

無索海中ロボットの遠隔操作に関する研究

(その1: 時間遅れに対応するシステム構築)

川野 洋* 正員 近藤 逸人**
正員 浦 環***

Teleoperation System for Unmanned Untethered Underwater Robot
(Part 1: System for Time Delay)

by Hiroshi Kawano Hayato Kondo, *Member*
Tamaki Ura, *Member*

Summary

The AUV (Autonomous Underwater Vehicle) is not restricted by the umbilical cable and able to swim freely. Complex control is, however, significantly difficult, because of low rate and long delay in acoustic link between the operators and the vehicle. Since there are many complicated missions for underwater vehicle which need powerful operators control ability, it is desirable that unmanned untethered underwater robots in deep water could be remotely controlled by the operators on surface.

In this paper, the teleoperation system for unmanned untethered underwater robots, which cope with long time delay of acoustic communication, is proposed. A virtual robot which should immediately represents the result of remote control is simulated and shown to the operators on the graphical workstation as prediction computer graphics. Both the virtual robot and the real robot have the same "World Model" which has been constructed based on predetermined configuration of the seabed and obstacles. These robots generate their path and move themselves by receiving intermittently operators' commands. The real robot status and the information on encountering with unknown obstacles, which has not been written in the World Model, are sent to the workstation. The operators can decide how to operate the vehicle in support with three-dimensional computer graphics (3 DCG) on the workstation, which compares the motion of the virtual robot and that of the real robot in the World Model. The workstation provides the whale view and the virtual diver view to back up the operation. The proposed system is evaluated by the simulation experiments, and the results show that long delay in acoustic communication can be overcome and that remotely operation can be realized by the proposed system.

1. はじめに

近年、人間に代わって海中で作業をおこなう海中ロボットの研究が世界的におこなわれている。その種類はアンビカル・ケーブルの有無により有索と無索とに大別される。

無索海中ロボットは自律型海中ロボット¹⁾²⁾とも呼ばれ、電源の供給や通信のための索を持たず、自身に搭載されたコンピュータにより行動が制御される。索がないことにより海中での行動に制限がなく、ロボットのダイナミクスにも索の影響を考慮する必要がない。また、海上の支援母船に長大な索を扱うための大掛かりな設備も必要がないため、建造や運用にかかるコストも低く押さえられるといった利点がある。しかし、複雑で未知の要素を多く含む海中で、ドッキングやマニピュレーションのように高度な作業をおこなうためには、搭載のコンピュータとソフトウェアだけで完全に自律制御することに関して、いまだ多くの課題が残されている。

* 三菱電機(株)(研究当時、東京大学大学院工学系研究科)

** 東京大学大学院工学系研究科

*** 東京大学生産技術研究所

原稿受理 平成9年7月10日

秋季講演会において講演 平成9年11月14, 15日

有索の海中ロボット³⁾は、人間が遠隔操作することで、複雑なミッションを円滑にこなすことができる。しかし、索の存在によりロボットの行動が制限されたり、長大な索の扱いには特別な配慮が必要となり、コストの増大や取り扱いの不便さが課題となっている。

これらのことから、両者の利点を併せ持つ「母船から離れていても遠隔操作できる無索海中ロボット」の実現が望まれている。無索海中ロボットの遠隔操作システムを実現するためには、次のような課題を克服する必要がある。一つは、海中での通信に用いられる、超音波の特性に関する問題であり、もう一つは、海中ロボットの環境認識能力に関する問題である。

水深4,500[m]にある海中ロボットと通信をする場合を考える。超音波が海中を伝播する速度は約1,500[m/s]なので、片道に約3秒を要する。また画像伝送では、仮に通信速度を10,000[bit/sec]とし⁴⁾、256階調の120×80ドット白黒画像を送信するのに約7秒かかることになる。すなわち、船上の操縦者が海中ロボットを遠隔操作する場合、操縦者の発信した命令がロボットに到達するまでに3秒かかり、命令を受け取ったロボットが自身の状態を返信してから、操縦者に届くまで、さらに3秒かかる。操縦者は3秒前のロボットの状態しか知ることができず、操作入力の結果を知るのに最低6秒かかる。画像情報に関しては、10秒前の120×80画素の水の中画像を、7秒ごとに静止画としてしか得ることができない。このような条件下では、有索の海中ロボットを遠隔操作するような手法を適用することは困難であり、海中ロボット自身に、ある程度の自律性を持たせつつも、少ない情報で時間遅れに対応しながら遠隔操作できるシステムが必要となる。

また、海中にあるロボットの環境認識能力は低いといえる。深海においてCCDカメラでは数メートルの視界しか得られず、超音波測距センサでは検知した障害物の全体像が捉えにくい。これらの情報を、なるべくわかりやすいかたちで操縦者に提供し、操縦者が臨場感を損なわずに、円滑に操作をおこなえるよう支援するシステムの構築が必要とされる。

ウッズホール海洋研究所(WHOI: Woods Hole Oceanographic Institution)では、ROV(Remotely Operated Vehicle)のJASONを用いてロボット搭載のマニピュレータの遠隔操作に関して研究がおこなわれている⁵⁾。この研究では、マニピュレータによって、対称物をかごの中に入れるといったミッションを想定しており、地上のグラフィクス・ワークステーション上で、マニピュレータのシミュレーションをし、操縦者は基本的にはそれを見ながら一連の操作コマンドを入力する。このコマンドは超音波通信によって後でまとめて海中ロボットに送信される。宇宙ロボットのマニピュレータの遠隔操作についても同様なシステムの研究開発がなされている⁶⁾。これらのシステム

では、人工的であるかもしくは、比較的既知な部分の多い環境における作業を想定しており、ロボットの動作環境や流れに関する未知の要素に対する考慮が十分になされていない。海中では海流などの外乱や、詳しく記述されていない地形など、未知の要素が多分に含まれる。そのため、命令を受け取った後のロボットの挙動についての確実性が低くなり、命令を与えた後も操縦者がその行動に随時介入できるようなシステムが必要となる。

本研究では「時間遅れに対応し、無索海中ロボットの自律性を有効に生かしながら、未知の要素にも対応し、海中環境に関して得られる少ない情報をもとに、あたかも操縦者が実際に海中ロボットの作業環境に立ち会っているような感覚で、遠隔操作をおこなうことができるシステム」を構築し、その可能性を示す。

2. 遠隔操作システムの構築

2.1 遠隔操作システムの概要

遠隔操作システムは、次に示す条件を前提に構築する。

- (1) 海底地形の大まかな情報が事前に得られている。しかし、行動領域には未知の障害物が存在する可能性がある。
- (2) 操縦者との通信にはコマンドリンクと画像情報リンクの独立した2系統の超音波通信を用いる。
- (3) ロボットの位置はある定められた精度で計測できるものとする。
- (4) 海中ロボットは、定点保持や目標地点までの自動航行などの自律性を持つ。
- (5) ミッションは、目標地点から離れた点よりロボットが行動を開始し、目標地点に近づき、そこで何らかの作業をおこなうこととする。

構築した無索海中ロボットの遠隔操作システムのハードウェア構成をFig.1に示す。操縦者側には操作用のグラフ

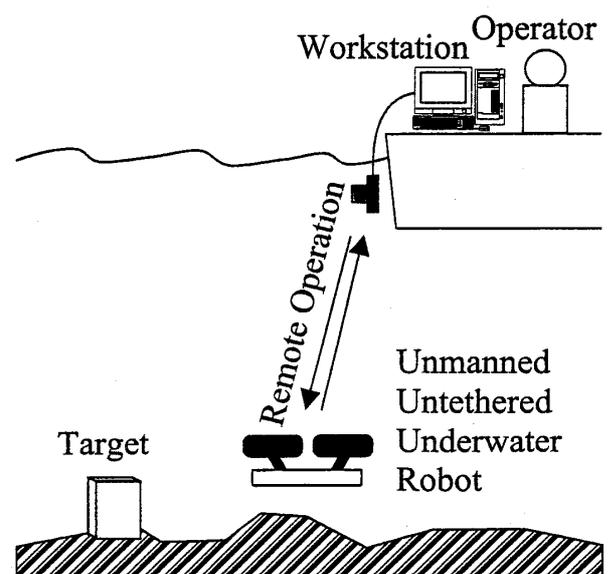


Fig. 1 Teleoperation System (Hardware)

イクス・ワークステーションを設置する。海中ロボットには、各種センサ、CCDカメラおよびコンピュータを搭載し、自律的な航行を可能とする。ワークステーションと海中ロボットは超音波による通信をおこなう。

ソフトウェアの構成を Fig. 2 に示す。ワークステーションでは操縦用グラフィカル・ユーザ・インタフェース（操縦用 GUI）が実行され、実ロボットに搭載されたコンピュータでは行動制御アルゴリズム（Vehicle Control Algorithm）が実行される。操縦用 GUI は、操縦者の操作入力を受け付け、実ロボットの状態や、海中環境に関する情報を、3次元コンピュータ・グラフィクス（3DCG）により操縦者にわかりやすく表示する。操縦用 GUI には仮想ロボットが含まれる。仮想ロボットと実ロボットとは、ワールドモデルとロボット・ダイナミクスモデルとを含む同じ行動制御アルゴリズムを持つ。ワールドモデルとは海底地形や障害物の既知の情報であり、海底地形を表現したものである。本研究のシミュレーションで使用した海底地形とワールドモデルの例を Fig. 3 に示す。

2.2 時間遅れに対応するシステム

仮想ロボットはそのダイナミクスモデルおよびワールドモデルをもとに、実ロボットと同様の制御則によって行動をシミュレートされる。操縦者の操作入力には時間遅れなく行動を開始し、実ロボットの行動を予測する形でその行動が操縦者に提供される。

操縦者の操作入力は仮想ロボットと同時に実ロボットにも送られ、通信による時間遅れ t_d の後、実ロボットは行動を始める。

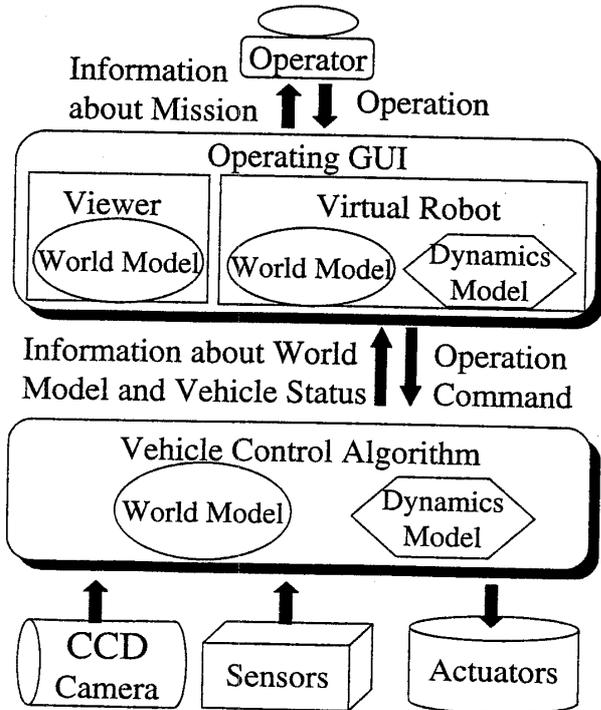
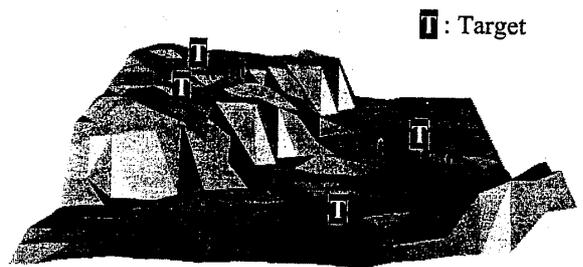


Fig. 2 Teleoperation System (Software)

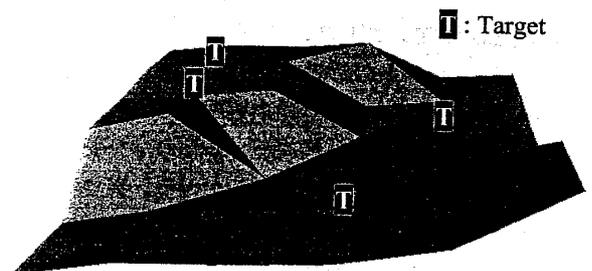
情報の流れを説明するために以下に示す3つの時間を定義する。(Fig. 4 参照)

- (1) 操縦者時間 (Operator Time)
- (2) 仮想ロボット時間 (Virtual Robot Time)
- (3) 実ロボット時間 (Real Robot Time)

操縦者時間は操縦者にとっての経過時間であり、遠隔操作を開始した時点を実点とする。仮想ロボット時間は、仮想ロボットにとっての経過時間であり、操縦者から最初の操作入力を受け取った時点を実点とする。仮想ロボット時間は操縦者時間に一致する。実ロボット時間は実ロボットが



(a) Seabed-1



(b) World Model-1

Fig. 3 Real Seabed-1 and World Model-1 in the Robot and Operating GUI

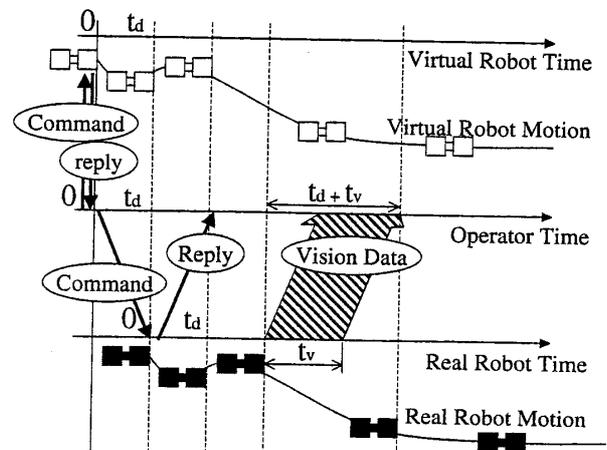


Fig. 4 Time Coordinates and Acoustic Link

操縦者から最初の操作入力を受け取った時点とを原点とする。実ロボットへの通信には時間遅れが伴うので、実ロボット時間は操縦者時間から t_d 遅れた時間となる。実ロボットが仮想ロボットのシミュレーションと全く同じ行動をとれば、仮想ロボット時間と実ロボット時間で、同一時刻における両者の行動は一致する。

2.3 通信のタイミング

情報の流れを Fig. 5 に示す。実ロボットは最初の命令を受け取った時点から、 t_c ごとに自身の世界座標位置および各センサによる測定値を操縦者側に送信し続ける。画像情報はこれとは別に、情報を送信するのに要する時間 t_v ごとに送信される。ある時間に操縦者が命令を発信したとすると、 t_d の後にこの命令は実ロボットに到達し、実ロボットは次の送信サイクルの時点で命令に対する自身の状態を操縦者に送信する。操縦者は命令を発信してから $2t_d + \alpha$ ($\alpha \leq t_c$) 後に実ロボットの反応を知ることができる。また、画像情報に関しては、 $t_v + t_d$ 時間前の画像を、 t_v ごとに静止画として得ることができる。

本システムでは操縦用 GUI により、 t_d 前の実ロボットを t_c ごとに、仮想ロボットをリアルタイムに、 $t_v + t_d$ 前のカメラ撮影時のロボット位置を t_v ごとに更新し、それぞれ表示する。

2.4 行動制御アルゴリズム

Fig. 6 に実ロボットの行動制御アルゴリズムの構成を示す。行動制御アルゴリズムは命令処理部と運動制御部で構成される。命令処理部は、操縦者からの命令を受け取り、内部に持つワールドモデルを参照しながら、実ロボットが目標とする軌道を生成する。ロボットが未知環境に遭遇したときはワールドモデルに修正を加えて、内容をコマンドリンクを通して操縦用 GUI に伝える。仮想ロボットの行動制御アルゴリズムは、本質的には実ロボットのものと同じであるが、未知環境への遭遇の情報は実ロボットから与えられ、操縦用 GUI はこれを、ワールドモデルに球体を追加することで表現する。

運動制御部は命令処理部により生成された複数個の航路点で表わされる軌道を目標軌道として実ロボットの運動を

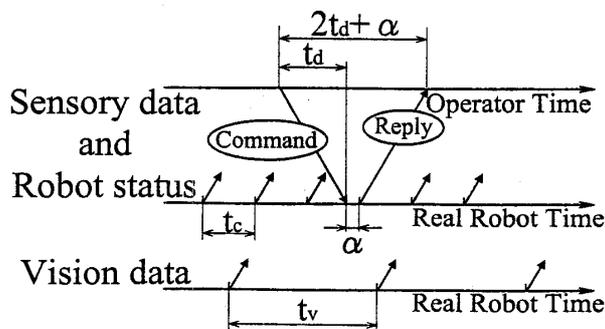


Fig. 5 Information Flow via Acoustic Link

制御する。

2.5 仮想ロボットと実ロボットの行動の一致

仮想および実ロボットのワールドモデルは、通信による時間遅れのために必ずしも一致せず、ダイナミクスモデルの誤差により位置の差が生じる。このため、それぞれの命令処理部で生成された軌道は同一でない場合がある。

Fig. 7 において、仮想ロボットが B 点に、実ロボットが A 点にある時点でそれぞれ自律航行の命令を受け、Path-V と Path-R の軌道を生成したとする。各ロボットは軌道生成後すぐに行動を開始する。この軌道は操縦用 GUI に表示され、操縦者は実ロボットの航行軌道をいずれにするか選択し、必要があれば修正を加える。操縦者が Path-V を選択したとする。この命令を受信するまで、既に実ロボッ

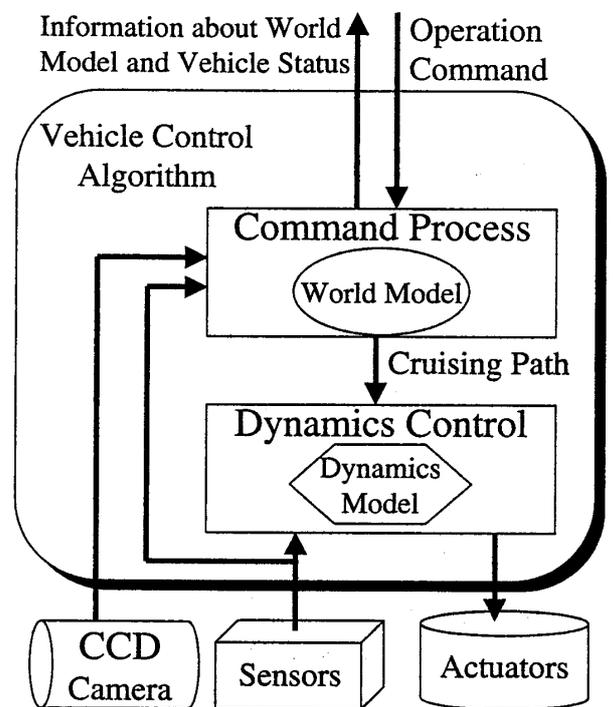


Fig. 6 Vehicle Control Algorithm

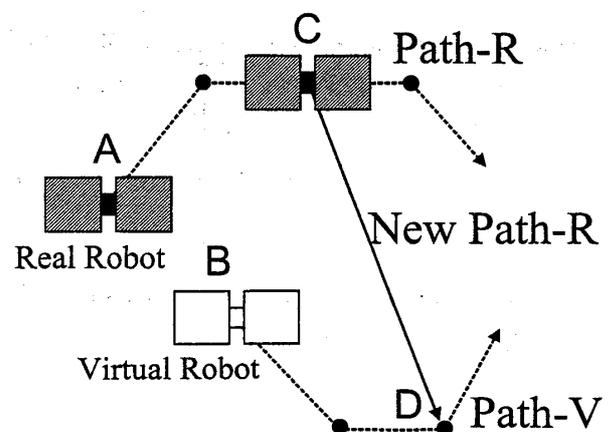


Fig. 7 Robot Path

トは Path-R に沿って C 点まで航行している。実ロボットは命令を受信した C 点で静止し、Path-V への変更軌道、すなわち C 点と次の航路点 D を結ぶ New Path-R を生成する。この軌道は航路点の座標データとして操縦用 GUI に送信される。実ロボットは軌道を送信した後、C 点で $2td+tc$ 静止してから行動を開始する。仮想ロボットは変更軌道 New Path-R を受け取ると C 点へ移動し、 tc 静止の後、New Path-R に沿って行動を開始する。実ロボットから操縦用 GUI まで通信に td かかっているため、以上により、仮想ロボットは実ロボットの td 先の行動を予測し、その行動を操縦者に提供することができる。操縦者が Path-R を選択した場合も同様に対応できる。

実ロボットが未知の障害物を発見した場合、実ロボットはある定められた回避行動をとる。障害物発見の報告は td 後に操縦用 GUI に到達する。仮想ロボットは、実ロボットが障害物を発見した位置から、実ロボットが $2td$ の時間、回避行動をおこなった位置を予測し、その地点からシミュレーションを継続する。これにより、仮想ロボットは実ロボットの td 先の行動を予測し、その行動を操縦者に提供することができる。

2.6 操縦用グラフィカル・ユーザ・インタフェース

操縦用 GUI (Fig. 8) は、鯨瞰図パネル、操作パネル、実画像パネルの 3 つのパネルを持つ。ソフトウェアの開発は、東京大学生産技術研究所浦研究室の MVS (Multi-Vehicle Simulator)^{7,8)} をもとにおこなった。MVS は海中でのロボットの動きや、海底地形などをシミュレートできる。

鯨瞰図パネルは、ワールドモデルと td 前の実ロボットを 3 DCG のポリゴンで表示し、仮想ロボットと $tv+td$ 前のカメラ撮影時のロボットの位置をそれぞれワイヤフレームで表示する。仮想ロボットはその位置がリアルタイムに更

新されるが、 td 前の実ロボットは tc ごとに、 $tv+td$ 前のカメラ撮影時のロボットの位置は tv ごとにその位置が更新される。これにより海中環境に関して得られる情報が少なくても、操縦者は海中の状況を容易に把握できる。また、実ロボットの航行目標地点を指定したり、任意の視点を得られるように、仮想的に海中に配置したダイバー⁹⁾ (以下、仮想ダイバーと呼ぶ。)を存在させ、ワイヤフレームにより表示する。

操作パネルには操縦者の操作入力部と仮想ダイバーの視点から見たワールドモデルの映像が表示される。操縦者は表示されているワールドモデルの中で、仮想ダイバーを移動させることで任意の視点が得られ、自分自身が実ロボットの作業環境に立ち会っているような臨場感を持って操作をおこなうことができる。また、カメラ撮影時のロボット位置に視点を移し、実画像パネルに表示される画像と、操作パネルの画像を比較することで、ワールドモデルと実際の海底地形の違いも確認できる。すなわち、操縦者は鯨瞰図パネルにより全体を把握する視点と、操作パネルにより海中ロボットの立場に立った視点の両方を得ることで、遠隔操作を支援される。

実ロボットの航行には、自律航行モードと手動航行モードがあり、自律航行モードは操縦者によって与えられた目標地点まで軌道を自動生成して航行するもので、この軌道は鯨瞰図パネルに表示される。操縦者は軌道の修正も可能である。手動航行モードは前進、回頭などの命令を任意に与えるものである。

3. シミュレーションによる検証

構築したシステムの有効性を確認するために、シミュレーションによる検証をおこなった。シミュレーションでは、作業環境を水深 4,500 [m] 程度の海底付近とし、自機位置の測定には SSBL など、時間とともに誤差が拡大しない位置測定装置を用いると仮定した。ロボットモデルは東京大学生産技術研究所浦研究室の汎用テストベッド Twin-Burger 2^{10,11,12)} とし、そのダイナミクスは藤井による近似運動方程式¹¹⁾ を用いてシミュレートした。ロボットはサージ、スウェイ、ヒープ、ヨーの 4 自由度を持つ。また、8 ch の超音波測距センサ、サージ・スウェイ方向の流速計、深度センサ、方位角度センサを搭載したのと同様の測定値をシミュレータにより得ることができる。

シミュレーションには 2 種類の地形を用いて検証をおこなった。Fig. 3 (地形 1)、Fig. 9 (地形 2) にそれぞれのコンピュータ・シミュレーションによる海底地形とワールドモデルを示す。海底地形は、 20×20 [m] の領域で 1 [m] 間隔の格子点にそれぞれ深度データを与え、それを三角形のポリゴンで表現した。ワールドモデルは、4 [m] 間隔で同様に表現した。海底地形にはワールドモデルには記されていない複雑な入り組みや、海藻などの未知の要素が含ま

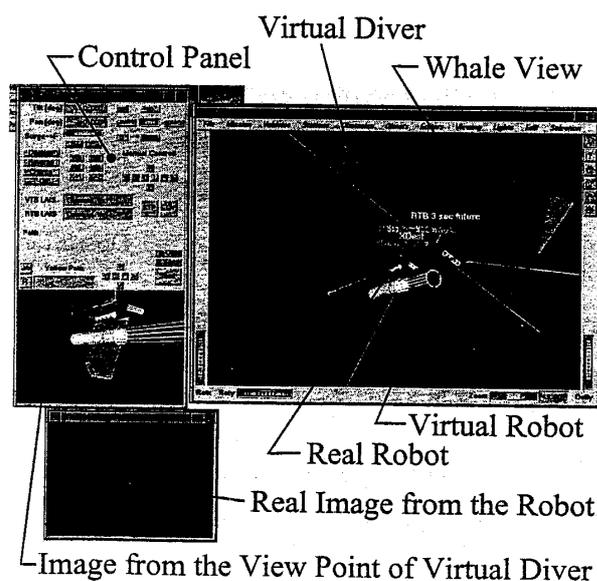
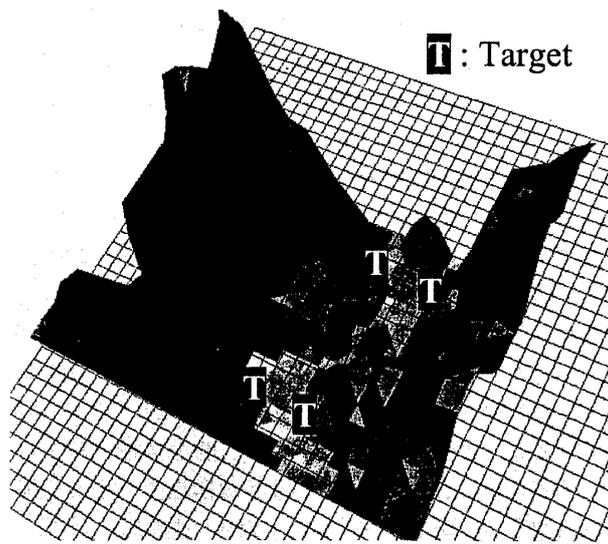
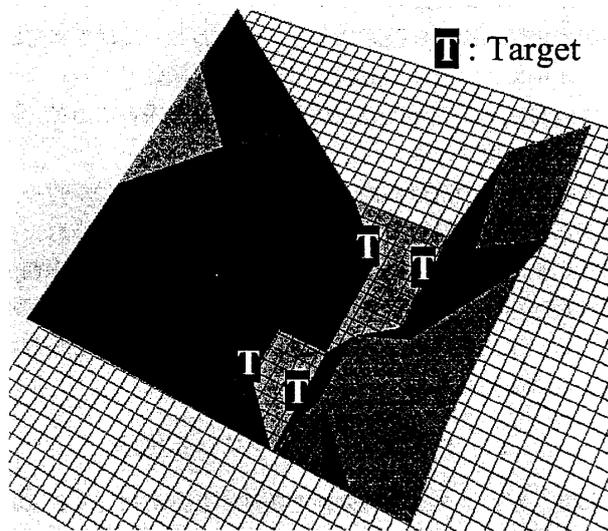


Fig. 8 Operating GUI



(a) Seabed-2



(b) World Model-2

Fig. 9 Real Seabed-2 and World Model-2 in the Robot and Operating GUI

れる。実画像パネルに表示される画像は、カメラ撮影位置の視点から海底地形を眺めた画像をコンピュータ・グラフィクスにより表示し、時間遅れと静止画像の更新は計算により模擬した。

ミッションは、各図中に示されるように start 点から出発して配置されたすべてのターゲットの位置まで航行し、start 点にもどる。ターゲット付近では、操縦者が実画像パネルでターゲットを確認した時点で、ドッキング、充電、離脱の命令を発信することとした。シミュレーションによる実ロボットは、ドッキングの命令を受け取った時、自身のカメラ視野にターゲットが認識されていれば、自動的にドッキングを成功することとした。

地形1の検証実験の結果を Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12 に示

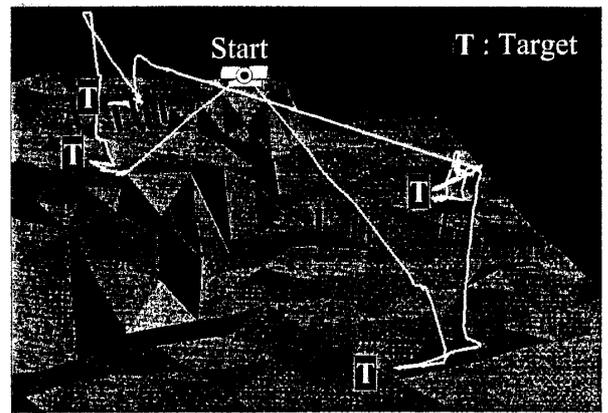


Fig. 10 Trajectory of the Real Robot in Real Seabed-1

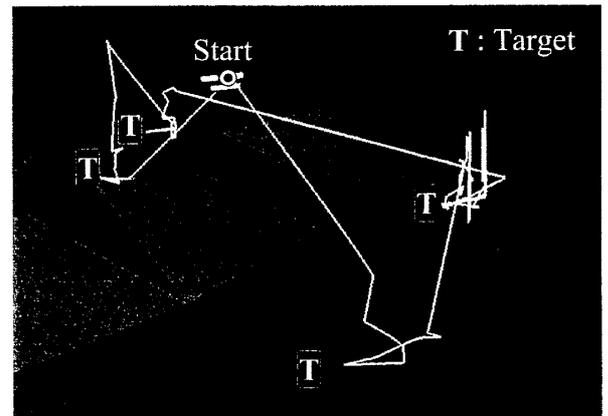


Fig. 11 Trajectory of the Virtual Robot in World Model-1

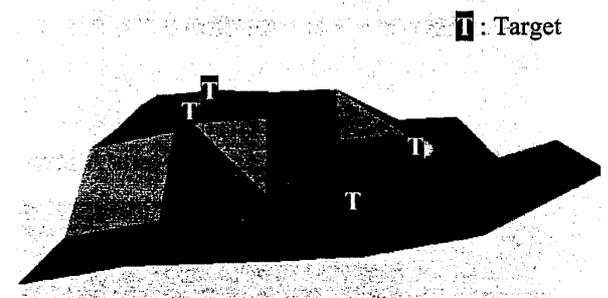


Fig. 12 Modified World Model-1 After Operation

す。Fig. 10 は海底地形と実ロボットの航行履歴を、Fig. 11 はワールドモデルと仮想ロボットの航行履歴を、Fig. 12 は実験を通じて変更されたワールドモデルを示している。ターゲットからターゲットへは主に自律航行が用いられており、ターゲット付近では手動航行およびドッキング等の命令が発信されている。実ロボットと仮想ロボットの軌道が、大きなずれを生じていないことを確認できる。

地形2の実験の結果を Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15 に示す。この場合も2つの軌道は大きなずれを生じず、整合性が取

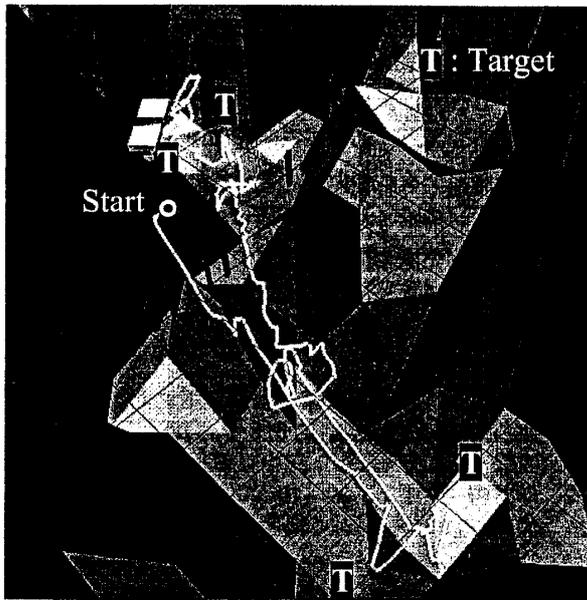


Fig. 13 Trajectory of the Real Robot in Real Seabed-2

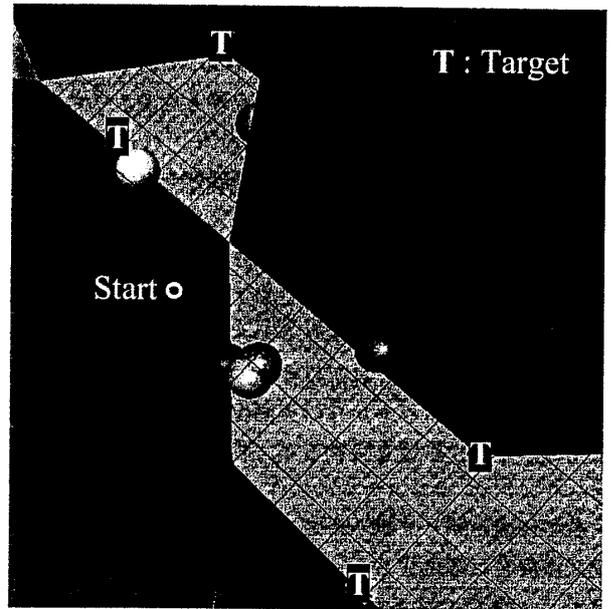


Fig. 15 Modified World Model-2 After Operation

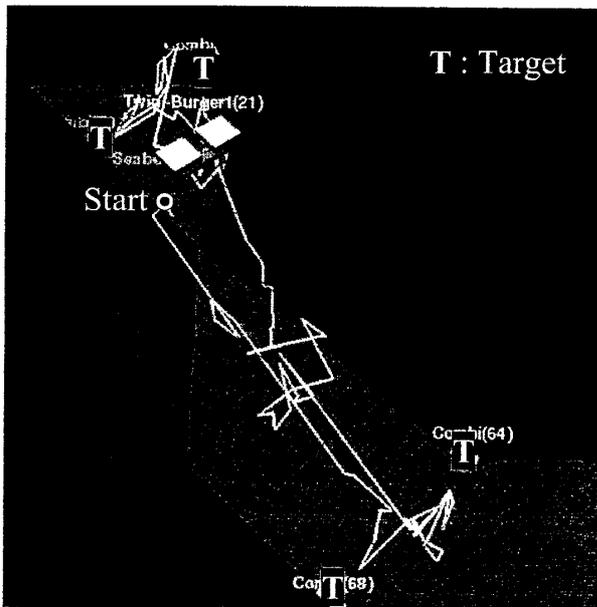


Fig. 14 Trajectory of the Virtual Robot in World Model-2

れていることを確認できる。Fig. 15では、ワールドモデルには記されていない未知の隆起地形などが多いので、発見された地点に球体が配置されているのがわかる。また、同時にその付近では軌道が多く修正されている。

地形1 (Case 1), 地形2 (Case 2) の実験で操縦者により発信された命令の種類を、百分率で Fig. 16 に示す。総命令回数は地形1が63回、地形2が99回である。Go To Xdestは、ある指定した地点への自律航行命令で、Docking, Battery Charge, Take Offはターゲットへのドッキングに関する命令である。それ以外のものは手動航行に属

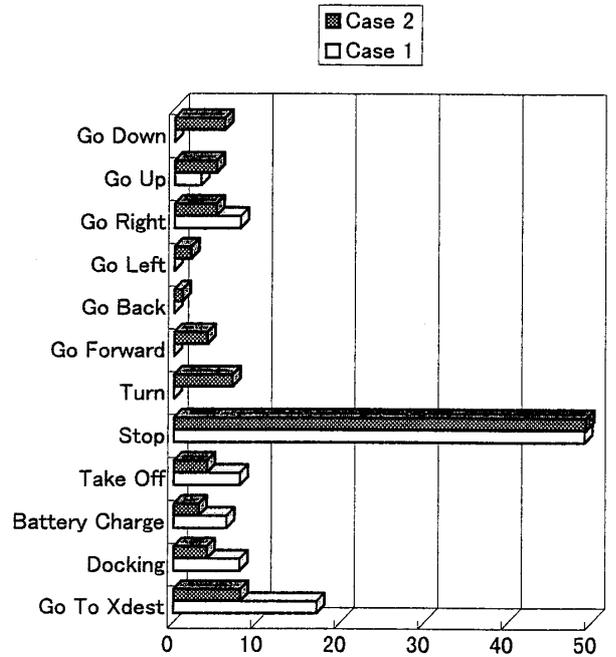


Fig. 16 Frequency of Operation of Each Command

するものである。地形2の場合の方が手動航行の占める割合が大きく、総命令回数も多かった。これは海底地形がより複雑になるほど、操縦者の介入が増えることを示している。地形1では自律航行でほとんどの移動に対応できている。操縦者は海底地形の複雑さや未知の要素の程度に応じて、自律航行や手動航行など遠隔操作の手段を選択することで、効率良く遠隔操作をおこなえることが確認された。

4. 考 察

時間遅れに対応するシステムとしては、本実験で設定し

た水深4,500[m]という条件のもとでは、良好な結果が得られた。仮にこの条件を水深9,000[m]と設定した場合を考えると、通信にかかる時間は約6秒となる。これにより仮想ロボットと実ロボットの時間的なずれは大きくなるが、仮想ロボットを基準として遠隔操作をおこなう場合、通信時間の変化による影響は少ないと考える。しかし、海中における未知の外乱を考慮に入れれば、仮想ロボットと実ロボットの行動に差異が生じやすくなるといえる。未知の障害物を発見した実ロボットから情報が送られてくる時間が長くなるので、それだけ操作の円滑性は損なわれることになる。実ロボットからの実画像は、片道の通信時間が変化した分だけ影響を受けるが、画像を得られる頻度は変わらないため、本システムの操作手法は同様に適用できる。

海中環境に関して得られる少ない情報を、できるだけ有効に操縦者に提供するために、本システムではワールドモデルの3DCGによる鯨鰭図を導入したが、これは有索の海中ロボットが、主に搭載のカメラ画像をもとに遠隔操作されることを考えると、より全体を把握できる観点を同時に持つことになり、有効である。ただし、本システムを実際の海中ロボットに適用する場合、海中におけるポジショニングに十分な精度が得られなければワールドモデルの有効性は失われてしまう。

また、構築した遠隔操作システムは、有索の海中ロボットへの適用も有効であると考えられる。例えば、沈没船の探査活動等を考えると、沈没船の設計図から事前にワールドモデルを構築しておけば、遠隔操作の際に水中カメラ画像が不鮮明であったとしても、操縦用GUIは、沈没船のどの部分なのかを知る手がかりとなる。

5. 結 論

以上により、構築された無索海中ロボットの遠隔操作システムにより、無索海中ロボットの遠隔操縦が可能となり、高度な行動をより円滑におこなうことができることが示された。また、仮想ロボットにより、遠隔操作に伴う時間遅れの煩わしさが軽減され、操縦用GUIにおける3DCGの利用や仮想ダイバーの視点の導入により、操縦者は臨場感を持って遠隔操作ができる。既知の海中環境内ではワールドモデルを利用して、より円滑な遠隔操作を可能とし、未知の環境に対しては、適宜ワールドモデルを変更すること

により対応することができる。

実際の環境下では、ロボット自身および操縦者が得る情報には種々の原因により時間的、空間的「あいまいさ」が含まれ、判断ミス、行動ミスを誘起する可能性がある。これを極力少なくするためのシステムとして、本論文の提案するシステムが構築された。今後は本システムを基礎として、実ロボットを使った実験に基づき、より信頼性の高いシステムへと改良されることが期待される。

参 考 文 献

- 1) 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, (1997.5), pp. 71-76
- 2) 浦環, 高川真一ほか: 海中ロボット総覧, 初版, 成山堂書店, 1994, pp. 89-110
- 3) 浦環, 高川真一ほか: 海中ロボット総覧, 初版, 成山堂書店, 1994, pp. 39-88
- 4) 日本造船学会海中技術専門委員会: 海中技術一般, 初版, 成山堂書店, 1992, p. 297
- 5) Craig P. Sayers, Dana R. Yoerger, et al.: A Manipulator Work Package for Teleoperation from Unmanned Untethered Vehicles-Current Feasibility and Future Applications, Proc. of IARP 96, Toulon, Mobile Robots for Subsea Environment, 1996. 3, pp. 1-23
- 6) 若林靖史: 宇宙ロボットの遠隔操作技術-多重ループ構造による遠隔操作-, 日本ロボット学会誌, 第14巻 第7号, (1996.10), pp. 931-934
- 7) 黒田洋司, 浦環, 荒牧浩二: 複数海中ロボット対応型仮想環境シミュレータの開発, 第12回海洋工学シンポジウム講演集, (1994.1), pp. 543-548
- 8) 黒田洋司, 荒牧浩二, 浦環, 菅野崇, 大和裕幸: ネットワーク分散処理による海中ロボット用海中環境シミュレーター, 日本造船学会論文集, 第178号, (1995.12), pp. 667-674
- 9) 川野洋: ドッキングを想定した無索海中ロボットの遠隔操作に関する研究, 東京大学修士論文, 1997.2
- 10) 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(その1: 汎用テストベッドの開発と水槽試験), 日本造船学会論文集, 第174号, (1993.12), pp. 903-916
- 11) 藤井輝夫: 海中ロボットの知的行動に関する研究, 東京大学博士論文, 1992.3
- 12) 石井和男: ニューラルネットワークによる海中ロボット運動の表現と制御, 東京大学博士論文, 1996.6