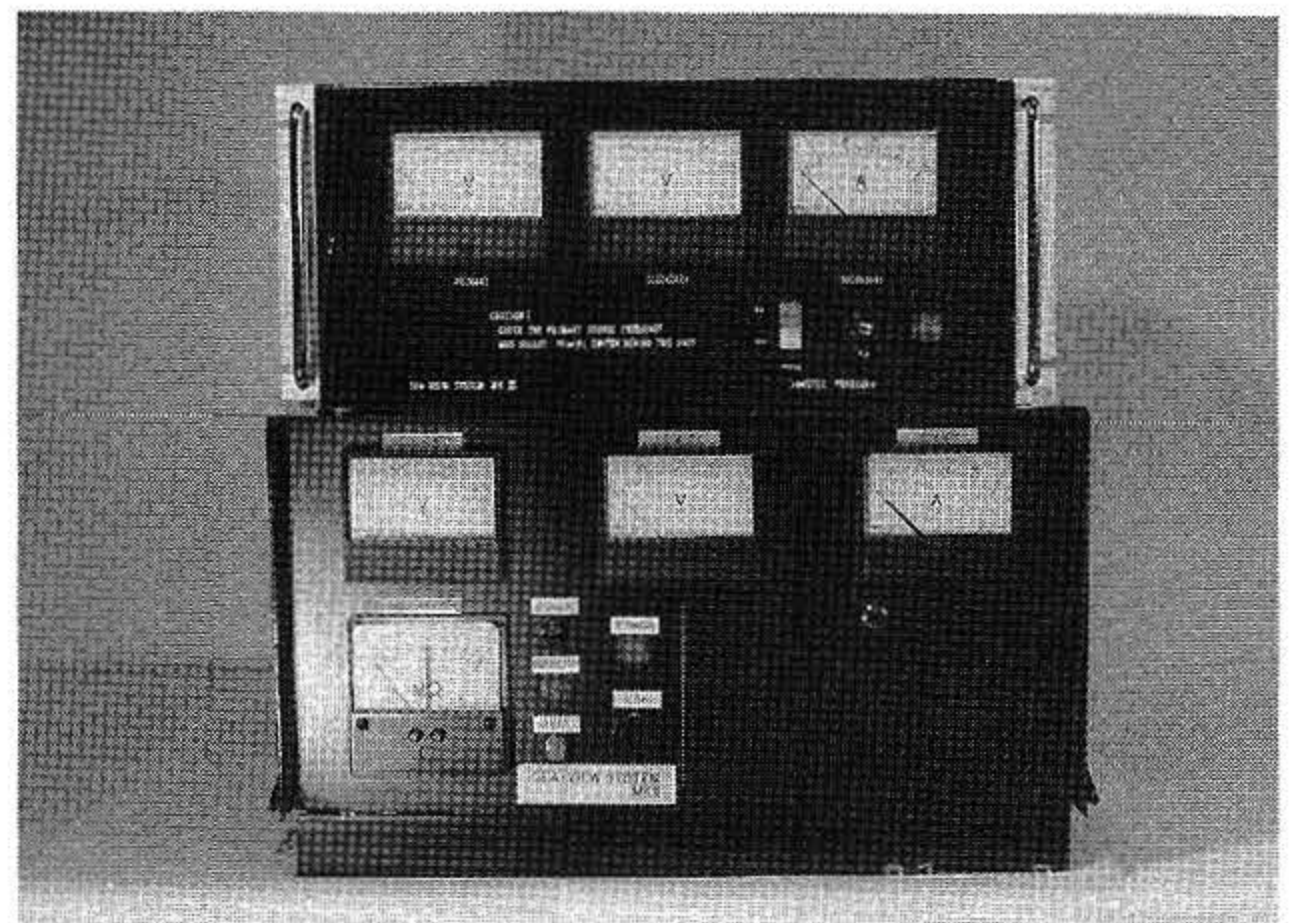


写真3. 供电装置
Power unit

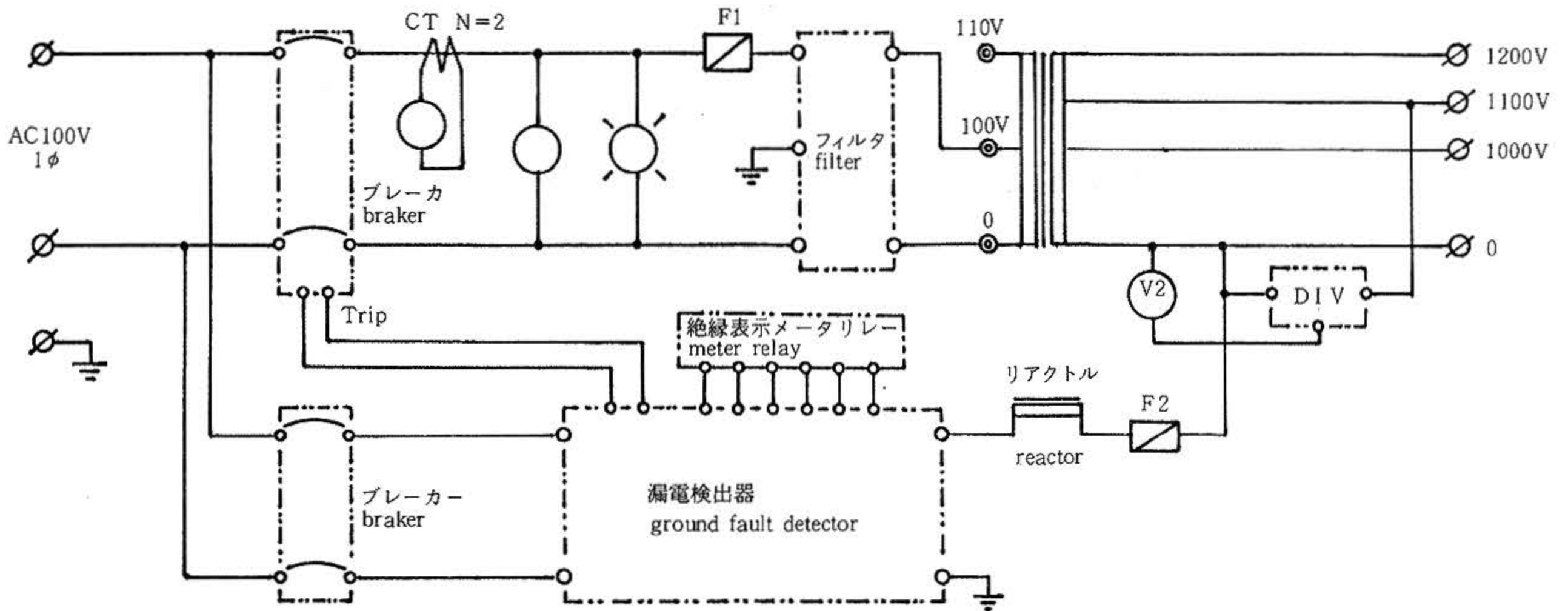


図3. ビークル用給電装置
power unit for vehicle

ル側のトランスは、1KVAを2基搭載し、船上供电側は、余裕をみて、3KVAとした。また、電力線とアース間が20MΩ(可変)以下になると電源を遮断する漏電検出装置を組み込んだ。遮断応答速度は、0.5秒である。図3.に構成ブロック図を示す。

3. 制御方法

ビークルのスラスタを駆動させる主なる指令は、コントロールボックスに取付けたジョイスティックによりおこなう。ジョイスティックに取付けられたポテンショメータの電圧値をA/Dコンバータによりデジタル値に変換し、CPUに取り込む。CPUは、各ジョイスティックの指令値を対応するスラスタの回転数パラメータに変換し、このパラメータをビークル内制御回路に伝送する。深度、方位の自動保持を行なう場合は、ビークルから送信されてくる深度、方位、回転加速度のフィードバック・パラメータとジョイスティック指令値とを演算してスラスタ回転数パラメータを決定する。回転数パラメータは、8ビットのオフセットバイナリ(COB)データの形でビークルに伝送される。すなわち、256段階のスピード可変をプログラミングできる。ビークル内に組み込まれたスラスタサーボアンプは、FETのフルブリッジで構成したPWM方式を用い、最大350W/DC100Vを出力できる。船上CPUは、ライト、TVカメラの電源

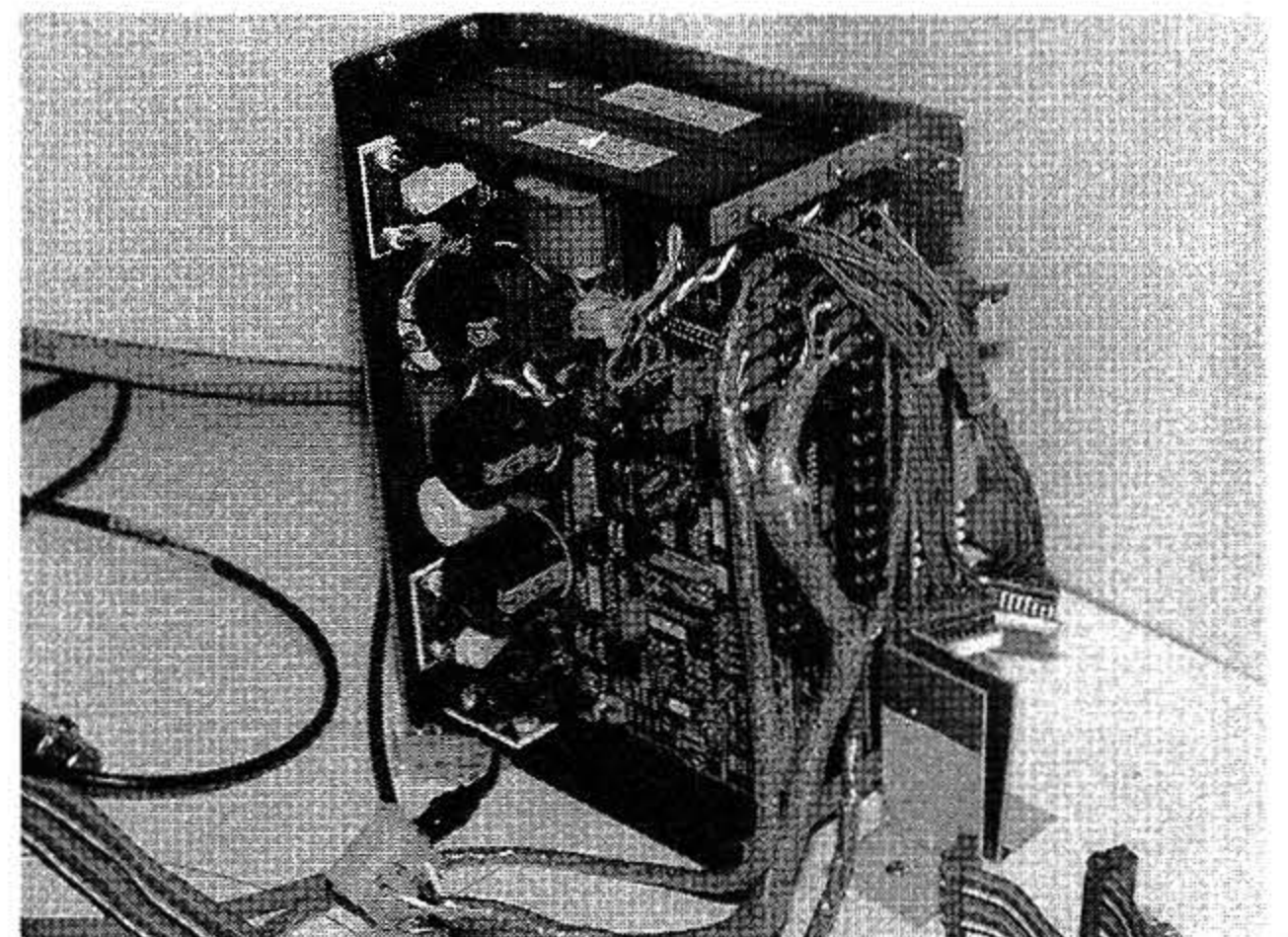


写真4. サーボアンプ
servo amplifier

ON/OFF、TVカメラ、ズーム、フォーカス調整等の指令スイッチ信号を入力し、上述したスラスタ回転数パラメータと同じ待ち行列バッファに入れられた後、通信回路に出力される。ライト、TVカメラ電源等のON/OFF指令は、ビークルでラッチ回路にデータ保持された後、リレー接点を介してライト等を制御する。

制御プログラムは、実行速度を早めるためアセンブラ言語で記述し、エミュレータを使用して開発した。インタラプト機構、CTCを用いて、モータ回転数演算、スイッチ制御、表示制御、入出力制御のマルチタスクで構成されている。ステップ数は、約3,000STEPである。制御プログラムは、

全てROMに収納されており、電源スイッチを投入すれば、実行を開始する。

4. 光通信

4.1 光通信方式

船上装置とビークル間の信号授受は、図4で示すように構成されている。ビークルから船上へ伝送する信号(UPLINK)は、ビデオ信号(NTSC)2系統と、深度、方位等のビークルのステータス信号(デジタル)から成る。一方、船上からビークルへ送る信号(DOWNLINK)は、スラスト回転数パラメータ等のコマンド信号(デジタル)である。合計4信号を双方向伝送する。光ファイバケーブル2本を使用し、第1の光ファイバに、光波長0.78, 0.88 μmの光を割り当て、ビデオ信号2系統をビークルから船上へ伝送する。光伝送方式は、直接光強度変調のアナログ伝送である。電気・光変換器(E/O)は、ビデオ信号

タス信号(デジタル)から成る。一方、船上からビークルへ送る信号(DOWNLINK)は、スラスト回転数パラメータ等のコマンド信号(デジタル)である。合計4信号を双方向伝送する。光ファイバケーブル2本を使用し、第1の光ファイバに、光波長0.78, 0.88 μmの光を割り当て、ビデオ信号2系統をビークルから船上へ伝送する。光伝送方式は、直接光強度変調のアナログ伝送である。電気・光変換器(E/O)は、ビデオ信号

表1. アナログ信号伝送測定
analog signal transmission tests

1. 光レベル (optical signal level)

1) 光出力レベル (dBm) (light source level)

| | ビークル側(vehicel) |
|---------|----------------|
| E/O(A1) | -14.5 |
| E/O(A2) | -14.5 |

2) 受光レベル (dBm) (recieve level)

| | 船上側(onboard) |
|---------|--------------|
| O/E(A1) | -30.5 |
| O/E(A2) | -29.1 |

2. 入出力信号レベル

(in and output signal level)

Vp-p

| | ビークル側(input) | 船上側(output) |
|----|--------------|-------------|
| A1 | 1.0 | 1.0 |
| A2 | 1.0 | 1.0 |

3. 周波数特性 (frequency charactor)

| f(kHz) | 0.03 | 0.1 | 0.5 | 1 | 15 | 100 | 300 | 700 | 1,000 | 3,000 | 000 | 6,000 |
|--------|-------|-------|-------|-------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A1 | -0.15 | -0.18 | -0.18 | -0.15 | 0 | +0.15 | +0.12 | +0.10 | +0.10 | +0.10 | +0.20 | +0.22 |
| A2 | +0.18 | +0.15 | +0.15 | +0.15 | 0 | -0.12 | -0.20 | -0.20 | -0.25 | -0.20 | -0.15 | -0.18 |

入力レベル +2dBm/75Ω, 出力レベル +2dBm/75Ω
(input)

4. 雑音 (ランダム) 特性 (S/N)

| 受光レベル dBm (recieve level) | -25 | -30 | -32 | -35 |
|------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| A1 S/N | 62 | 57 | 55 | 51 |
| A2 S/N | 58 | 55 | 52 | 48 |

5. 波形特性 (wave charactor)

| | frame slope | line slope |
|----|-------------|------------|
| A1 | 1 | 1 |
| A2 | 1 | 1 |

| | 微分利得(DG) | 微分位相(DP) |
|----|----------|----------|
| A1 | 1.5 | 1 |
| A2 | 2 | 1 |

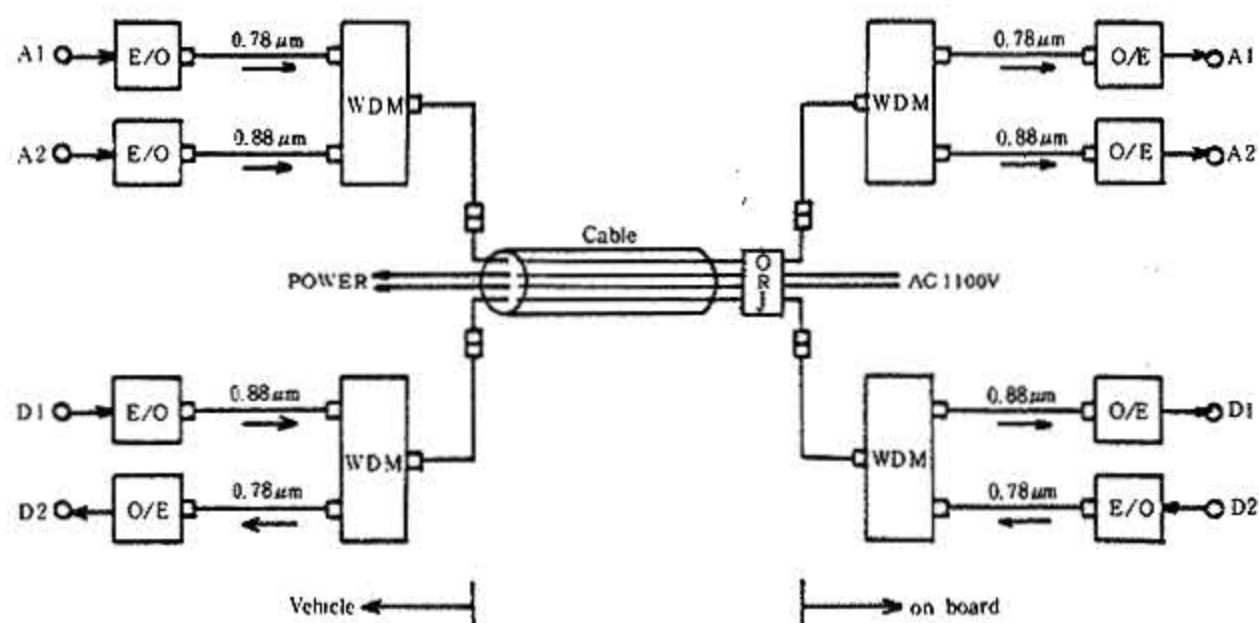


図4. 光通信ブロック図
Optical transmission

表2. デジタル信号伝送測定
digital signal transmission tests

1. 光出力レベル (light source level)

| | opt. out |
|--------------------|----------|
| E/O (D1) (vehicle) | -16.9 |
| E/O (D2) (onboard) | -16.9 |

2. 符号誤り率 (error rate)

図5に示す。

(A1, A2) をアンプ回路で増幅し、補正回路で等価補正したのち発光素子 (LED) を駆動し、光信号に変換する。LED から出力された光信号を光合分波器 (WDM) により1本の光ファイバに投入する。この光信号は、光ファイバケーブル、光ロータリ・コネクタ (ORJ) を通過し、船上の光合分波器により再び2光波長の光に分波される。光・電気変換器 (O/E) は、この受光した光を電気信号に復調し、アンプ回路、補正回路を通過してビデオ信号を出力する。第2の光ファイバには、DOWNLINKおよびUPLINKの2信号が、船上装置とビークル間で双方向伝送される。伝送信号は、NRZ非同期方式を使用した。伝送ビットレートは、最大1 Mbps である。

表1に、ビデオ信号系の光通信投受光器の伝送特性試験の結果を示す。伝送周波数特性は、15 KHZ を基準として30HZ~6 MZ帯域で測定した。周波数特性、S/N比等2,000 m伝送が良好に通信できる特性を示している。表2は、デジタル系の光通信の特性試験結果である。2,000 m伝送を実施する場合の最低受光レベルは、約-38 dBm 附

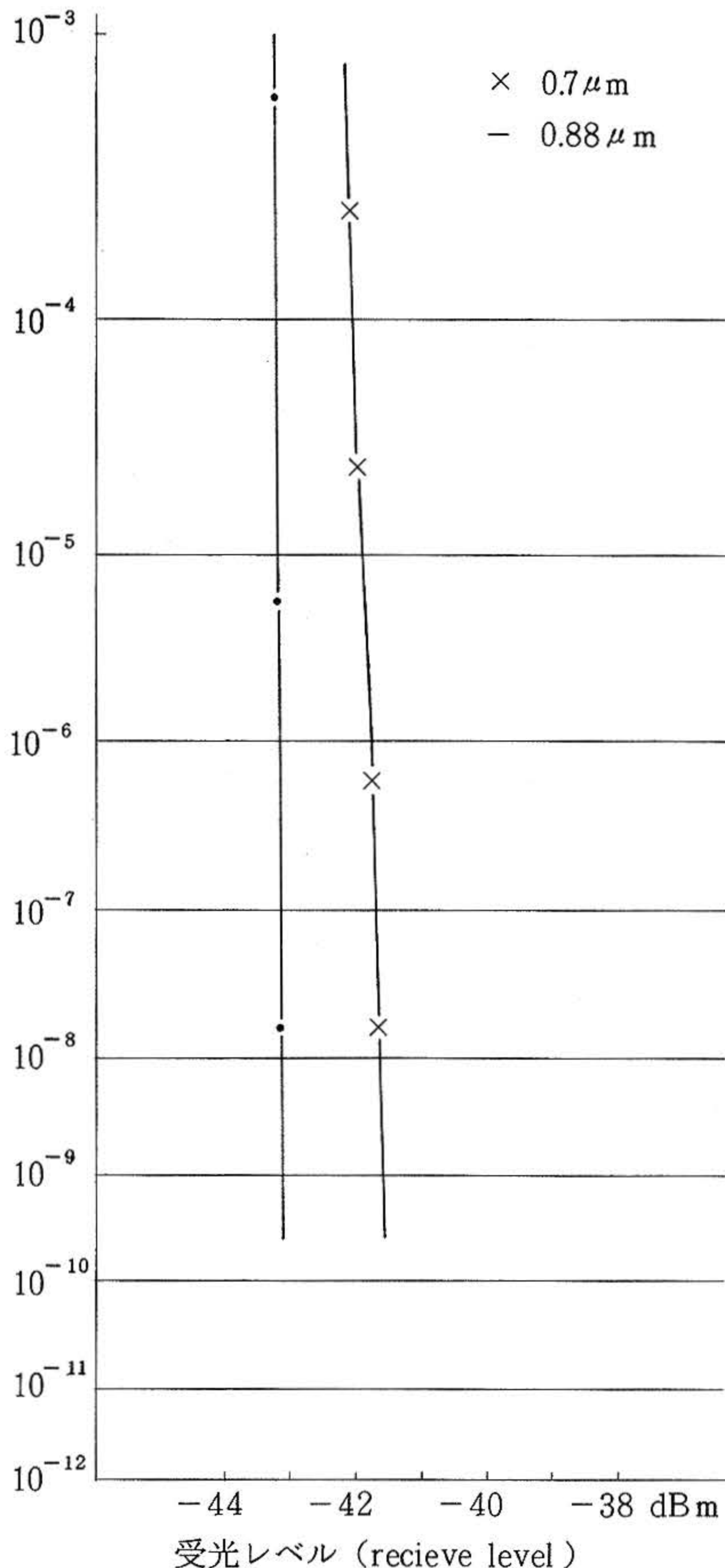


図5. 符号誤り率
error rate

近であるから符号誤り率は、無限小に近いと考えられる。

4.2 ロータリ・コネクタ

長尺の光ケーブルを使用する場合、ケーブルを船上のストアウインチに収納して使用することが多い。回転ドラムとのインタフェイスには、スリッピングが使用される。本システムにおいては、光ファイバを用いた光通信をおこなうため、光ロータリ・コネクタが必要であり、ビークルに電力を供給するためのスリッピングもまた必要とな

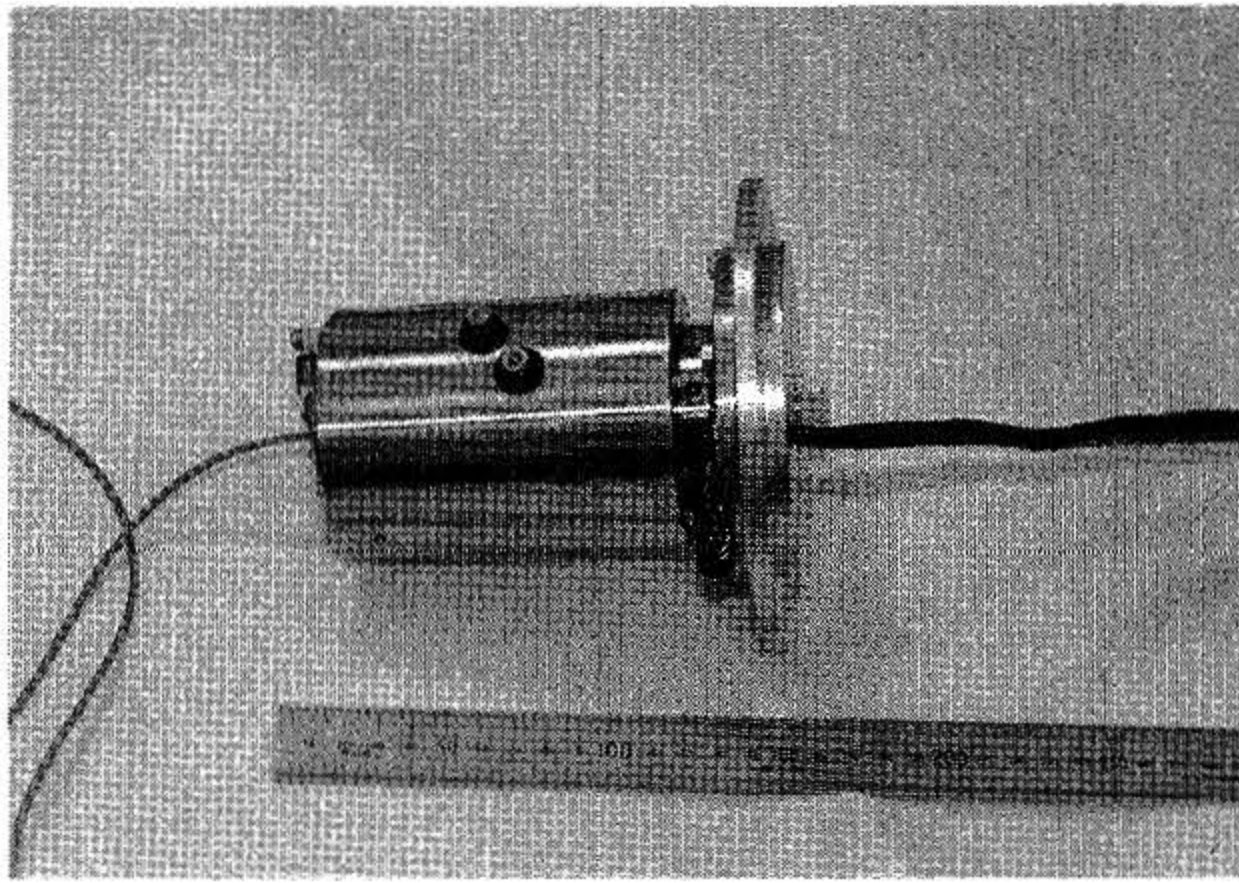


写真5. 光・電気複合ロータリ・コネクタ
Rotary connector

表3. 光電気ロータリ・コネクタ試験結果
rotary connector tests

| 項目 item | 結果 result |
|---------------------------------|----------------------------|
| 挿入損失 insert loss | 2.85 ~ 3.09 |
| 回転変動 rotation fluctuation | 0.11 (dB) max. (60 RPM) |
| 接触抵抗 contact resistance | 12.5 mΩ (0 ~ 60 RPM) |
| 耐電圧 tolerance voltage | AC 3,000V (r. m. s) |
| 許容電流 current | 10A max. |

った。このため回転軸に取付ける電気・光複合ロータリ・コネクタを試作した。通常のスリップリングはブラシ式等の摺動接点を用いる。この方式は、摺動ノイズ、放電ノイズが発生し、またブラシの保守が必要である。試作した方式は、ドラム回転軸と光ロータリ・コネクタの外側同心円上に水銀接点方式の電力用ロータリ・スリップリングを配したものである。光通信は、直径50 μmの光ファイバコア内を通るため光軸が合致しないと通信が途絶する。偏心を生じさせやすいバネでブラシを抑える方式のスリップリングは、光ロータリ

表4. 光・電気複合ロータリ・コネクタの特性試験
rotary connector rotation fluctuation

| 回転角度 (deg) | 光損失 loss (dB) | | 接触抵抗 (mΩ) resistance |
|---------------|---------------|---------|----------------------------|
| | 1回目 1st. | 2回目 2nd | |
| 15 | - 2.87 | - 3.09 | 12.5 以下 変動なし |
| 30 | - 2.87 | - 3.09 | |
| 45 | - 2.88 | - 3.09 | |
| 60 | - 2.88 | - 3.08 | |
| 75 | - 2.89 | - 3.08 | |
| 90 | - 2.90 | - 3.06 | |
| 105 | - 2.91 | - 3.06 | |
| 120 | - 2.91 | - 3.04 | |
| 135 | - 2.92 | - 3.03 | |
| 150 | - 2.93 | - 3.02 | |
| 165 | - 2.95 | - 3.02 | |
| 180 | - 2.95 | - 3.00 | |
| 195 | - 2.96 | - 2.99 | |
| 210 | - 2.95 | - 2.99 | |
| 225 | - 2.95 | - 2.99 | |
| 240 | - 2.93 | - 3.00 | |
| 255 | - 2.92 | - 3.01 | |
| 270 | - 2.91 | - 3.01 | |
| 285 | - 2.89 | - 3.02 | |
| 300 | - 2.88 | - 3.03 | |
| 315 | - 2.86 | - 3.04 | |
| 330 | - 2.86 | - 3.05 | |
| 345 | - 2.85 | - 3.05 | |
| 360 | - 2.86 | - 3.05 | |

・コネクタと併用すると上述した問題が発生すると思われるため採用しなかった。本方式の電力供給用スリップリングは、水銀液中を電極が回転するためドラム回転体と固定側との偏心を吸収でき光ロータリ・コネクタの光軸が、ずれる可能性が少ない。

表3, 4に特性測定結果を示す。挿入損失最大-3.09 dB m, 回転損失(60 RPM) ± 0.11 dB m以内と小さな損失に抑えることができた。

5. センサ

5.1 深度計

深度センサは、市販品の米国 Entran 社の半導体ストレンゲージ式圧力センサを使用した。0～25,000psi までの各種測定範囲の異なる圧力センサが揃っている。使用しているセンサは、0～1,000psi のものである。特性は、出力 125mV/F.S., 使用温度範囲 0°C～50°C, 直線性およびヒステリシス 0.25% F.S.(50°C), 温度ドリフト ±1.5% F.S.(50°C) である。

深度センサからの出力を、温度補償回路付のインストルメントアンプで増幅したのち16ビット A/D コンバータでデジタル値に変換する。船上と水中では温度差が生じるため水中にビークルを下した後、ソフトウェアで深度計をゼロ補正する機構を設けた。

5.2 方位計・ビークル回転計

方位検出器としてフラックスゲート型磁気センサを使用した。このセンサは、パーマロイの積層薄板に励磁用電線を巻き、さらに X 軸・Y 軸検出用に互に直行するように電線を巻いたものである。仕上り外径は約 30mm である。検知コイルを励磁発振器でその B/H 特性を充分飽和させるとその出力巻線 (X, Y 軸巻線) に発生する電圧は、外部磁場 H に比例する。この電圧を位相検波し直流信号に変換する。さらに、この信号を A/D 変換してデジタル値にする。このセンサは、磁場の影響を受けやすい欠点をもつが、出力が高分解能で、小型軽量、外部温度変化に強い特性をもつ。表 5 に特性測定結果を示す。

ビークルのテザーケーブルは、ひねりを加えた

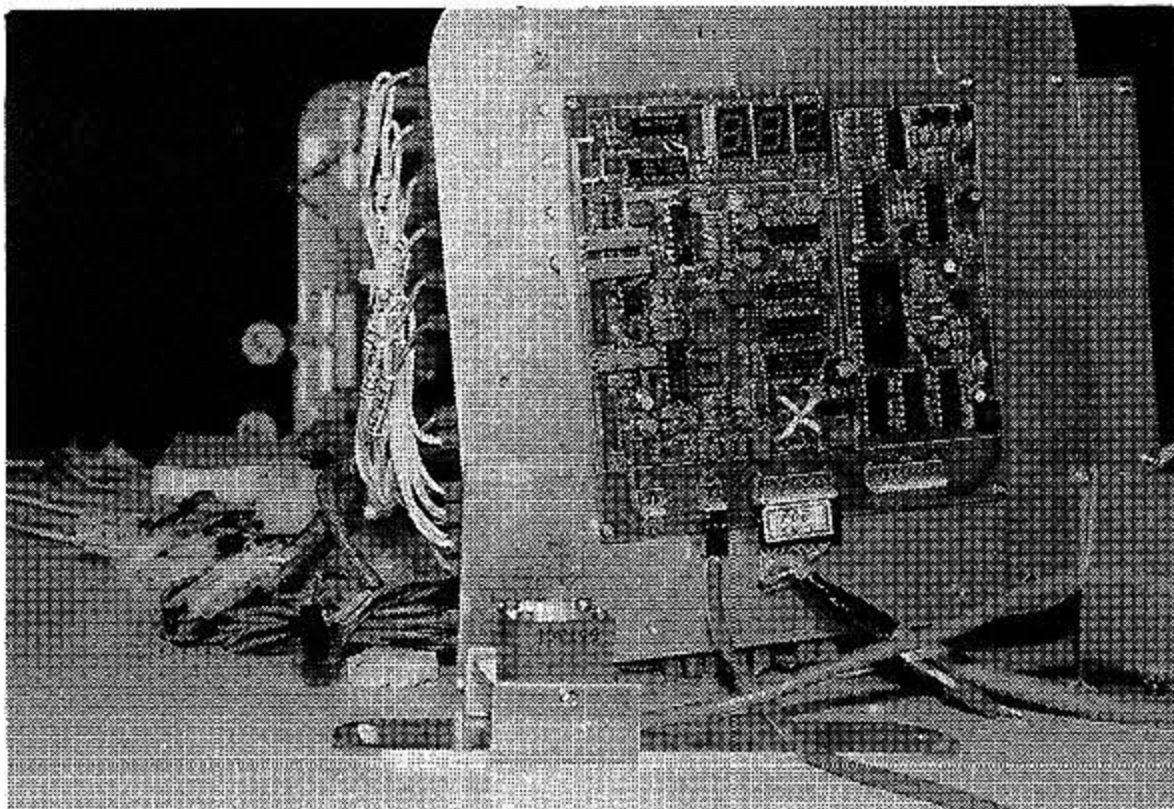


写真 6. 方位計
compass

表 5. 方位計の特性試験 (於, 海洋科学技術センター)

compass character tests (at JAMSTEC)

| 項目 item | 結果 result |
|---------|-------------|
| 精度 | ±2° 以内 |
| 感度 | 約 10 mV/deg |
| 分解能 | 0.1° |
| 直線性 | 3% |
| 応答性 | DC ~ 10 Hz |

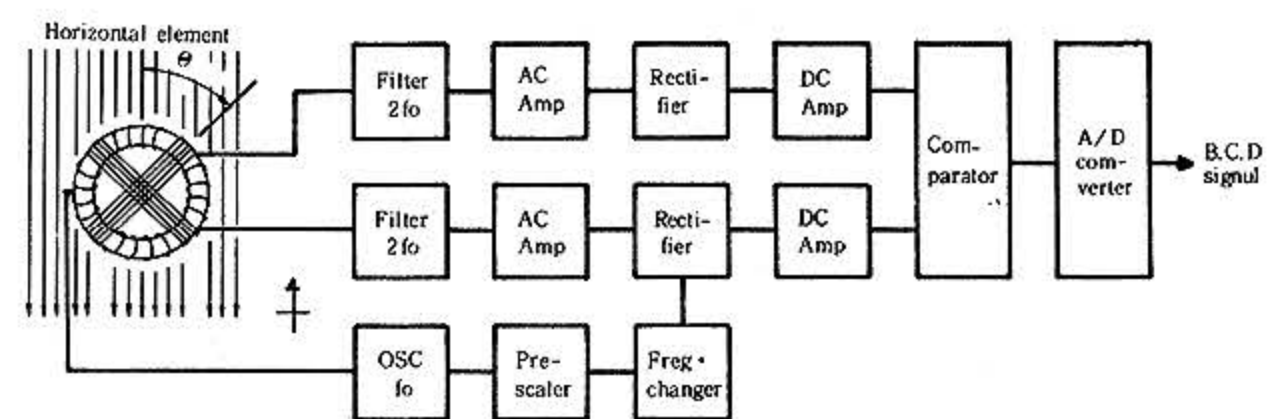


図 6. フラックスゲート方位計ブロック図
Flux gate compass

まま船上のウインチに収納すると、キンクしたり、電線が座屈する恐れがある。使用開始時からビークルの回転数をカウントし、終了時に最初の状態に戻す必要がある。方位計のデータを基に常時ビークルの回転数をカウントする装置を装備した。(左右 99 回転以内)。

5.3 回転加速度計

方位の自動保持をおこなうためには、ビークルに水流等の外部から加わる力に比例したスラストを与えなければならない。保持しなければならない方位と現在のビークル方位に差が生じると、加速度計で測定したデータに比例したパラメータを、ビークルの左右に装備しているスラストのそれぞれの回転数パラメータに偏差を加えるように加算する。使用したセンサは、 piezoelectric 振動子を用いた加速度計である。分解能 0.04°/sec, 精度 2%, 直線性 0.2% F.S., 加速度ドリフト 0.1°/sec/G, 周波数応答 70 Hz。

6. 光・電気複合ケーブル

本システムを、海洋科学技術センターの開発した ROV "HORNET" に組み込み、性能試験を行った。HORNET のケーブルは、船上ウインチか

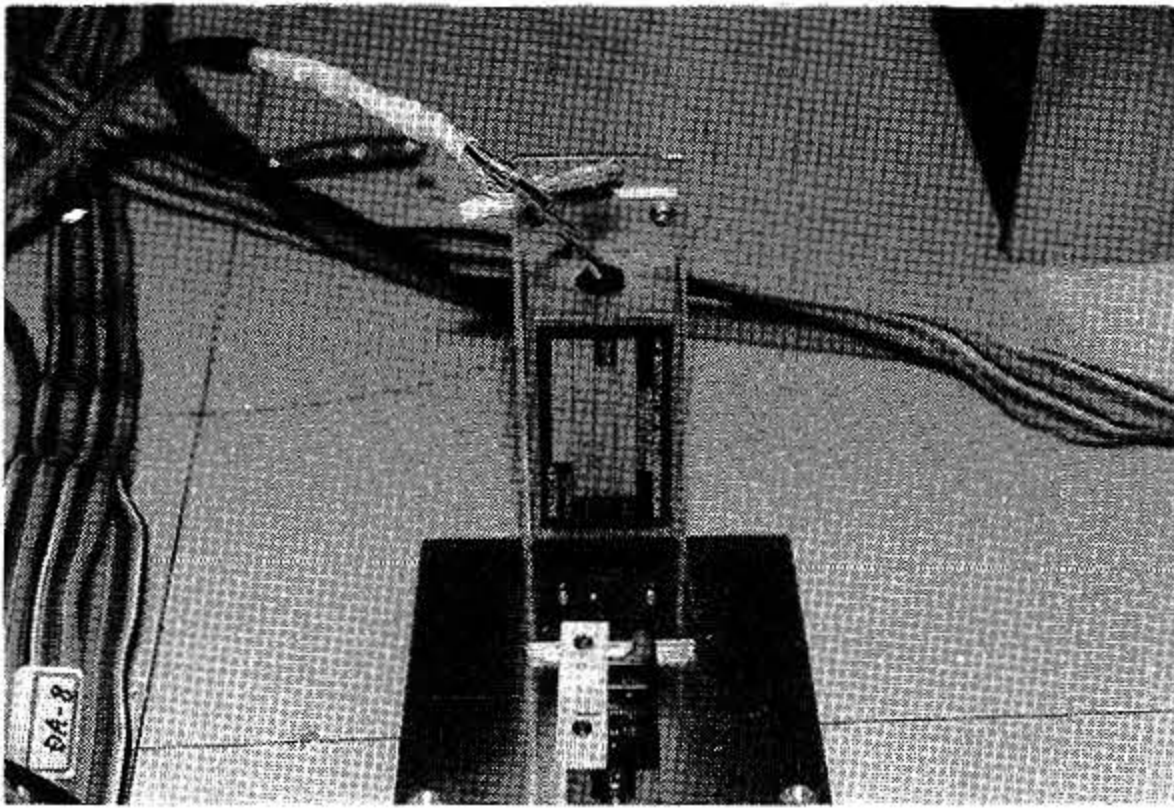


写真7. 回転加速度センサ
rate sensor

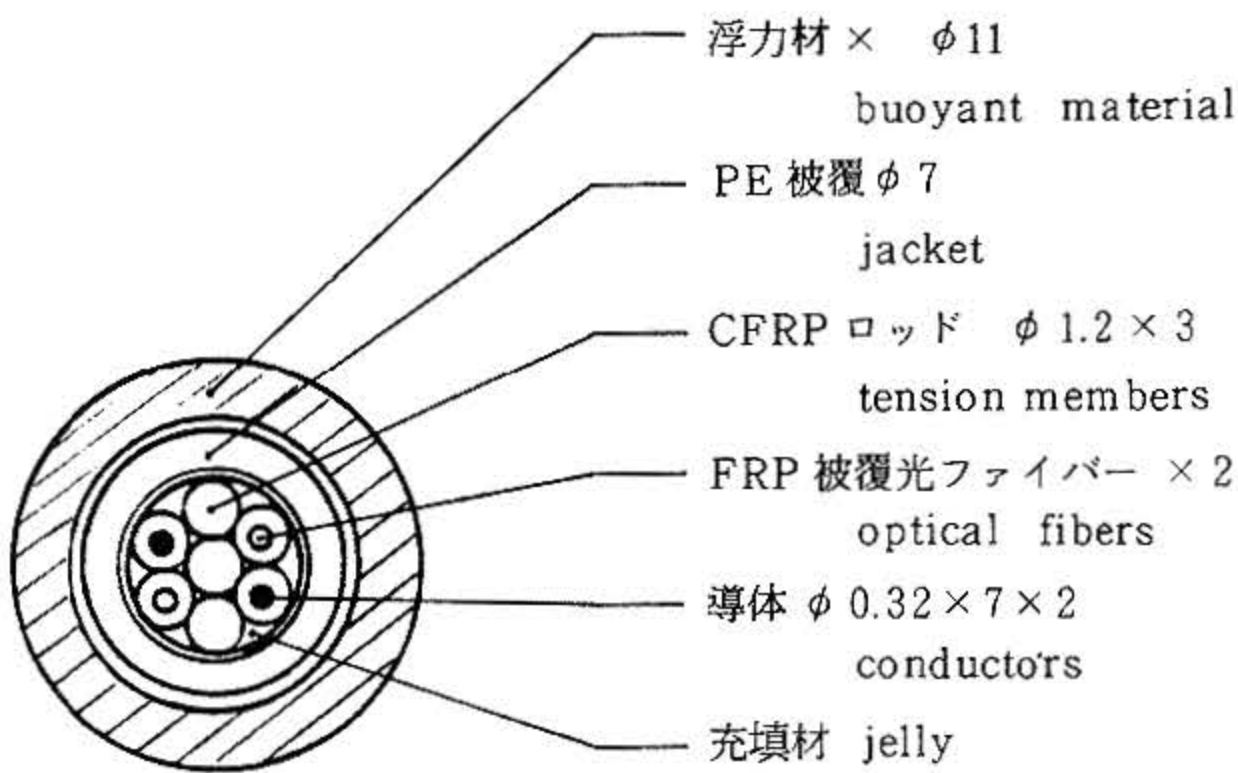


図7. 中性浮力ケーブル(2次ケーブル)断面図
neutral buoyant cable

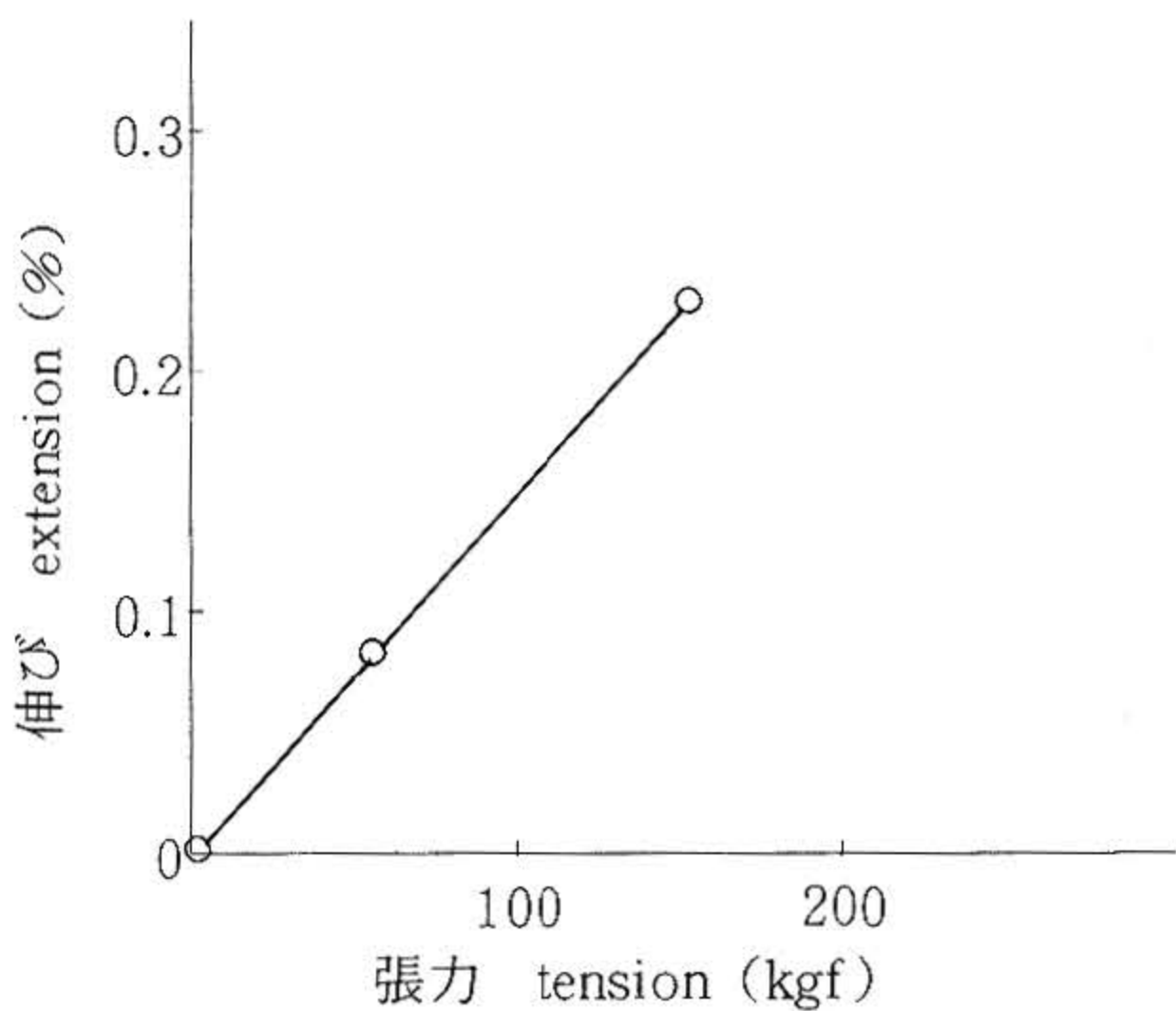


図8. 2次ケーブルの光ファイバ伸び試験
neutral buoyant cable tension test

ら中継金具までの主ケーブル(1次ケーブル, 750 m)と中継金具からビークルまでの中性浮力ケーブル(2次ケーブル, 50m)から構成されている。この主ケーブルおよび中性浮力ケーブルの特性試験を実施した。

6.1 中性浮力ケーブル(2次ケーブル)

図7にケーブル断面図を示す。テンションメンバ用CFRPロッド3本, FRPコーティングを施したGI型光ファイバ2本および電線2本に, 外部被覆(EPゴム)を施した構造を成す。このケーブルの外周に, 柔軟性のあるシタクティックフォームを巻き水中で中性浮力化した。

荷重と光ファイバ伸びの関係(図8)は, 直線であり, 許容張力(ファイバの0.4%伸び)は, 200 kgf以上となり十分な引張り強度を示した。破断試験においては, 700 kgfで端末部が破断した。

6.2 主ケーブル(1次ケーブル)

主ケーブルは, 2次ケーブルの主要構成部(シタクティックを除いた中央部)の外周に, アラミッド繊維(ケブラー49)をロッド化したテンションメンバで2重外装した構造を成す。(図9)

荷重と光ファイバ伸びの関係(図10)は, 荷重が高まった段階で伸びの傾斜が小さくなっている。これはテンションメンバの特性によると考えられる。許容張力(光ファイバの0.4%伸び)は, 約500 kgfと推定できる。破断試験においては, 約2,000 kgfで引き留め部が破壊した。

1次, 2次ケーブル計800 mを水圧実験水槽で加圧し, 水圧特性を計測した。800 kgf/cm²の圧力範囲で, 光ファイバの光損失変動率は, 0.05 dB/kmと, ほとんど水圧による影響を微少に抑えることができた。これは, FRP被覆光ファイバの耐水圧性が高いことに起因すると思われる。

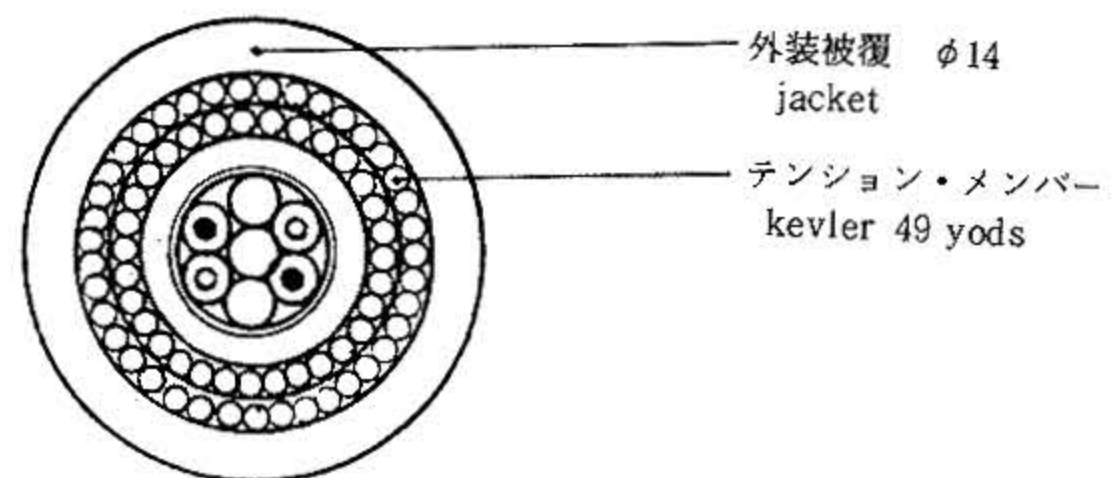


図9. 主ケーブル(1次ケーブル)断面図
main cable

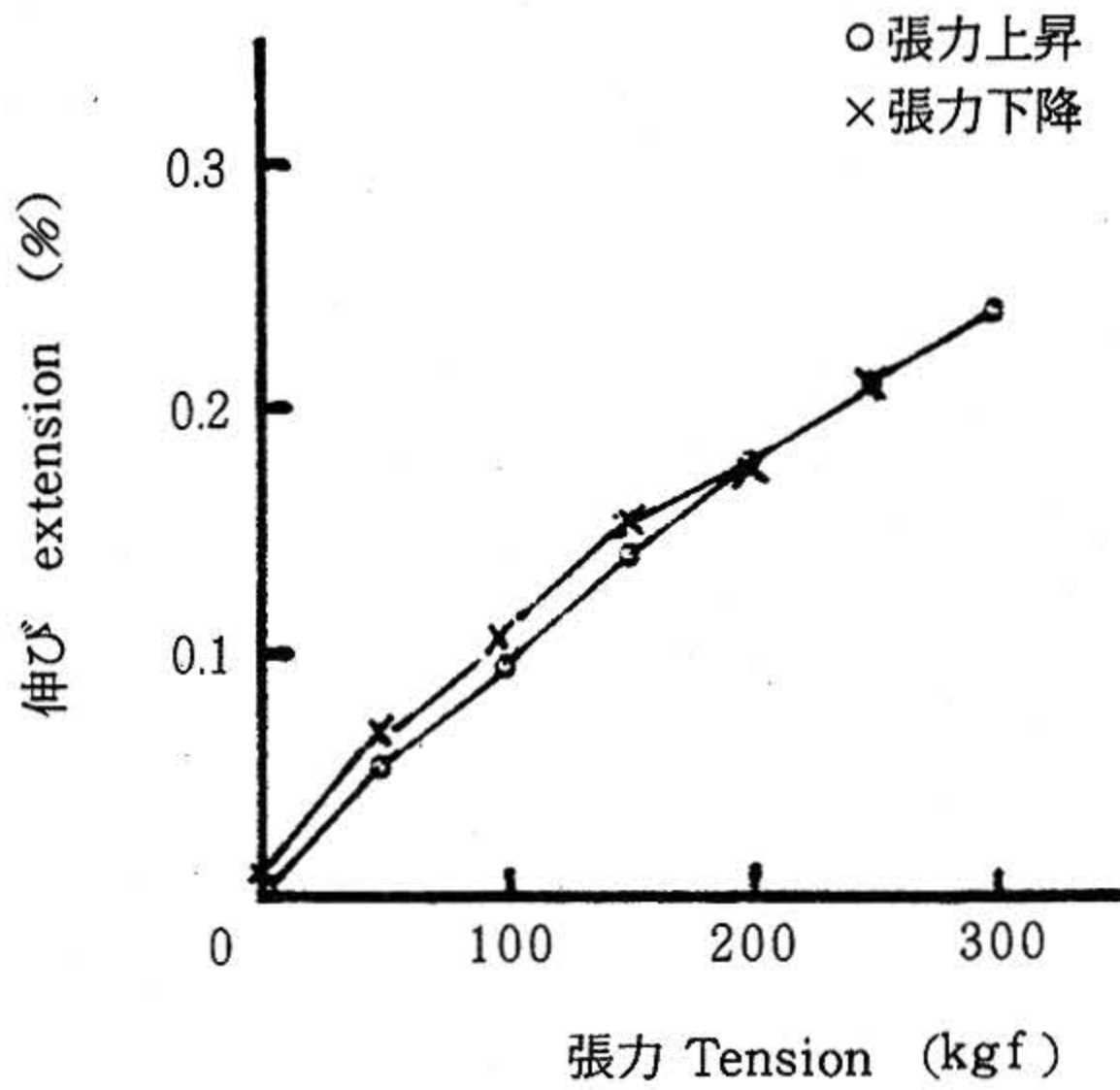


図10. 1次ケーブルの光ファイバ伸び試験
main cable tension test

7. あとがき

本システムを組み入れた「HORNET」は、プール走行試験、ドック走行試験を終了した。ビークル本体、制御システムとも良好に作動した。今後、実海域において性能試験を実施する予定である。電子回路の信頼性は、ほぼ確認することができた。今後、さらに集積化、軽量化を図ることとしたい。またビークルオペレータの疲労軽減を計り、操縦

性能を向上するために、自動化機能を充実する予定である。

おわりに、この研究開発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、実習生の堀秀之君、多田俊一君の各氏にご協力いただいた。また、HORNETの製作においては、住友重機械工業(株)、古河電気工業(株)にご協力をいただいた。以上の各位に謝意を表します。

文 献

- 1) 青木太郎ほか、「自航式ビークル「HORNET-500」の開発」, JAMSTECTR (12), P. 39 - 49 (1984)。
- 2) 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。
- 3) 茂在寅男ほか、「コンパスとジャイロの理論と実際」, 海文堂。
- 4) 坪島茂彦ほか、「モータ活用マニュアル」, オーム社。
- 5) 加藤大典, 「光ファイバの基礎と応用」, 総合電子。
- 6) 額田忠之, 「Z 80 ファミリー・ハンドブック」, CQ出版社。

(原稿受理: 1986年4月5日)