

## 応用論文

## 触像を用いた水中バックホウ遠隔操作インタフェースの開発

～ 難視界下における防波堤マウンド均し作業の機械化 ～

平林 丈嗣<sup>\*1\*2</sup>矢野 博明<sup>\*2</sup>岩田 洋夫<sup>\*2</sup>

## Development of a Teleoperation system with Haptic Image for Underwater Backhoe

Taketsugu Hirabayashi<sup>\*1\*2</sup>Hiroaki Yano<sup>\*2</sup>Hiroo Iwata<sup>\*2</sup>

**Abstract** - Mechanization of diving operations is necessary for safer and more efficient underwater construction works in port areas. Teleoperated underwater construction machines are under developing. The detection system as well as the operation one is required for these machines. The problem is that the conventional TV camera system is useless in water because of turbidity. Haptic information is introduced to help controlling construction machines substituting for visual information. We examined the ability of machine experimentally on a real sea area. Experimental results show that accuracy of leveling are  $+17\text{cm}\pm 8\text{cm}$ , and the construction efficiency of the system is  $25.6\text{ m}^3/\text{h}$ . It is proved that the concept of authors' proposed system is enough effective for the operation in such turbid water as visual information is not available, and it has sufficient performance for actual construction works.

Keywords : underwater backhoe , diver , teleoperation , haptic image , similar figure interface

## 1 はじめに

港湾施設はその大部分が水面下に構築されるためその工事等は水中作業となり、現在は相当程度を潜水士等の人力に依存している。たとえば防波堤を設置する場合、海底面にあらかじめ平面に均した捨石基礎マウンドを構築する。このときマウンドに使用される石は海上の船から投入されるが、そのままでは平面にならない。そのため現状では潜水士が素手やチェーンによって5～100kgの石を動かし、水平面を作っている(図1)。このような港湾工事における作業を一層安全で効率的に行うことができる技術の確立が急がれている。

現在、海底ケーブル敷設など大水深での作業にはROV (Remotely Operated Vehicle)が利用されており、高圧水流による海底土砂掘削やマニピュレータによるケーブル補修等、遠隔操作による様々な作業が可能である[1]。しかしROVは水中での航行を行なうため中性浮力となっており、大きな作業反力を伴う港湾工事作業には適していない。

また、陸上における建設機械の遠隔操作技術は、主としてTVカメラ等を用いる方法[2]の研究開発が行われており、すでに災害復旧現場において使用されているものも存在する。しかし、港湾工事における建設機械の無人化、遠隔操作化の研究はほとんど行われていない。これは陸上での遠隔操作技術を転用しても、港湾工事区域では常に視界が2m以下となることが多く、作業に必要な視認可能距離が確保できないためである。

ところで我々は暗闇の中でも手探りをしながら周囲の様子を認識することが出来る。このとき、手先の位置姿勢とそのときの触覚情報を元に周囲の状況や頭の中で再構成していると考えられる。これと同様のことを実現することで水中作業の問題点を解決できると考えられる。具体的には、水中バックホウに角度センサおよび力センサを取り付け、作業中の時系列入力情報から周囲の様子を再構成する。本研究では、この再構成された周囲の空間情報を「触像」と呼ぶ。この触像を用いた情報呈示によりオペレータにマウンド形状を呈示することで、光学映像に依存しない水中バックホウの遠隔操作システムを実現する。

本論文では、触像を用いた水中バックホウ遠隔操作インタフェースのプロトタイプシステムを試作した。さらに実海域を含む防波堤捨石基礎マウンドの荒均し作業における施工精度、施工能力について、提案手法による遠隔操作作業と従来手法との比較実験によりその有効性を検証した。



図1 潜水士による捨石マウンド均し作業

Fig.1 Trimming Work of Rubble Mound by Diver

\*1 独立行政法人 港湾空港技術研究所

\*2 筑波大学

\*1 Port and Airport Research Institute

\*2 University of Tsukuba

## 2 関連研究

提案するシステムには、バックホウを手探りするよう直感的に操作するインタフェースと触像のような外界計測技術の2つの開発課題がある。これらに関連した研究について以下に述べる。

### 2.1 建設機械の遠隔操作作用インタフェース

土工機械の操縦装置はJIS A 8919:2000で規格化されており、災害現場での無人化施工でも同規格に沿ったリモコン型操作レバーを使用している。しかし、二本のレバーでブーム・アーム・バケット・旋回を操作するため、均し作業など精度を要求される施工を行なうには熟練を要する。

これに対し、日立建機株式会社のワンレバーシステム[3]はバックホウのフロント部と相似形状のインタフェースとすることで直感的な操作を可能としている。油圧シリンダの制御は、実機とワンレバーシステムの各関節角度の差分による位置対象型パイラテラル制御を行っている。しかしワンレバーシステム側の位置拘束力はリターン springs のバネ定数に依存しているため、バックホウの出力に対しマウンドなど対象物の掘削抵抗が少ない場合には、油圧シリンダの追従遅れなのか負荷による遅れなのかを判別できず、接触や掘削など作業状況の呈示には適していない。また操作中の差分が大きいため、バックホウの姿勢状況を正確に把握することは困難で、直視による状況認識が必須と言え水中作業への適用は困難である。

### 2.2 外界計測技術

陸上における建設機械の遠隔操作技術は、1994年の雲仙普賢岳地域の災害復旧工事において実践的に研究開発が行われたため飛躍的に発展した。その結果、災害現場における無人化施工技術は除石作業といった比較的簡単な工事への適用だけでなく、砂防堰堤構築工、導流堤ブロック積工など、構造物の施工までもが可能となっている。このような複雑な作業を行うため2000年の有珠山災害復旧無人化施工では、運転席視点からのTVカメラ映像だけでなく、複数の移動カメラ車による別視点からの映像や、ステレオカメラによる地形測量画面など様々な作業現場の情報がオペレータに呈示されている[4]。

一方、水中作業の無人化は進んでいるとは言えない。作業時に発生する濁りにより、TVカメラ映像だけに依存して作業状況を認識するには限界があり光学測量装置も利用できないため、陸上と異なる認識方法が必要となるためである。

濁水中での形状認識に関する技術は現在までに数多く研究されてきた。新潟港での海底トンネル設置に利用されたレーザー視認装置[5]は、パルスレーザーを照射し対象物から反射してくる時間のみ受光器の電子シャッターを開くことで水中浮遊粒子の反射光の影響を除去する。しかし反射光の伝播時間が重要であるため対象物までの距離が既知である必要があり、石の移動が伴うマウンド均し作業には不向きであるといえる。

また、航路保全などのために海底面を測量する技術としては、ナローマルチビーム音響測深器[6]が実用化

されている。これは指向性の高い超音波を扇状に発射し海底面からの反射時間を計測することで像を構築する方法である。しかし音波ビームが扇状になっており、面的に形状を認識するには海面付近を移動させ走査スキャンを行なう必要がある。そのため、マウンド面に作業機械がいる場合、その付近の形状を認識できない。さらに海水の温度や作業船の位置、動揺を後処理で補正するためリアルタイム性が低く、作業により形状が変化するマウンド均し作業には適していない。

## 3 濁水中における情報呈示手法

### 3.1 同構造型マスタスレイブによる作業状況認識

前述のJIS形式レバーやワンレバーシステムではバックホウの関節角度を直視や光学映像によって認識し操作している。しかし水中バックホウを遠隔操作する場合、実機が海底にあり、その状態を目視および光学映像によって確認できないため、バックホウ関節角度の把握が困難で操作性が著しく低下[7]することが予想される。

そこで本研究では水中バックホウの姿勢認識および掘削などの作業状況認識を主目的として同構造マスタスレイブ[8]を利用することとした。

水中バックホウと相似の関係を持つ相似形入力インタフェースとすることで、関節角度等の状態を直感的に認識するほか、モニタに入力姿勢・機体姿勢を重ねて描画することで正確な姿勢の呈示を行なう。

また掘削抵抗が少ない場合の作業状況呈示は、マスタの反力計算時の位置拘束ゲインを可変とすることで対応した。これはバックホウのバケット部に圧力センサを装備することで、バケットが捨石マウンドに接触したか否か、バケットの動作時に捨石マウンドから受ける反力が大きいかなどを検知可能となる。その反力に応じて位置拘束ゲインを急激に高めれば、オペレータは接触や掘削などの作業反力を手応えとして認識でき、作業状況に関するオペレータの認識力が高まると考えられる。

このように姿勢入力・作業反力ディスプレイの機能を有した相似形インタフェースにより濁水中でのバックホウの内界状況を把握することで、作業効率の向上を目指す。

### 3.2 触像を用いた外界計測技術

港湾工事区域など濁水中における無人化施工には、作業機械近傍のマウンド形状をリアルタイムに認識できる技術が必要である。そこで本研究では濁水中での作業状況認識に触像を利用する。これはマウンド面との接触座標を蓄積しコンピュータグラフィクス(CG)として描画することで接触情報を視覚的に呈示する。これによりオペレータは掘削などの作業により変化したマウンド形状をリアルタイムに認識可能となる。CGには現状のマウンド形状のほかに設計形状を重畳して表示することで、形状の比較を常時行ないながら作業できるよう配慮した。

このように触像を用いた外界状態把握により、掘削などで変化するマウンド形状の呈示を遅延無く行うこ

とで、濁水中など光学映像が利用できない状況での形状認識を目指す。さらに設計形状などの情報を付加することで施工精度の向上を目指す。

#### 4 システム構成

図2に提案手法による遠隔操作のプロトタイプシステムの構成を示す。本システムは、相似形インタフェース、水中バックホウおよびこれらを制御する計算機 (Master:インタフェース用, Slave:水中バックホウ用, Database:外界データ管理用) からなる。以下にその詳細を述べる。

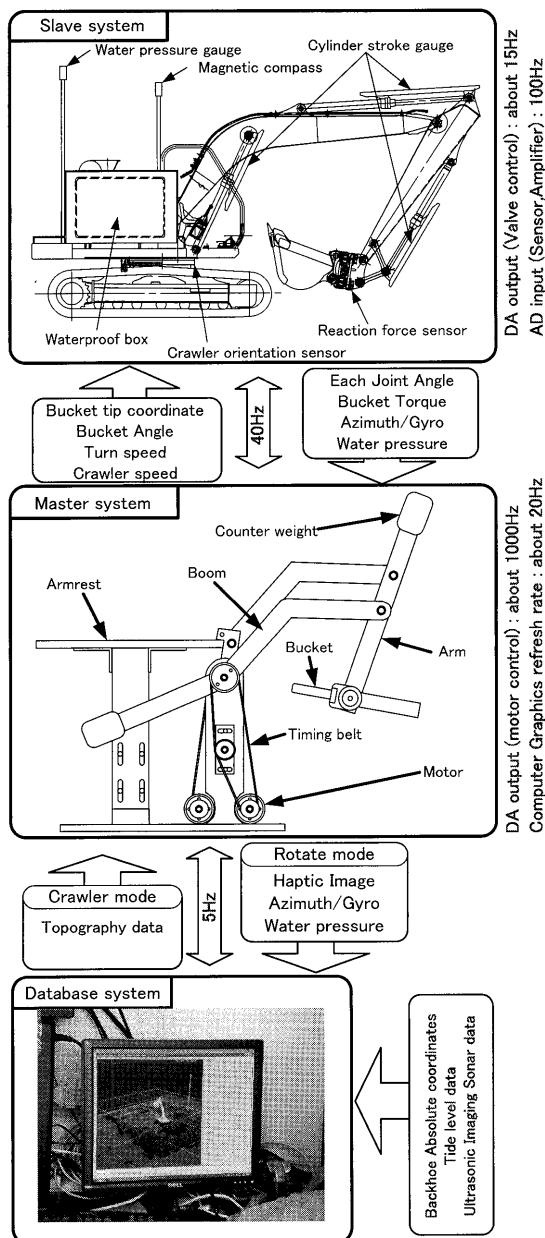


図2. 遠隔操作システムの関係図  
Fig.2 Related chart of interface system

#### 4.1 相似形インタフェース

直感的な操作の実現には操作入力のしやすさが重要である。そのためオペレータは操作インタフェースの

バケットに相当する部分を把持することとした。これは、インタフェースの目的がバケットを思い通りに動かすことであり、バケットを直接把持することが最も簡単な実現方法である。しかしバケットの可動範囲は約300度と広く、バケットそのままの形状では持ちにくく操作中に持ち替える状況があり得る。そこで本インタフェースでは把持部を棒状としペンを持つように操作することで、オペレータの意思どおりの入力と入力範囲の確保することとした(図3)。また、同構造型マスタスレイブのスケール比は水中実験機の場合1:20とした。これは、卓上での使用を前提として可動範囲を400mm程度の大きさに収めること、実機制御に求められる精度は50mm程度必要であると想定しており、手元での作業の精度は20分の1の2.5mm程度となり後述の反力呈示と合わせることで十分実現可能であることからこの大きさとした。

なお、オペレータが捨石や作業面の高さを直感的に認識するには反力呈示機構を組み入れることが必要である。なお、実機では割石を対象とした均し作業が主であるので、硬いものに触れた感覚が必要である。これまでの経験から硬いものに触った感覚が得られる接触力の仕様として、応答が十分速ければ10N程度あれば良いと判断し、本インタフェースでは任意の方向に10N以上の定格出力とした。

バックホウの自由度は、バケット軸、アーム軸、ブーム軸、旋回軸の4自由度である。しかし、マウンド均し作業は出力の大きな引き込み掘削で行なうため、旋回軸も同時に動くとなると本来の目的の直線的な引き込み動作が困難となる。そこで、旋回軸は別途操作レバーを配置した。

#### 4.2 遠隔操作型バックホウ

本研究ではシステム開発及び基礎実験のためのミニショベル陸上実験機、実海域実験を行なうための実験用水中バックホウの二種類を開発した。なお、開発期間短縮や現場作業中の故障対応を考慮し、センサ等については可能な限り市販品を用いた。

##### 4.2.1 ミニショベル陸上実験機

陸上実験機は日立建機株式会社製ミニショベルEX30-2を改造したものである。この実験機により陸上の実験フィールドにおいて平面均し作業を行い、均し精度の計測、さらに同構造型マスタスレイブによる操作効率実験や、情報呈示手法の確立に関する実験を行う。

本機のブーム、アーム、バケット長は2380mm, 1265mm, 880mmである。各関節軸には関節角度検出用のポテンシオメータを設置した。各関節は油圧シリンダの伸縮により駆動しており、この制御は座席下に設置した比例電磁バルブにより行なった。さらに、車体傾斜を計測するためのジャイロ(日本航空電子社製FOG-7401A)と絶対方位を計測する地磁気コンパス(R.M.YOUNG社製MODEL32500)を設置した。本機背面にはCONTEC社製ボックスコンピュータIPC-BX-M630(以下SlavePC)を設置しており、Interface社製DAボードPCI-3341A, ADボードPCI-3168C, DIボードPCI-2152Cを増設した。

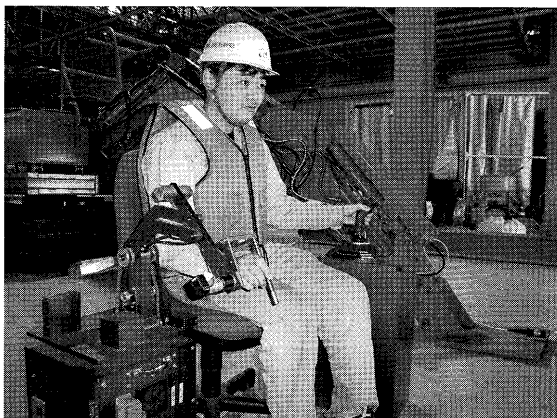


図3. 相似形インタフェース  
Fig.3 Similar Figure Haptic Interface

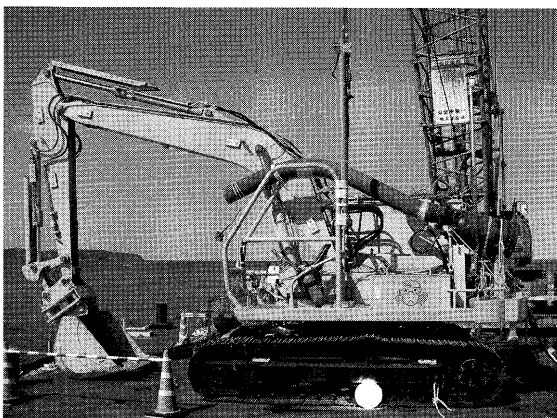


図4. 水中バックホウ  
Fig.4 Underwater Backhoe

#### 4.2.2 実験用水中バックホウ

実海域実験に用いる水中バックホウは、佐伯建設工業株式会社所有の水中バックホウ、ビッグクラブ3号(図4)を改造したものである。

ビッグクラブ3号は過去に水中遠隔操作を考慮した改造[9]を施しており、比例電磁バルブ等基本的な装備が備わっている。今回の改造では車体側部に水密容器を設置し、Slave およびセンサ等を収納した。また断線や停電などに備えて無停電電源装置、リポートやプログラム修正のためのモニタ、キーボード、マウスを遠隔地で利用するコンソール延長器を設置した。水密容器は二重構造となっており、フロートスイッチ式の浸水センサを取り付けた。

角度センサは防水面から機械的に回転部分のあるポテンショメータではなく、直動磁歪センサ(サンテスト社製GYcRPプローブ)に変更し、油圧シリンダ側面に設置した。

また水中でのバックホウの位置を測定するための超音波発振器(カイジョーソニック社製KSB-150A)を設置した。遠隔操作は均し作業範囲近傍に係留した作業台船から行う。作業台船には3基の受波器を設置し、超音波の到達時間の差により発振器の座標を計測する。この超音波測位装置単体の精度を事前に実海域で検証した。12.5m離れた場所に水深4mで設置した超音波発振機の座標を計測したところ、水平面方向に平均23cm

標準偏差±11cmの誤差があった。対象の工事は平面に均すことが目的であり、実際の工事においても天端幅(マウンド面の幅)についてプラス方向側の規定は無く、さらにバケット幅が1m程度あるため、水平面の測位精度は±50cm程度あれば問題ないとした。しかし水深方向の誤差は接触による地形計測の精度に直結するため高精度な測位が必要となる。そのためバックホウの水深については別途設置した水位計(共和電業製BWL-20MET)により計測した。この水位計の非直線性は±0.15%であり20mレンジでは±3cmである。本研究の作業対象であるマウンド荒均し作業は、港湾工事共通仕様書[10]で±30cmの許容値が認められており、十分な精度を有するといえる。なお海水濃度による補正は実験海域で実験前に行ない、潮位による影響はデータベースにその時間の潮位を入力することで補正した。最後に作業台船の位置は、既設防波堤に設定された基準点から測量器を用いて計測しており、これらのデータをDatabasePCに入力することで、バケット接触点の絶対座標を求めることができる。

なお、水中実験用バックホウのブーム、アーム、バケット長は4600mm,2520mm,1660mmである。前述の陸上実験機では車重3ton、実海域実験で用いる水中バックホウは約13tonとサイズが異なるが、同構造型マスタスレイブで制御される部分に関してはほぼ相似の関係を保っている。

#### 4.2.3 接触センサ

ロボットアームのエンドエフェクタにかかる力の方向やトルクを計測するには六軸分力センサを取り付けるのが一般的である。しかし、バックホウのような油圧作業機械の力に耐えられる六軸分力センサは市販されていない。そこで、本研究の目的であるマウンド均し作業は基本的に引込み掘削動作であることから、バケットにかかるピッチングトルクのみを計測するためのアタッチメントを製作した。機構的には平面上に引張圧縮型ロードセル(共和電業製LUK-A)を4基配置し、圧力差から負荷を計測する。スラスト方向の応力をキャンセルするため二箇所にとッパピンを設置している(図5)。

陸上実験機の最大掘削力は22.4kNであり、バケット先端にすべてこの力がかかるとすると、バケット軸間中心にかかる回転トルクは15.2kN・mとなる。このため軸間中心から90mm離れているロードセルにかかる力は168.9kNとなり、1基あたりにかかる力は42kNとなる。よって使用するロードセルは50kNまで耐えられるものとした。同様に実験用水中バックホウには1基あたり200kNのロードセルを使用した。

接触センサをバックホウに取り付け、特性を計測した。バケット先端に既知の荷重を吊り下げその時のロードセル出力値を計測する。計測はバケット先端が水平に機体旋回軸を向いた方向を0度、真下を向いた角度を90度、として-80度から240度までを10度毎に行った。図6にミニショベル陸上実験機用接触センサ特性を載せる。力の大きさにほぼ比例した出力特性となっており、バケット軸にかかるピッチングトルクの検出器として十分機能することを確認した。

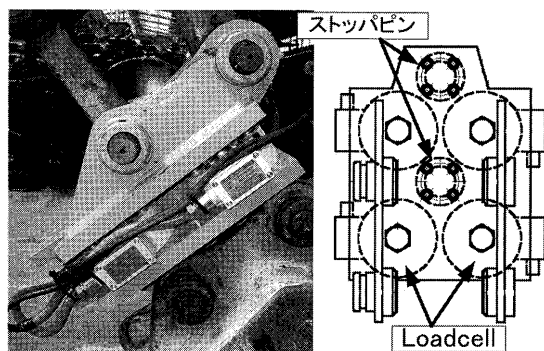


図5. 接触センサ

Fig.5 Force Sensor (for Land model)

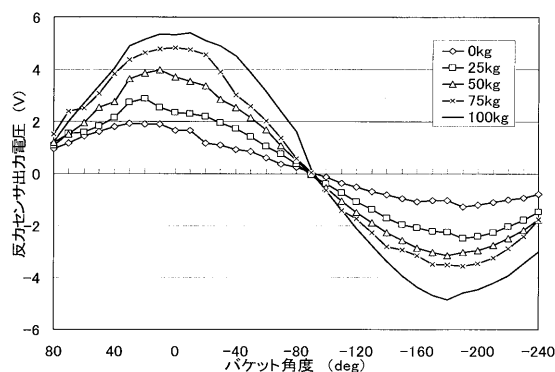


図6. 接触センサ出力特性

Fig.6 Output Characteristic of Force Sensor

## 5 ソフトウェア構成

本システムは Master, Slave, Database の3台の計算機で構成されている。OSは Windows XP (Slaveのみ Windows2000) を用い、開発はC言語を用いて行った。相互に UDP/IP によってデータ通信を行っている。以下の節では、制御、触像生成、データ呈示について詳細を述べる。

### 5.1 Master-Slave 制御

建設機械の遠隔操作では安全性が求められる。そこで単純で安定性の高い位置対称型バイラテラル制御が有効であると考えた。しかし位置対称型バイラテラル制御では、変位と力の間に比例と見なせる関係が成立している必要があり、荷重が与えられても変位しにくい機構には適用できない。つまり油圧作業機械のような外力を加えても直ちにその力に応じた変位が得られない場合は小さな負荷では Master-Slave 間で変位が生じないため接触の認識が困難である。またバックホウに利用される油圧シリンダは高出力が求められるためストローク速度が小さく、力逆送型バイラテラル制御では無負荷時に Master-Slave 間で相似の関係を保つことが難しい。

そこで本実験機では、無負荷時には位置対称型バイラテラル制御を行い、接触センサにより接触を認識した場合には位置拘束ゲインを高めることで負荷の認識を容易とした。また、バケット軸のみ力逆送型バイラテラル制御とすることで掘削反力の大きさを比例的に呈示した。このような制御法は、比例補償ゲイン及び

力伝達ゲインを接触センサの入力に基づいて可変としていることから可変ゲイン位置対称型バイラテラル制御[11]と呼ばれている。

### 5.2 触像の生成アルゴリズム

本システムは、視覚情報の劣化に対応するために人間が暗中で手探りで状況を把握するように、バケットに取り付けた力センサからの地面との接触情報とそのときの接触位置から、バックホウの周囲の地形を推測可能である。以下に接触情報から得られた推測地形触像の生成アルゴリズムを示す。

(1)バックホウ旋回中心軸とクローラ接地面との交点を原点とした Slave 座標系において、原点から水平に10cm毎に10mまでの101点の高さ情報によりバックホウ正面のマウンド断面形状を表現した。なお、初期高さは作業前に計測された超音波測量データをもとに設定した。

(2)バケット先端が実際の地形と接触したら、各関節角度から算出されたバケット先端座標およびバックホウ車体のピッチング角により、最近傍の点(図7のi)の高さを接触点の高さに更新する。

(3)接触点iの1つ隣の点(i+1およびi-1)の高さは、接触点iとの差分の75%を加算する。

(4)同様にi+2(i-2), i+3(i-3)はそれぞれ50%, 25%を加算する。

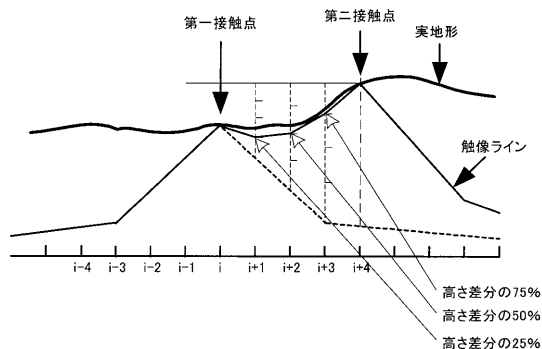


図7. 触像生成のアルゴリズム

Fig.7 Generation of Haptic Image from Contact information

たとえば図7に示すように、第二接触点がi+4とすると、i+4の高さは接触点の高さになり、その左隣のi+3は、第二接触点の高さと接触前に格納されていたi+3の高さの差分の75%が加算される。2つ左隣のi+2は、第二接触点の高さと接触前のi+2の高さの差分の50%が加算される。右側についても同様である。接触点間の補完により作業開始前のマウンド形状認識を効率的に行う事と、掘削等により前後の石が崩れた場合の変化に対応する。

### 5.3 地形データ座標系

オペレータが遠隔操作時に必要な情報として、バックホウの関節角度、車体位置および姿勢、マウンド現状形状、マウンド設計形状が挙げられる。研究開始当初はこれらの情報を鳥瞰視点により一つのモニタに描画していた。しかし三次元の形状を単に画面に投影表示しても訓練無しでは立体の情報として即座に認識できず、作業中のマウンド形状認識に難があった。また、

目標となる設計面の半透過表示や、設計高さからの差分によって色を変化させることで高さの認識はできるものの、オペレータは色情報から高さ情報への変換を常に強いられるため、作業中の負担となる。

引込み均し作業では、バックホウ正面のバケット幅分の地形のみが変化する。つまりオペレータにとってバックホウ正面のマウンド形状が均し作業中に必要な情報といえる。そこでバックホウ正面のマウンド断面形状を描画するモニタ(図8)により均し作業中のマウンド形状を認識し、鳥瞰図モニタ(図9)により作業区域全体の進捗状況やバックホウの位置など認識することとした。

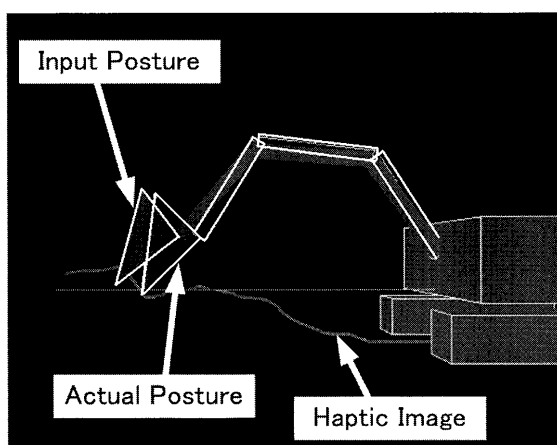


図8. 断面表示モニタ

Fig.8 Visualization of Haptic Image

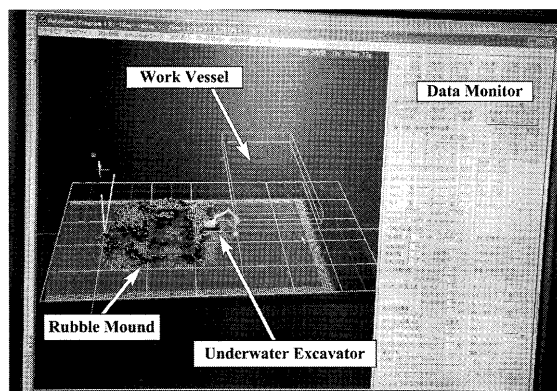


図9. 鳥瞰図モニタ

Fig.9 Topography Database Screen

マウンド断面形状は相似形インタフェースを制御する Master のモニタ上で表示する。マウンド断面形状のほか設計断面、バックホウおよび相似形インタフェースを描画し、均し作業中はこのモニタを主に利用する。

鳥瞰図は Database のモニタに表示され、施工現場全体のマウンド形状を任意の視点で表示できる。さらにバックホウの位置や方位のほか、作業台船や既設防波堤など周辺施設の位置も表示され、均し実験範囲を赤枠で表示した。また、マウンド面の設計データも Database に格納されており、これを透過表示することで作業が未完の場所を直感的に把握することが可能で

ある。この鳥瞰図モニタにより、オペレータはマウンド形状の全体的な把握とバックホウの位置関係の認識が行なえる。

なお、センサ情報等の3台それぞれの計算機のデータは、以下のように統合される。

Slave からバケット先端座標、傾斜、方位、水深のデータが Master に渡される。Master ではバックホウを中心とする半径 10m、周囲 5 度間隔、奥行き 10cm 刻みの極座標表現の地形データを管理しており、前項で示されたアルゴリズムにより生成された地形データで上書き更新する。更新されたデータは一定の間隔で Database に送られ、バックホウの位置データ (KSB-150A, BWL-20MET のデータ) をもとにグローバル座標に変換し Database の地形データ (100m×50m) を更新する。Master-Slave 間の通信レートをなるべく落とさず、Database の情報をできるだけ早く更新する方針で、このような構成とした。なお、クローラによる移動中は振動などにより接触センサが誤動作することがあり、移動中は均し作業を行なわないとして、地形データは更新しない。ただし、Database からは、現在のバックホウ位置から半径 10m の範囲のデータを Master に送信し、移動先での断面形状を表示した。

## 6 陸上実験

提案手法が濁水中での均し作業に有効であることを確かめるため、均し作業に関連する動作について実験を行なった。均し作業を操作入力動作、地形認識動作、均し作業に分類し、それぞれの精度をミニショベル陸上実験機により計測した。

### 6.1 操作性に関する実験

本研究で用いるバックホウは油圧駆動である。これは各関節を独立して制御できる電動モータと異なり、作動油ポンプが1つであるため、各関節を駆動させる油圧シリンダの制御弁を同時に開いた場合、重力加速度方向など動きやすい関節から動作してしまう。この問題を解決するための手法として、図8に示すとおり現姿勢である Slave と目標姿勢である Master を重畳表示することとした。これは入力姿勢に対する実機の先端座標の移動方向の対応がビジュアル的に認識でき、今後どのように移動するのかをオペレータが予測し、入力姿勢を修正することができる考えたためである。

この Master-Slave の姿勢情報による操作性を確認するため、目標軌跡追従実験を行なった。均し作業に重要な水平引き動作を対象とし、陸上実験用ミニショベルのバケット先端を高さ 500mm を目標に遠隔水平引き動作した。このとき断面表示モニタに Master 姿勢および Slave 姿勢を重畳表示した場合と Slave 姿勢のみ表示した場合とで比較した。被験者はバックホウが見えない場所からそれらの姿勢呈示、および目標高さが描画された CG のみを見ながら操作を行なう。6名の被験者が各条件において6回の水平引き動作を行なった。評価範囲は陸上実験用ミニショベル旋回中心より 3.5m から 2.0m までの間とし、その間のバケット先端高さを 10mm 毎に記録した。

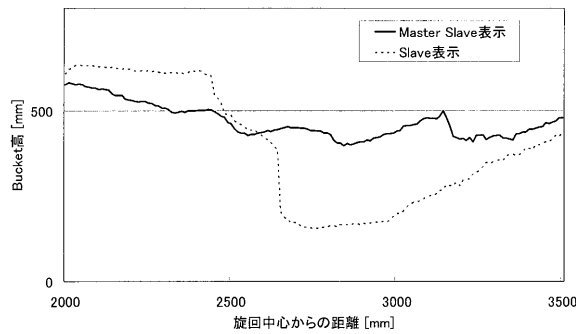


図 10. 水平引きの軌跡 (被験者 D, 3 回目)  
Fig.10 Tracks of Bucket Coordinates

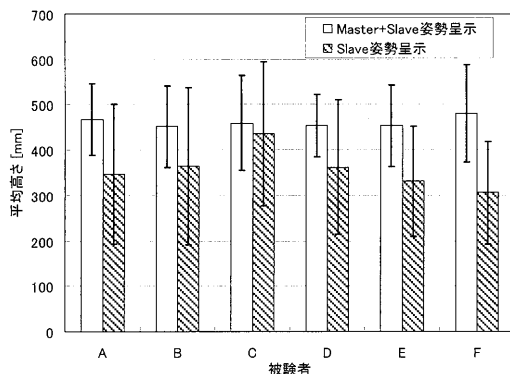


図 11. 水平引き動作の精度  
Fig.11 Experimental Result of Bucket Coordinates

図 10 は典型的な軌跡である。この結果を見ると Master-Slave 関節姿勢を重畳表示しオペレータに呈示したほうが目標値との誤差が少ないと言える。図 11 は 6 名の被験者の 6 回の平均値、標準偏差であり、本実験の被験者全員が Master+Slave の姿勢を呈示したほうが平均値、標準偏差ともに良好な結果となった。さらにそれぞれの誤差の積分値について、対応のない場合の 2 群の母平均の差の検定 (t 検定) を行ったところ、被験者 C 以外の 5 名について、5% 以下の有意差が見られた。被験者 C は有意差が認められなかったが、これは相似形インタフェースによる操作に熟練しており、Slave のみの表示でも著しく目標高さを逸脱しなかったためである。しかし標準偏差は Master+Slave の姿勢を呈示した場合のほうが小さく、本表示手法が熟練度に因らず有効であると考えられる。

さらに本実験での Slave の追従遅れは重力や動作抵抗によるものであるが、マウンド掘削時の負荷によりオペレータの入力どおりに Slave が追従できなかった場合でも有効な表示手法と考えられる。

実験終了後に被験者のヒアリング調査を行なったところ、Master 姿勢を表示することで Slave が将来どの方向に動くのかを予想し入力を補正できるとの回答があり、本表示手法がマウンド均し作業における水平引き動作に有効であると言える。

## 6.2 地形認識に関する実験

本システムによってどの程度の地面形状の変化、すなわち高さの差をどの程度の精度で認識できるかを明らかにする必要がある。そこで、最も厳しい条件とし

て視覚情報なしで相似形インタフェースによる二値判別実験を行なった。被験者はランダムに変更される高さの異なる二種類の試験体に、相似形インタフェースにより、ミニショベルのバケット先端を接触させ、2 つの試験体の高低の判別を行う。被験者は視界を遮られた場所から遠隔操作を行っており、TV モニタや CG 等の視覚情報は呈示されない。試験体の高さ差分は 25cm, 20cm, 15cm, 10cm, 5cm とし、被験者 6 名がそれぞれ 30 回の判別を行った。

また、比較実験としてミニショベルの代わりに時間遅れや機械がたのないバーチャルなスレーブを用いて相似形インタフェース単独による同様の判別実験を行った。相似形インタフェースで呈示される高低差はミニショベルとのスケール比を考慮して 25mm, 20mm, 15mm, 10mm, 5mm とした。図 12 に実験状況を、図 13 に判別実験の正当率を示す。

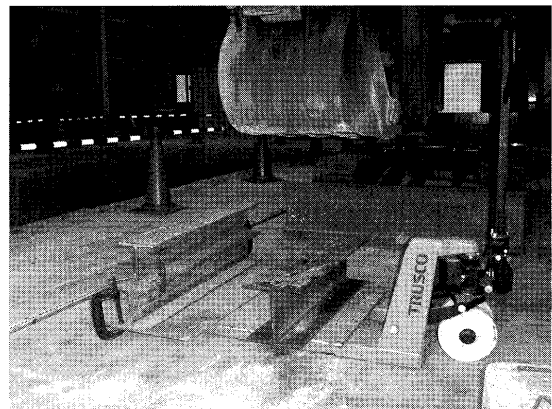


図 12. 地形認識基礎実験状況  
Fig.12 Distinction Experiment of Height Difference

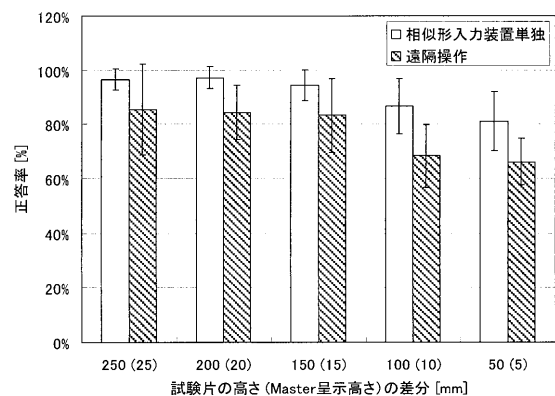


図 13. 判別実験の正答率  
Fig.13 Result of Distinction Experiment

相似形インタフェース単独による二値判定実験の結果では、高低差 15mm で 9 割以上、5mm で 8 割の正答率であったのに対し、遠隔操作による二値判定実験では高低差 15cm 以上で 8 割以上、10cm 以下では 6 割台に低下した。これは遠隔操作において位置対称型制御を用いたための Master-Slave 間の変位による影響と、ミニショベル関節部のガタによるものと考えられる。ミニショベルを操作するときの Master-Slave 間の変位を計測したところ Slave 側のスケールで約 60mm 程度の変

位が無ければシリンダが動かないことがわかった。また Master を速く動かした場合 Slave が追従できず、変位が大きい状態で試験体に接触することとなり高さの判定は困難となる。さらに接触センサは振動で誤認識しないよう、バケット先端において約 0.5kN 以上の負荷が同じ方向に 0.3sec 以上計測された場合に接触したと判断し Master の位置拘束ゲインを高めており、ミニショベル関節部にガタが存在するとセンサが反応するまでの時間が一定とならず、結果として Master で提示される姿勢に差が発生する。ミニショベルのガタを実測したところバケット先端が 2800mm の位置で垂直方向に 53mm のガタが存在していたが、これは建設機械の特性上必要なアソビであり、改善は難しいと考えられる。

今回の実験では力覚のみで高低差 150mm を判別することが可能であり、マウンドを±30cm 以内で平面に均すという作業目標の範囲に収まった。このような比較的単純な作業であれば、相似形インタフェースによる力覚提示は遠隔操作時にオペレータが作業状況を判断するための情報の一つとして有効であると言える。

### 6.3 均し作業に関する陸上実験

本研究では濁水中での遠隔操作均し作業に対し、光学映像を用いずに作業状況を認識するため触覚情報を用いることを提案している。6.1 節では均し作業に重要な水平引き動作に関し、同構造型マスタスレイブ及び姿勢情報のモニタ提示により操作性が向上できることが明らかとなった。6.2 節で相似形インタフェースのみで高低差 150mm を判別できることが明らかとなったが、CG によるビジュアルフィードバックを加えることで認識精度の向上が期待できる。これらは要素的な実験であり、実施工現場を想定した総合的な実験を行なう必要がある。そこで触覚を用いた水中バックホウ遠隔操作インタフェースの総合的な実験として、相似形入力インタフェースおよび触覚 CG (断面表示モニタ、鳥瞰図モニタ) により、未知の形状の石山を光学映像で見ることなく+300mm の高さの平面に均す遠隔操作陸上実験を行った。

バケットが十分に届く 2.3m から 3.5m の範囲内で左右 30 度の扇状の範囲を実験範囲とし、その範囲内で前後方向に 10cm 間隔、旋回方向に 5 度間隔の計 169 点の高さをトータルステーションにより測量する。なお陸上実験用ミニショベルのクローラは制御することができないため、旋回のみでの評価とした。図 14 に実験範囲を示す。

被験者は窓が覆われた制御室において遠隔操作を行っており、このとき被験者が得ることができる情報は CG によるバックホウ姿勢と、相似形インタフェースにフィードバックされる力覚、視覚化された触覚情報のみである。CG には 300mm の高さに施工目標ラインを表示しており、被験者はこのラインを目標に均し作業を行った。比較対象として同被験者が搭乗操作による均し作業を行い、その精度を比較することとした。

表 1, 2 は搭乗操作作業、遠隔操作作業における測量点 169 点の 6 回分、計 1014 点の高さの平均とその標準偏差、最大値、最小値を示したものである。

搭乗操作による均し面の平均高さ 306mm、標準偏差 19mm に対して、触覚情報を用いた遠隔操作による均し面の高さは平均 280mm、標準偏差 23mm であった。また均し面高さの最大値と最小値は搭乗の場合で 391mm, 243mm に対し、遠隔操作の場合で 384mm, 194mm であった。

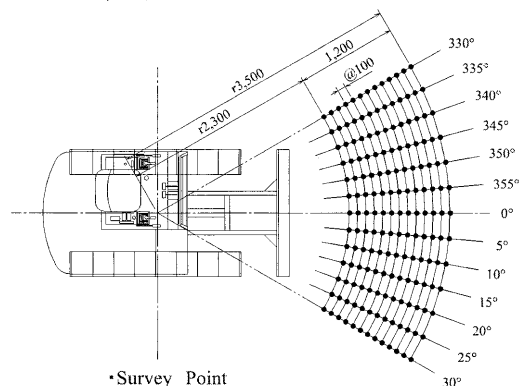


図 14. 実験範囲

Fig.14 Working Range of Experiment

表 1. 陸上均し実験結果(搭乗操作)

Table.1 Result of Trimming Rubble Mound(onboard)

	AVERAGE	Standard deviation	MAX	MIN
Initial form	572	106	808	288
Work result	306	19	391	243

表 2. 陸上均し実験結果(遠隔操作)

Table.2 Result of Trimming Rubble Mound(teleoperate)

	AVERAGE	Standard deviation	MAX	MIN
Initial form	559	98	839	246
Work result	280	23	384	194



図 15. 作業後のマウンド形状 (無視覚遠隔操作)

Fig.15 Situation of Work Result

触覚情報を用いた遠隔操作において目標とした高さ(+300mm)との差の最大値は 106mm であり、ケーソンマウンド築造における捨石荒均しの許容誤差は±300mm と施工基準により定められているため、本実験機ではその基準を満たしていることが確認された。また搭乗操作と触覚情報を用いた遠隔操作の標準偏差の差は 4mm であることから、搭乗操作の場合とほぼ同等の精度で均すことができている。触覚情報を用いた遠



隔操作では TV カメラ等の視覚情報を用いていないため、視覚情報が期待できない水中遠隔操作でも本システムは有効であると言える。図 15 に無視覚遠隔操作における作業後のマウンド形状を示す。

## 7 実海域実験

### 7.1 実海域実験フィールド

陸上実験用ミニショベルを用いた遠隔操作実験では施工精度に関して搭乗操作と同等という良好な結果を得ており、これに関連して接触による地形認識もその有効性が認められた。追従性に関しては当初から予想していたとおり作業時の負荷による追従性の低下が見られたが、Master-Slave の姿勢を重畳表示することで特に問題なく作業を行うことができた。このような結果から、濁水中などの無視覚条件下においても本遠隔操作インタフェースにより作業が可能であると言える。

しかし割石の大きさや出力の違いなど条件が異なるため、提案手法による遠隔操作作業の施工精度、および施工能力を、実機レベルにおいて検証する必要がある。そこで最終的な実験として、実施工現場におけるマウンド均し作業を行うこととした。

実験フィールドは長崎県長崎市神ノ島沖防波堤の -16.5m 捨石マウンド上で行った。捨石の大きさは 5~100kg/個、評価範囲は 10m×10m とし、作業開始前のマウンド形状は 80cm 程度の不陸が存在していた。対象とする作業は±30cm の捨石荒均し作業とした。比較として潜水士による搭乗操作による荒均し作業を行う。なお潜水士搭乗操作時海域透明度は 5m であった。図 16 に実験評価範囲を示す。

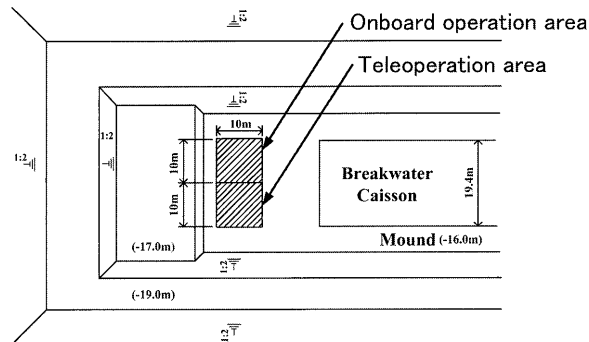


図 16. 実海域実験作業範囲  
Fig.16 Trial Evaluation Range

今回の実海域実験では遠隔操作と搭乗操作の両方の作業を同じ潜水士（水中バックホウ作業経験 4 年）により行った。この潜水士が実験前に本遠隔操作インタフェースを経験した期間は 1 日のみであり、提案手法による結果は個人の習熟度に依存していないものと考えられる。オペレータは TV カメラを用いず、CG によるバックホウ姿勢と、相似形インタフェースにフィードバックされる力覚、視覚化された触覚情報のみで作業を行った。

### 7.2 実海域実験結果

作業面積は時間的な制約から、潜水士搭乗操作では 5

×5m の 25 平米、遠隔操作では 4m×8m の 32 平米であった。また作業後に、それぞれの作業範囲内の水深測量を 1m 間隔で行った。図 17 および図 18 は法線方向から見たときのマウンド面形状を示したものである。

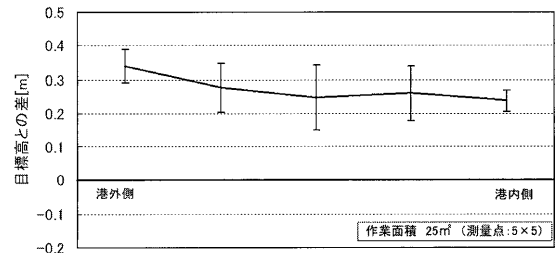


図 17 マウンド面測量結果 (潜水士搭乗操作)  
Fig.17 Mound Survey Results (Onboard Operation)

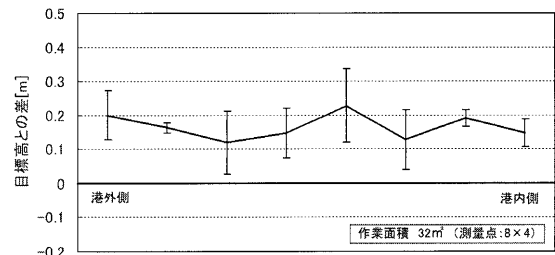


図 18 マウンド面測量結果 (提案手法)  
Fig.18 Mound Survey Results (Teleoperation)

図 17 は潜水士搭乗操作による作業結果である。一部目標精度である±30cm を超えた点があるなど全体的に高めであるが、ほぼ平坦に均すことができていると言える。なお、測量点の平均は+27cm、標準偏差は±8.1cm であった。

図 18 は提案手法による作業結果である。搭乗操作に比べて多少のばらつきがあるが、ほぼ全点で目標精度±30cm に収まっている。なお、測量点の標準偏差は潜水士搭乗操作と同じ±8.1cm であり、これらの結果から捨石マウンドを平坦に均すという作業において、提案手法は十分な性能を有していると言える。さらに平均高さでは潜水士搭乗より目標に近い+17cm であり、これは 3.2 節で述べた設計形状の情報を呈示したことで、常に目標高さと比較することができ施工精度が向上したと考えられる。

なお提案手法による均し作業後のマウンド状況を図 19 に示す。奥行き方向に置いてある 5m の測量スタッフを定規として見ると、平坦であることがわかる。

次に本実海域実験における単位時間あたりの作業面積は、提案手法による作業で 25.6 平米/時であった。なお、港湾土木請負工事積算基準における潜水士搭乗型水中バックホウの標準作業面積は透明度 5m の場合 29 平米/時であり、提案手法は濁水中においても透明度の高い海域で潜水士が搭乗し作業する場合と同等の施工能力を有していると言える。さらに提案手法ではカメラ等光学映像を用いておらず透明度により作業効率が変わらないため、透明度の低い海域での利用について考えると潜水士搭乗操作より高い施工能力を有すると考えられる。



図 19. 作業後の捨石マウンド状況

Fig.19 View of the Mound after the Work

## 8 結論

本研究では、安全で効率的な水中作業の実現を基本目標として、視覚情報が不十分な水中作業の遠隔操作において、作業機械の姿勢や接触情報（接触時に作用する反力、接触点の位置等）をオペレータに呈示する手法を提案した。

ミニショベルを用いた陸上実験では要素技術について基礎的な実験を行ない、高さ判別や水平引き操作の精度向上に相似形インタフェース及び姿勢表示による作業状況認識が有効であることがわかった。遠隔操作による均し作業実験では、触像を用いた外界計測技術によりマウンド面の形状をリアルタイムに認識することができ、平均-20mm、標準偏差±23mmで均すことができた。これらの結果から、提案手法が光学映像を利用できない状況における均し作業に有効であると言える。

さらに実機レベルにおける有効性を実証するため、水中バックホウによる捨石マウンドの荒均し作業を対象事例として、実海域における実験を行なった。実海域実験の結果、提案手法による施工精度は平均+17cm標準偏差±8.1cmであり、単位時間あたりの作業面積は25.6平米/時であった。これは潜水士搭乗操作による施工と同等の均し精度、及び施工能力であり、提案手法が実作業でも有効であると実証できた。さらに光学映像を必要としないことから、提案手法により濁水中での安全で効率的な無人化施工を実現できると考えられる。

しかし、今回の研究対象とした捨石均し作業は、所定の施工精度を要求される重作業ではあるが、作業内容としては比較的簡明なものであって、例えば栈橋の点検・補修など、繊細で複雑な水中作業にまで本システムを適用することはできない。

高度成長期に整備された数多くの港湾施設が耐用年数に近づいており、これらを健全な状態に管理し、及び有効に活用することが求められる今日、本研究の成果を水中作業の無人化の第一歩として、今後とも、より高度で実用性の高い水中作業の無人化を目指して研究を進めていく考えである。

## 参考文献

- [1] 国際ケーブル・シップ株式会社, 埋設ロボット : <http://www.k-kcs.jp/japanese/cablepandr.html>
- [2] 山口,石松,山元 : 無人化施工のマンマシンインターフェイスに関する調査; 平成 17 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集,pp.145-148(2005)
- [3] 江川, 生田, 小関 : 油圧ショベルのワンレバー式操縦システムの開発; 第 10 回建設用ロボットシンポジウム論文集, pp.241-248(2004)
- [4] 財団法人先端建設技術センター編, : 緊急時の無人化施工ガイドブック; pp14-15(2001)
- [5] 高橋 他 9 名, : 水中レーザー視認装置の開発; 海洋開発論文集第 11 巻,pp277-pp.282(1995)
- [6] 浅田 : マルチビームソナーによる海底地形の可視化; 日本音響学会誌第 55 巻第 10 号, pp.717-722(1999)
- [7] Hirabayashi, Yasuta, Yano, Iwata : Evaluation of Operativeness Concerning Interface of Remote Controlled Backhoe; ISARC2006,pp.52-55(2006)
- [8] 計測自動制御学会編 : ロボット制御の実際 ; コロナ社 (1997)
- [9] 金山裕幸 : 水中施工機械「水中バックホウ・ビッグクラブ」による施工コスト削減対策について ; 第 16 回港湾技術報告会概要集(1999)
- [10] 運輸省港湾局編 : 港湾工事共通仕様書 ; (財) 港湾建設技術サービスセンター,pp286-291(1996)
- [11] 山田宏尚, 武市教児, 武藤高義 : 遠隔操作建設ロボットシステム用マスタ・スレーブ制御 ; 日本機械学会論文集(C 編)66 巻 651 号,pp.140-147(2000)

(2007 年 6 月 11 日受付)

## [著者紹介]

### 平林 丈嗣 (正会員)



1995 年東京工科大学工学部機械制御工学科卒業。同年運輸省第二港湾建設局に入省。98 年より港湾技術研究所機械技術部（現施工・制御技術部）に所属し、水中施工機械の遠隔操作に関する研究に従事。平成 18 年より筑波大学システム情報工学研究科に在学中。

### 矢野 博明 (正会員)



1997 年筑波大学大学院工学研究科修了。同年日本学術振興会特別研究員 (PD), 99 年同大機能工学系講師, 06 年同大システム情報工学研究科助教授, 07 年同准教授, 現在に至る。力覚呈示, 移動感覚に関する研究に従事。博士 (工学)

### 岩田 洋夫 (正会員)



1986 年東京大学大学院工学系研究科修了。同年、筑波大学構造工学系助手, 88 年同講師, 93 年同助教授, 04 年同大システム情報工学研究科教授, 現在に至る。人工現実感に関する研究に従事。工学博士