

小型簡易マニピュレータの製作

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

水深 500 m まで使用できる自航式ビークル “ホーネット” に搭載する小型簡易マニピュレータを製作した。この小型マニピュレータは 3 つの自由度を持ち、位置フィードバック方式、オン・オフ制御により、海底において小規模な作業が可能である。実用機の設計製作にあたって、その設計資料を得るために試作機によるビークル搭載時の作業内容と作業範囲を確認し、実用機の機能、駆動方法並びに機構等を検討した。

A Small simple Manipulator for Small ROVs

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

A small simple manipulator was developed for a small ROV “HORNET” which can dive to 500 m.

The manipulator has three degrees of freedom with position feedback and can perform some simple tasks by ON-OFF control.

A prototype was used to confirm the nature and extent of tasks possible when the manipulator is installed on the ROV.

The possible functions and driving mechanisms of the manipulator are also discussed.

^{*1} 深海開発技術部

^{*2} Deepsea Technology Department

1. ま え が き

近年, ROV (Remotely Operated Vehicle 以下ビークルと記す) は, テレビカメラ等の視覚機能による調査のみならず, 多目的な作業を行うために, マニピュレータを装備しているものが増えてきている。特に, 大型のビークルでは, ほとんどが5~7自由度の高性能なマニピュレータを装備しており, さらにその作業を補助するグラバを併せて装備しているものも多い。例えば, 当センターが開発中の無人探査機“ドルフィン3K”¹⁾では, 油圧サーボ方式7自由度のマニピュレータと, 油圧サーボ方式5自由度のグラバが装備される。

小型のビークルでは, ビークル自体の運動性能や動力源の容量等に限界があるため, あまり高性能なものは装備されておらず, むしろ特定の作業内容に限定された専用の機能を有するものが多い。例えば, 諸外国においてもっとも生産台数の多い小型ビークル“RCV-225”では, 空気圧力を利用した方式による2自由度の作業アーム²⁾を装備しているものがある。このアームは, 手先部分がユニット化されていて, 小物体の把握, フックによる回収及び, ケーブルカッタによる切断等の作業を用途別にユニットを交換することによって実施できる。また, RPV-430は, 電動モータによる小型で軽量の3自由度のマニピュレータ³⁾(Articulatorと呼ばれている)を装備している。

一方, 1983年に当センターが開発した自航式ビークル“ホーネット”^{4), 5)}は, 水深500mまで潜航できる性能を有し, 海中におけるその高い運動性能と鮮明なテレビ画像が得られることが確認された。さらに, 1985年には, 同ビークルの2号機が製作され, 新たな機能が付加された。これらのビークルは, 水中航行のための多くの機器類を搭載しているが, 調査の手段としては現在のところテレビカメラによる目視調査のみである。従って, ビークルからの多目的な調査と軽作業等が可能となる調査用機器の装備が望まれた。

今回, 自航式ビークル“ホーネット”に装備する調査用機器の開発の一環として, 小型マニピュレータを製作した。実用機の製作にあたっては, その設計資料を得るために試作機を製作した。ここでは, 試作機を用いて, ビークルによる作業内容と作業範囲を考慮した実用機の機能, 駆動方法

ならびに機構等の検討を行ったので述べる。

2. 要 求 性 能

本マニピュレータの性能は, これを搭載するビークルの諸性能ならびに予想される水中作業の内容を考慮して決定した。

2.1 搭載ビークルの概要

本マニピュレータを搭載するビークル“ホーネット”の仕様ならびに諸性能は, 文献^{4), 5)}に詳述されているので, ここでは, 製作するマニピュレータの設計に必要な仕様だけを述べる。

このビークルの主要寸法は, 長さ1.13m, 幅0.96m, 高さ0.56mで, 空中重量は120kgである。その構造は, 耐食アルミニウム合金の球殻2個をアルミニウムシリンダで継ぎ合わせたものである。推進装置としては, 垂直スラストと, 前後進回頭スラストとをそれぞれ2基持っている。また, テレビカメラは, ビークルの前球殻に高解像度カラーが, 後球部に低照度白黒が, アクリル透視窓の内側に搭載されている。水中航行のための監視及び観察等は, 主に前球殻のカラーテレビカメラを通して行われる。

このテレビカメラの撮影範囲は, アクリル窓を通した水中画角で, 垂直40度, 水平53度となっている。さらに, この画角は, チルト装置によって水平から上方へ35度まで, 下方へ45度まで移動させることができる。したがって, 製作するマニピュレータの動作範囲は, この撮影範囲内において有効となるように設定されなければならない。

2.2 作 業 内 容

前にも述べたように, このビークルは4基のスラストによる高性能な水中航行機能と安定性を有しているが, 中層におけるホバリング状態でのマニピュレータによる作業の実施は, 潮流等の影響で難しいものと考えられる。従って, ビークルは作業を行う物体上に, または海底上に着底するなど, ビークル本体を安定させた状態で作業を行うことを前提とした。

このビークルにマニピュレータを搭載して実施が可能となる主な水中作業を以下に挙げる。

① 試料の採取作業

ここで言う試料とは, 比較的採取しやすい貝類, 甲殻類等の生物, 岩石等の小型物体を対象とし,

これらを破損せずに把握して所定のサンプルバスケットへ収納する。

② 設置・回収作業

水中ビーコン等の小型水中測機類の設置や、大型物体を間接的に回収する作業。

例えば、回収索を回収物体へ取り付け作業等が考えられる。

③ ケーブル等の切断作業

細いケーブル、ロープ及び魚網等の切断作業

④ 潜水援助作業

潜水作業者との共同作業

このように、該当する作業の内容は単純なものであり、取扱う物体も軽量なものに限定される。しかし、これらの作業内容を確実に遂行するための汎用機能を今回製作する小型のマニピュレータに持たせることは難しく、ビークル自体の性能からも困難であると考えられる。したがって、製作するマニピュレータ先端部分のハンドは、作業の種類によって使い分けられるようなユニット構造とし、各機能別の専用ハンドを必要に応じてその都度製作し、容易に取り付けられるような構造とした。

2.3 設計条件

製作するマニピュレータの最大使用深度は500 mとした。これはビークル自体の最大潜航深度によるものである。

このマニピュレータに依る作業の種類は、前述したように多くのものが予想された。しかし、これらすべての作業を遂行できるような汎用機は、その機構が複雑となり軽量化が難しくなるという理由から、試料の採取作業（小型物体の把握）のみを当面の目標とした。アームの自由度は、前述の作業内容を検討した結果、少なくとも3自由度は必要であると判断された。

すなわち、Ⅰ軸はアーム全体の水平旋回動作、Ⅱ軸は垂直方向の上下動作とし、Ⅲ軸は把握動作とした。各動作軸の制御方式は該当する作業の内容から、一般に行われている速度制御は必須のものではなく、ON-OFF制御の等速度動作で十分に機能を果すものと判断した。

一般の産業用マニピュレータでは、その操縦性能や作業精度を高めるために、多くのフィードバック情報を得て制御が行われる。

小型ビークルへの搭載を前提とした今回の場合には、その動作を先じめ設定した範囲内に制限するために、各動作軸の位置情報が最低限必要である。これは、マニピュレータのアームがビークル前面の透視窓や照明灯等へ接触もしくは衝突して互いに損傷する事を防止するためのものである。また、この位置情報は、アームを予め設定した位置へ誘導する自動機能にも利用できる。さらにこの機能は、マニピュレータを操縦するオペレータの負担を軽減することもできる。例えば、作業を開始する際に、予め作業を開始しやすい位置（例えば動作範囲の中心）へ自動で移動させる動作や、把握した試料をサンプルバスケットへ自動的に収納する動作等が考えられる。

取扱重量は最大2 kgとし、ハンドによる把握力は最大1 kgを目標とした。把握動作は、採用されるアクチュエータにも依るが、テレビカメラを通した視覚情報だけでは把握力の制御が困難である。これを解決する一例として、把握力に対する反力のフィードバック情報で電氣的に制御する方法が考えられるが、該当するセンサの耐圧性、重量軽減ならびに操縦性を考慮するとこの方法は採用しにくい。したがって、機械的な簡易機構に依る方法が望まれた。

検討した要求性能を設計条件としてまとめたものを表1に示す。これらの条件は設計の目安としたものである。

表1 小型マニピュレータの設計条件

使用環境	最大深度 500 m の海水中
作業内容	主に海底における試料の採取
動作自由度	3 Ⅰ 肩軸水平旋回 Ⅱ 肩軸垂直上下動 Ⅲ ハンド部把握
制御方法	ON-OFF 制御 位置フィードバック方式
取扱重量	2 kg 以上
把握力	1 kg 以上
把握長	100 mm 以上
全体重量	空中：7 kg 以内 水中：5 kg 以内

3. 駆動方法

製作する小型マニピュレータの駆動方法は、基本的には一般の産業用のものと同様であるが、海水中での厳しい条件に対する対策と小型軽量化を含めた駆動方法を検討した。

3.1 駆動源

一般のビークルに搭載されているマニピュレータの駆動源は、油圧力を使用している。これは、水中における動力源としての有効性ととも、ビークルの推進機自体に油圧駆動を採用していることに依る。

小型ビークルに搭載されているマニピュレータの駆動源は、その推進機と同様に電力を直接利用するものがほとんどである。一部の小型ビークルでは、マニピュレータを含む工具の駆動源として空気圧力を採用しているものもあるが、その有効性は報告されていない。

今回のマニピュレータを搭載するビークルの駆動電源は、ビークル自体の耐圧容器内で変圧された交流電源（最大2 KVA）である。したがって、製作するマニピュレータの駆動源も、これを利用することを前提として、その許容消費電力を100 VA以内に納めることを目標にした。

3.2 アクチュエータの選定

水中用の小型マニピュレータに採用できるアクチュエータの方式としては、直接電気駆動ができる電気モーター、電磁ソレノイド、および形状記憶合金による3つのものを検討した。これらの方式は、形状記憶合金を除いて一般の産業用マニピュレータに広く利用されているものであるが、駆動性、制御性ならびに保守性等の総合評価では、モーターによる方式がもっとも有効である。今回、製作するマニピュレータにも、この方式を採用した。その理由は、以下の通りである。

ソレノイド方式による駆動機構ならびに駆動回路は、モーター方式に依るものと比べて比較的簡単なものとなるが、駆動力や位置の制御が難しく、その動作に柔軟性がない。また、形状記憶合金を用いたユニークな方式のアクチュエータ⁶⁾も検討した。その特長としては、

- ・出力 / 重量の比が大きい
- ・加熱速度の制御による起動トルクの特性が良い

- ・サーボ機構において検出部と駆動部が兼用できる

等が挙げられる。しかし、駆動力を得るための電気-機械変換が熱エネルギーを介してなされるために水中では変換効率が低くなる。さらに、その動作に二方向動作を持たせる機構や、水中での加熱・冷却作用を促進させる機構の追加が必要となり、したがって、結果的には出力 / 重量の比が低下する事になるため、採用しなかった。

電気モーターに関する詳細事項については、ここで述べるまでもないが、今回製作する小型マニピュレータへの採用候補として

- ・ステッピングモータ
- ・直流モータ
- ・ブラシレスモータ
- ・交流モータ

が挙げられる。

ステッピングモータは、入力パルス数に応じて回転するものであり、小型マニピュレータに採用した場合の応答性と位置制御精度は非常に高く、フィードバック機構がなくてもオープンループ制御が可能なことから、水中での使用ならびに小型軽量化等の条件には適合している。しかし、今回製作するものに対しては性能的にオーバースペックとなり、さらに制御用リード線の本数が多くなるため、採用が難しいものと判断した。

直流モータは、電力変換が非常に単純であり、総合的な性能において、他のモータよりも多く採用されている。しかし、水中駆動のための均圧オイル中での駆動では、ブラシと整流子間に生じる火花でオイル中にガスが発生し、均圧作用を妨げる。さらに、均圧用オイルは空気に比べて粘性が高いため整流子の回転推力によってブラシが浮き上がり、トルクの低下が考えられるため、不採用とした。

また、これらの欠点を補うブラシレスモータの採用も検討したが、電流切換用の回路をモータとともにオイル漬けする必要性が生じ、回路部品の耐圧性を考慮しなければならないことから、不採用とした。

交流モータは、直流モータに比べて効率が低く、多くの欠点を持っているにもかかわらず、あえて採用した。その理由は、ブラシ機構がないため均

圧用オイル中で問題なく駆動できることである。さらに、交流インダクションモータでは、速度制御を採用しない場合、駆動回路が非常に簡単となり、回転方向の切換えも容易に行なえる。また駆動用のリード線が3本のみと少なくなるため、システム全体が軽量化されるものである。したがって、交流かご型インダクションモータを採用することとした。

3.3 位置フィードバック

一般の産業用マニピュレータは、主に各動作軸の速度、荷重および位置の3つの物理量を電気信号として検出し、その変化量をコンピュータで制御しているものが多い。水中におけるマニピュレータでも、その作業性から考えて、上記3つのフィードバック信号が必要であり、大型のビークルに搭載しているマニピュレータでは必須のものとなっている。

本製作では、前述した要求性能から、最低限必要な位置フィードバック制御を採用した。電気モータをアクチュエータとする位置フィードバックは、光、磁気等のセンサによるエンコーダを使用して、直接モータの回転数を検出する方法が一般的である。しかし、今回採用した方法は、駆動軸の最終端においてポテンショメータによる回転角度を検出することとした。この方法では、減速された駆動軸の最終端において比較的低い回転数となるため、軸シールの機構や筐体の構造が簡単化されるメリットがある。

3.4 駆動機構

各関節の駆動機構は、電気モータの回転軸出力を減速し、一台のモータ軸出力で一つの関節を動作させる方式とした。他の方式としては、一台のモータ軸出力からクラッチ機構を用いて複数の関節軸へ切り替えるものも検討した。このクラッチ機構を用いた方式では、使用するモータが一台のみとなり、アームが軽量化される。しかし、複数軸の同時駆動が不可能なことから、駆動力を各関節軸へ伝達する可撓軸の水中での使用等に無理があるため、この方式は採用しなかった。

各関節軸は、水平旋回軸と垂直上下動軸を肩関節として、可能な限りビークルの取付位置へ近づけることとし、アーム部分が把握機構のみからなるように全体形状を考慮した。これは、アーム自

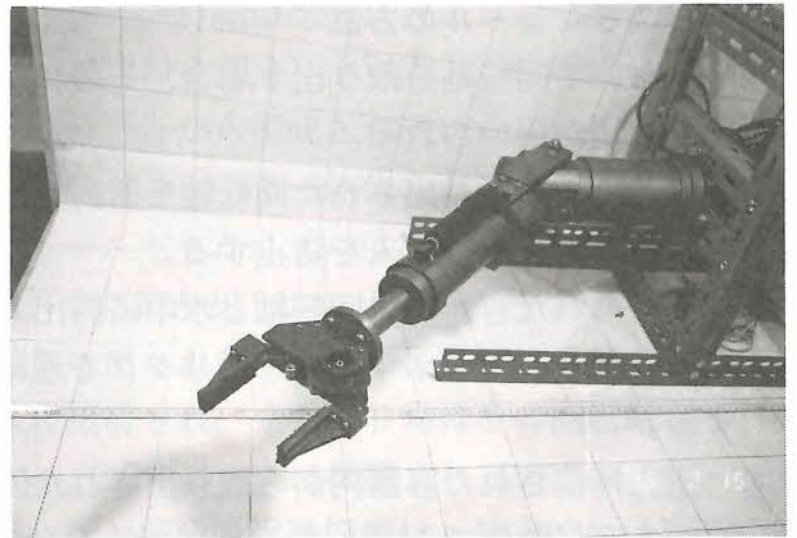


写真1 小型マニピュレータの試作機
A prototype of small simple manipulator

体の軽量化ならびに垂直上下駆動負荷の最小化を狙ったものである。

モータの減速機構は、2段階に分離して配置した。1段目は、モータの高速回転軸を直接減速する役目を持たせた。

したがって、この部分は潤滑の必要があるため、モータとともに均圧容器へ収納させるものとした。2段目は、低速回転の減速機であり、非駆動時の制動作用をこの部分に付加することが最良と考えた。

回転軸を制動する機構としては、ソレノイド等による多くの電気制御式ブレーキが考えられるが、機構ならびに制御回路の複雑さは直接的に外形や重量の増加につながるため、ウォームギヤとホイールから成る簡単な減速機を採用し、制動機構も兼用するものとした。したがって、ギヤ特有のバックラッシュのために、制動精度は犠牲となるが、海水中に露出させることができるため、大幅な重量軽減となった。

駆動機構の動作は、写真1に示す試作機を用いて確認した。その結果、海底面上での把握動作は、ハンド部が海底面と接した状態で行なわれることが望ましいと判明した。これは、アーム部分の自由度の増加を示唆しているが、全体重量の制約からそれは行なわず、ハンド部分が常に水平位置を保持できるような平行リンク機構をアームの垂直動作機構に付加することで解決した。また、ハンド部の把握機構にもこの平行リンク方式を採用した。

3.5 シールの方法

水中において回転軸を取り出す場合、一般に次のような方法が用いられる。

- ① 容器内から取り出された回転軸を密封装置でシールし、水の流入を防止する。
- ② 閉じられた容器内の回転軸と水中に露出した被駆動軸をマグネットカップリングで連結する。
- ③ 圧力補償された容器内から取り出された回転軸を密封装置でシールする。

①の方法では、回転軸と密封装置間の摩擦力が容器内外の圧力差によって増加するため、その損失トルクを見込んだパワーが必要となる。また、容器を耐圧構造とするため、軽量化が難しい。

②の方法は、永久磁石による貫通部が不用の回転軸カップリングであり、推進機等に利用されているが、小型マニピュレータ用としては、重量軽減ならびに小型化が難しい。

したがって、今回製作するものの回転軸シールは、③の方法を採用した。その理由は、以下の通りである。第1に、圧力補償された容器は耐圧構造が不要となるため重量の軽減が計れる。第2に、圧力差がないために回転軸シールが簡単になり、その摩擦力による損失トルクが小さくなる。第3には、圧力補償を施すための均圧流体にオイルを使用すれば、機械的な摩擦機構部の潤滑が計れる。

圧力補償の方法は、内容積が変化する均圧機構を有する容器に圧縮流体を満し、その内圧と外圧を平衡させるものである。容器内の圧縮流体には一般に絶縁油が用いられ、均圧機構を最小化するために低圧縮率であることが要求される。また、容器内に収納するモータの回転損失を最小とするために、低粘度であることも必要である。

4. 設計製作

前述した設計条件ならびに各機構の検討に基づいて、水中用の小型マニピュレータを設計し、製作した。

4.1 全体設計

図1に製作する小型マニピュレータの全体組立て図を示す。各部の寸法と動作範囲は、ビークルに搭載されているテレビカメラの水中画角から作業範囲を検討して決定した。

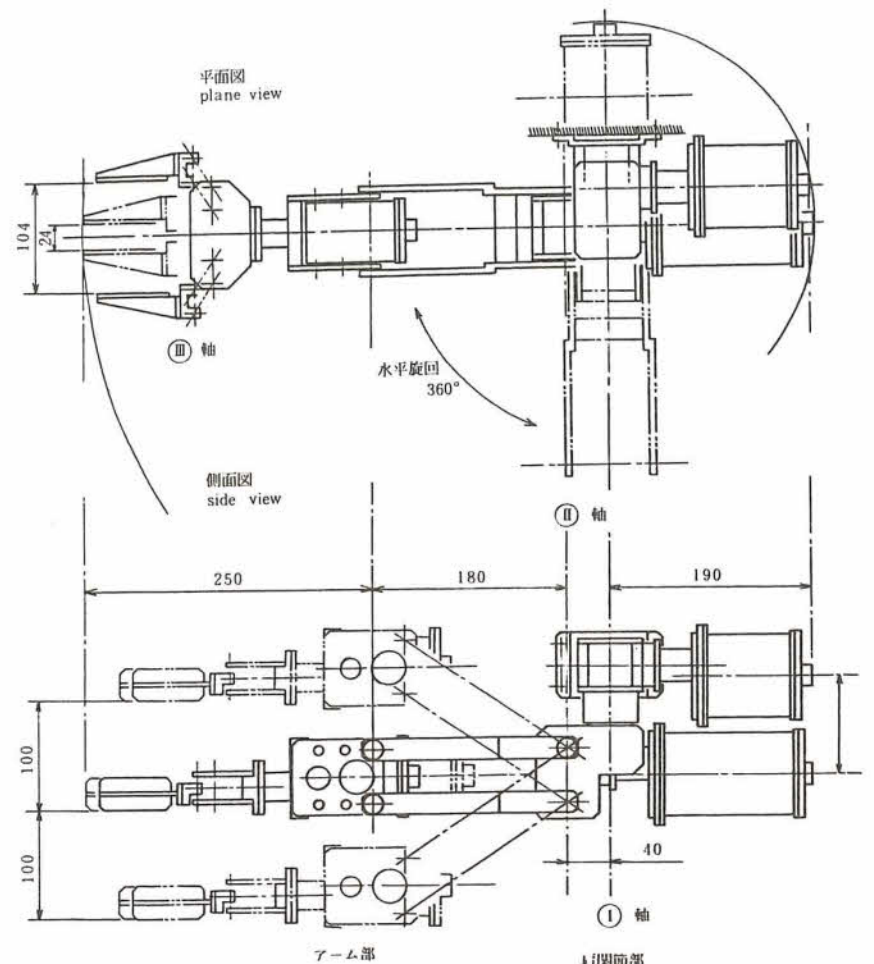


図1 小型マニピュレータの全体組立図
Assembly drawing of small simple manipulator

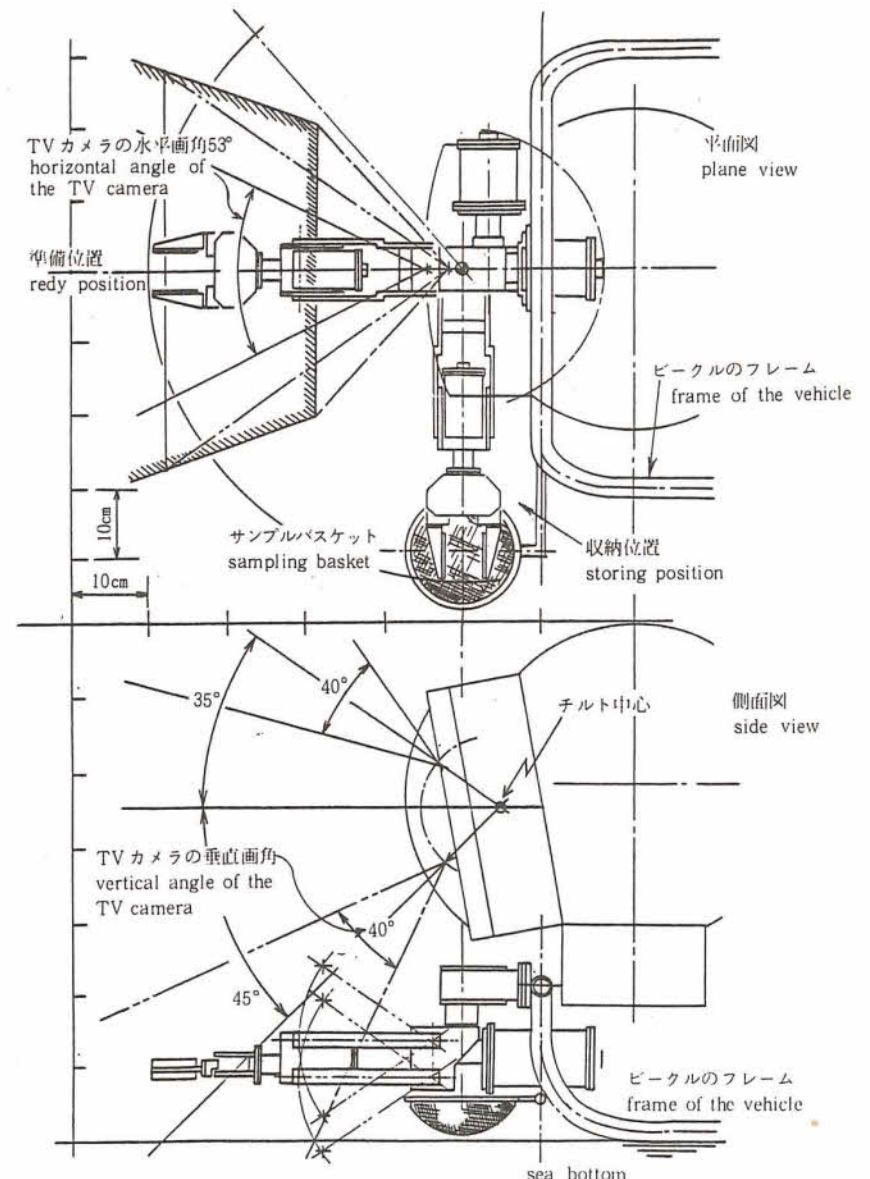


図2 テレビカメラの撮影範囲
Picture angle and area of TV camera on the vehicle

図2にテレビカメラの撮影範囲と、設計の際に予め検討したマニピュレータの計画配置を示す。図中の斜線部分は、海底面での撮影範囲を表わしている。この範囲は、チルト装置の動作角度が下方45度（最大）の場合のものであり、ビークルのテレビカメラからビークルにもっとも近い海底面での作業が可能となる視野である。したがって、製作するマニピュレータのアウトリーチは、この範囲内に届く長さとした。これらの検討結果から、アームのアウトリーチは、470mmとし、水平動作は旋回角度で360度、垂直動作は上下動200mmとした。アームの水平旋回は機構上360°全周にわたって回転可能であるが、実質上はその回転動作が非動作時の収納位置（採集物の格納位置も兼ねる）と作業準備位置への移動のみである。また、各関節軸の動作範囲はその制御用プログラムによって予め設定することができる。

4.2 各部機構設計

製作したマニピュレータは、機構上、肩関節部分とアームを含むハンド部分とから構成されている。図3に肩関節部分の機構を、図4にハンド部分の機構を示す。

さらに、肩関節部分は、アームの水平旋回機構Ⅰ軸（図の上部分）と垂直上下動機構Ⅱ軸（図の下部分）とから構成されている。これらの駆動軸は、誘導モータと一体化した減速機の回転軸からウォームギヤとホイールによって、その軸と直交する方向に取り出した。Ⅰ軸は、ウォームホイールから取り出された回転軸が、直接、Ⅱ軸を含むアームに接続され、また、Ⅱ軸はその回転軸が平行リンク方式のアームに接続されている。

ハンド部分の駆動機構は、基本的には肩関節部のものと同様であるが、その把握力を制限するためのトルクリミッタ機構を付加した。これは、クラッチ機構の摩擦面に圧縮コイルバネ（SUS製）で任意の摩擦力を与えたもので、軸トルクがそれを上回った時に、回転軸が空回りする仕組である。摩擦面には、海水中でも摩擦力が変化しない樹脂系の材料を選定した。また、ハンド部分とモータ容器とは、フランジ構造で接続され、その駆動軸も簡単に接続・取外しが可能な差し込み式の軸カップリングとした。これは、この把握ユニットの代わりに、他の特定作業専用のユニットを容易に接続できるように配慮したものである。また、各モ

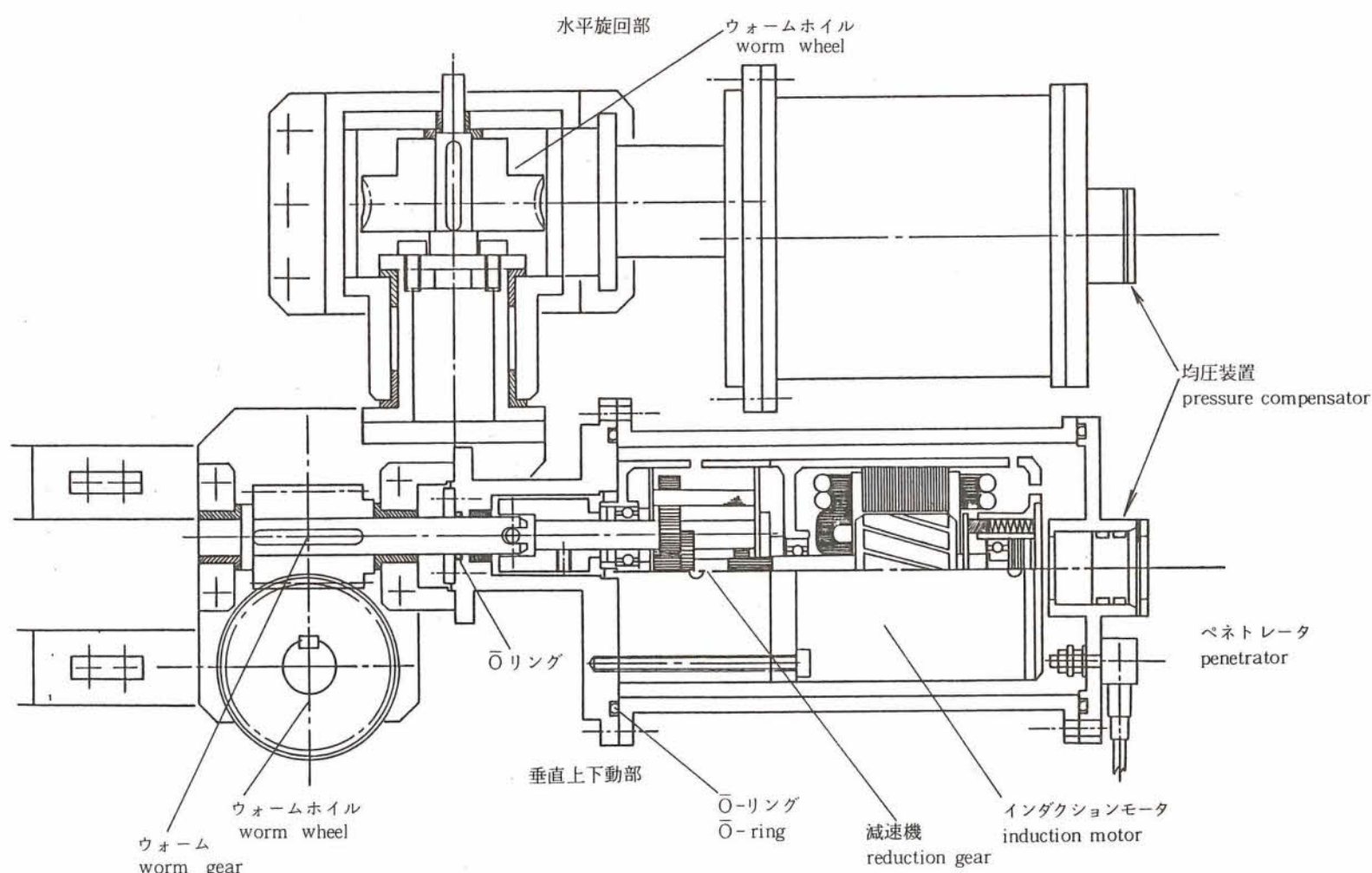


図3 肩関節軸の組立図

Assembly drawing of shoulder joint

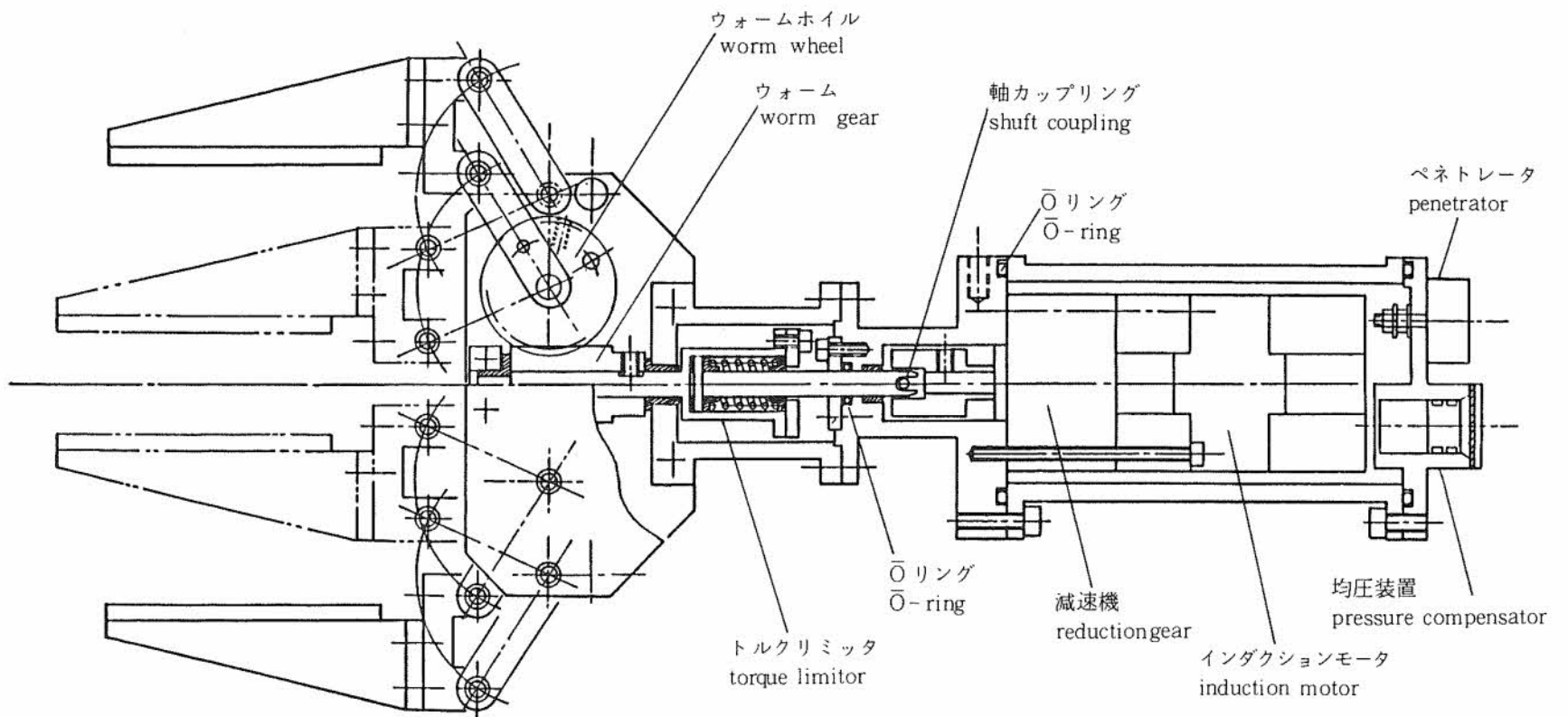


図4 ハンド部の組立図

Assembly drawing of hand

ータ容器の均圧機構は、使用するオイルの圧縮率（潜航深度相当）と容器の内容積からその変化分を計算し、余裕を見込んで決定した。

各駆動軸の位置フィードバック用ポテンシオメータは、図5に示すような機構で配置した。ポテンシオメータとして使用する可変抵抗器は、オイル中でも接触抵抗が変化しない磁気抵抗素子を用いたものを採用した。その圧力補償は、信号用リード線の保護用ビニールチューブにオイルを満して均圧機構とし、兼用させた。

各回転軸の密封装置には、ニトリルゴム製のOリングを使用した。Oリングと各回転軸との間の摩擦トルクは、予め計測した結果 $0.5\text{kg}\cdot\text{cm}$ 以下であった。したがって、モータ出力は、駆動出力にこの摩擦トルクによる損失分とフィードバック用回転軸のそれとを見込んで決定した。

圧力補償のための均圧用オイルとしては、絶縁性の高いシリコンオイルを採用⁷⁾した。採用したシリコンオイルは、粘度が 10cs 、圧縮率が 25°C の $100\text{kg}/\text{cm}^2$ の環境下で 1.4% と低く、前述の必要条件に適合している。

各部品ならびに匡体の材料は、原則として耐食アルミニウム合金（A 5052）にタフラム表面処理を施したものを使用したが、駆動力を伝達する回転軸やリンク等の高強度を必要とする部分にはステンレス鋼（SUS 304）を使用した。さらに、回

転軸を支持する軸受けは、海水に露出する部分に樹脂性のすべり軸受けを使用し、均圧容器内へ収納したモータおよびギヤには既製のボールベアリングをそのまま利用した。

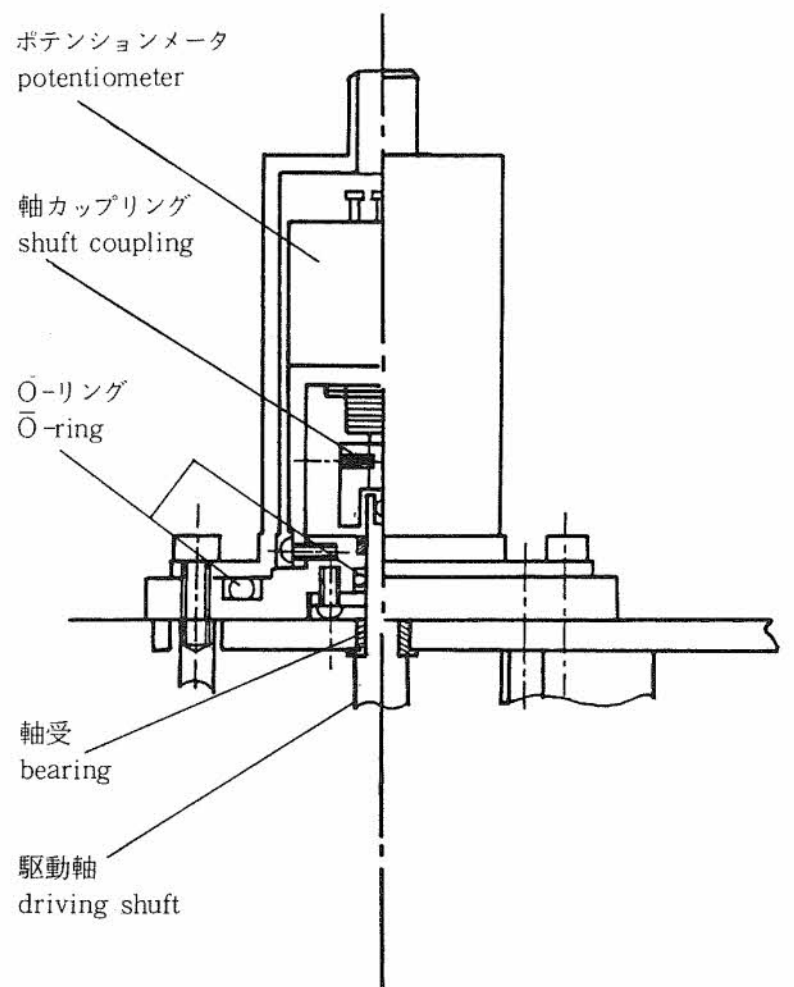


図5 位置フィードバック用センサ

Assembly drawing of position feed-back mechanism

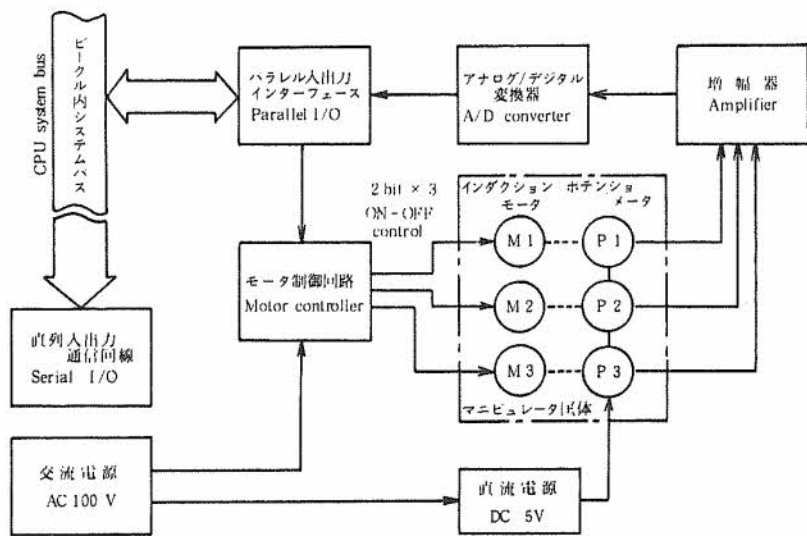


図6 制御システムの概要

Block diagram of control system

4.3 制御システム

製作するマニピュレータの制御は、基本的には搭載ビークルの制御を行うコンピュータシステムから行われることを前提条件としている。搭載ビークル内には、船上からのCPUシステムバスがシリアル通信回線を介して準備されているので、これを使用する。したがって、このマニピュレータの制御ルーチンは、ビークルの制御用プログラムのループ内に挿入される。図6に制御システムの概要を示す。

4.4 製作

製作したマニピュレータを写真2と3に示す。各機構に採用した機械部品の一部には、既製品を利用したものもあるため、製作したものの仕様ならびに性能等が当初の設計条件と多少異った。全体の空中重量は8.5kg（水中重量5.2kg）と設計条件を多少上わまっているが、搭載ビークルの予備浮力の増加によりカバーできる。

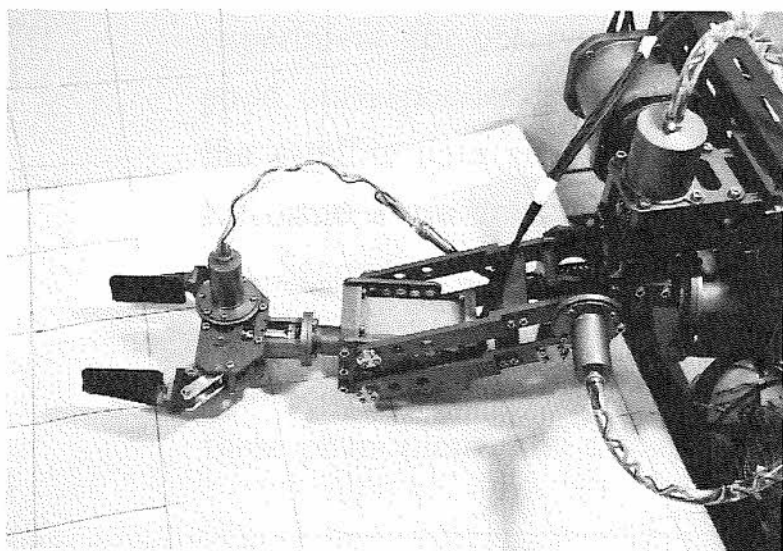


写真2 製作された小型マニピュレータ

The small simple manipulator

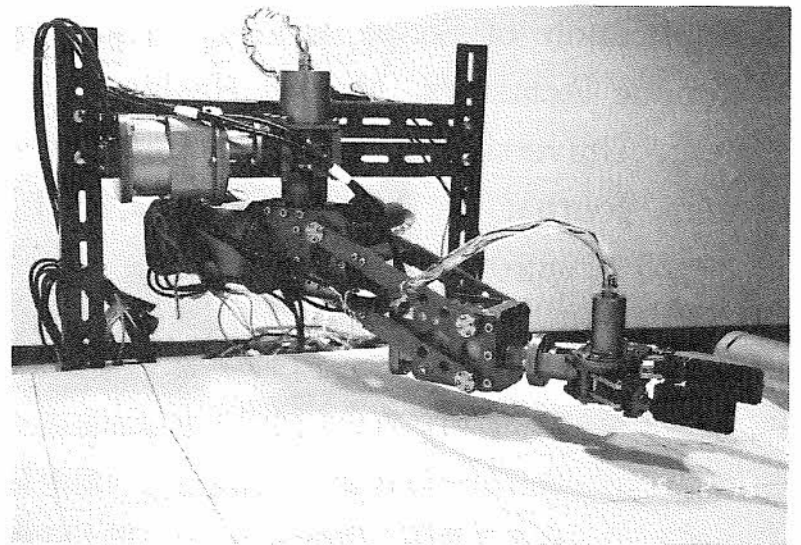


写真3 製作された小型マニピュレータ
試験用架台に取付けた状態

The small simple manipulator
mounted on a test support frame

5. おわりに

今回製作した小型簡易マニピュレータは、性能確認試験の結果から、表1に示した設計条件をほぼ満足するものであった。今後、この小型マニピュレータをビークルに搭載した状態での総合的な動作性能試験を実施し、小型ビークルによる水中での作業能力をさらに高めるために、特定作業専用のハンドユニットを開発する予定である。

最後に、本設計製作にあたって助言をいただいた深海開発技術部の各位に謝意を表する。

文献

- 1) Mutsuo Hattori, Kenichi Takahashi, Yukio Kadomoto Present status of ROVs in JAMSTEC Proc. ROV '85
- 2) Andrew R. Bazeley Tool suit for inspection ROVs Proc. ROV '83
- 3) Christopher J. Nicholson, Paul Ferris Smith. The design and development of a general purpose ROV tool system. Proc. ROV '83
- 4) T. Aoki, M. Hattori, K-I. Takahashi Fiber-Optic-Tethered Vehicle "HORNET-500" Proc. ROV '84
- 5) 青木太郎, 服部陸男, 野本昌夫, 高橋賢一 自航式ビークル「HORNET-500」の開発

6) Application of Shape Memory Alloy to Robotic Actuators. Minoru Hashimoto et,al. University of Electrocommunications Journal of Robotic Systems, 2 (1), 3 - 25 (1985)

7) Thomas H. Mehnert
HANDBOOK OF FLUID - FILLED,
DEPTH / PRESSURE - COMPENSATING
SYSTEMS FOR DEEP OCEAN APPLI -
CATIONS

(原稿受理：1986年 3 月31日)