

応用論文

水中工事の無人化を目的とした 水中建設機械遠隔操作インタフェースに関する研究

平林 丈嗣^{*1*2} 矢野 博明^{*2} 岩田 洋夫^{*2}

Research on Teleoperation Interface for Excavator to Unmanned Underwater Construction

Taketsugu Hirabayashi ^{*1*2} Hiroaki Yano ^{*2} Hiroo Iwata ^{*2}

Abstract - Mechanization of diving operations is necessary for safer and more efficient underwater construction works in port areas. The transportation of the heavy material in water are done by crane vessel. But, it is impossible that the crane operator confirms divers safety by watching. The technology which can do the underwater construction more safely and efficiently is necessary. Operation of the man-machine interface should be easy and intuitive for efficient works when using a remote-controlled underwater excavator. Moreover, operation is preferable to be unwearying. The aim of this research is to evaluate the operativeness of the joystick-type-interface that is newly proposed. The operativeness of the joystick and that of the similar-figure-interface were compared in the pointing experiment. As for the pointing experiment, the operation efficiency was evaluated by the speed and the accuracy of the operation of the excavator front part, and the tiredness level was evaluated through the hearing to the operators.

As a result, concerning the new interface that uses a joystick, operation efficiency was found to be almost equal to the similar-figure-interface and the tiredness level has been improved. Moreover, the construction material transportation in water was assumed, and the handling experiment was done. The mechanization of the heavy work for underwater can be expected by the result of this research.

Keywords : underwater excavator , unmanned underwater construction, diver , teleoperation , ARToolKit

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るが、水中作業はその特殊な環境から機械化が難しく、未だ相当程度を潜水士等の人力に依存している。例えば水中での重量物の移動・運搬は、現在のところクレーン台船により行っているが、その玉掛や操作指示は潜水士により行っている。荷は台船上のクレーンからの荷役であるため、台船が波浪により動揺すると、吊荷も安定せず、近傍で指示を行う潜水士に危険を及ぼす可能性がある。さらに、クレーン運転士は潜水士の安全を目視で確認することが不可能である。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。

遠隔操作型建設機械を用い効率的な施工を行うためには、インタフェースの操作性が直感的かつ容易であること、そして身体的疲労の少ないことが望ましい。遠隔操作型水中バックホウを用いた実海域実験では相似形インタフェースにより、作業状況の認識や容易で直感的な操作が可能となった。さらに地形情報を触像として呈示することで、水中カメラが使えない濁水中



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

でも基礎マウンド均し作業を遠隔操作で実現した。しかし、入力量が大きいため疲労しやすく、長時間の作業には適していないことが明らかとなった。そのため実用化を目指すには、バックホウフロント部を操作するための相似形入力装置と操作効率が同等で疲労度の小さいインタフェースが必要であると考えた。

また、バックホウはエンドエフェクタ部を交換することで様々な作業に適応できる汎用建設機械である。ここで水中バックホウにフォークグラブなどを取付け、重作業マニピュレータとして利用することができれば、今後の水中工事の更なる安全性と発展が期待できる。

本研究では提案するジョイスティックインタフェースの操作性を従来方式や相似形入力装置と比較するこ

*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

とで、その有効性を確認する。また水中での部材運搬などの作業を想定し、ハンドリング実験などによる操作精度を比較した。

本研究の成果により、水中での鋼材保持やブロック撤去作業など、様々な重作業の機械化が期待できる。

2 関連研究

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[1]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バ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。

また、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[2][3]。

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視界は1~2m程度であり、減衰によりレーザー測量装置も利用できないため、作業状況の認識が困難となるためである。

この水中における認識の問題に対して、過年度に触像を用いた水中バックホウによる均し作業遠隔操作を行った[4]。これはバックホウの先端部(バケット)を接触端とし、地面に接触したときの座標を蓄積しCG(ComputerGraphics)によりモニタに描画することで地形の形状をオペレータに呈示する手法である。

さらに、建設機械側が力センサで検出した情報を操作者側にも力の感覚として呈示する同構造型マスタスレイブ機構[5][6]についても同時に研究を行い、そのインタフェースとして相似形入力装置を開発した。図2に開発した遠隔操作システム図を示す。この遠隔操作

システムを用い、実海域においてマウンド均し作業実験を行った結果、ほぼすべての計測点で施工基準を満たしており、接触情報が濁水中における遠隔操作に有効であるといえる。

しかし、実海域実験後のオペレータのヒアリング調査において、疲労により長時間の作業が困難であるという問題が提起された。この原因として考えられるのは、JISレバーのような速度入力の場合、入力量を保持すればシリンダの伸縮運動が継続するのに対し、同構造型マスタスレイブである相似形入力装置では常に入力量の変化を強いられるためであると考えられる。また、アームレストを取付けているものの、肘から先の部分については常に持ち上げた状態となり疲労蓄積の原因となっていた。実用化という目標を達成するには、このような腕全体を使った動作、及び、入力姿勢維持による疲労について解決する必要がある。

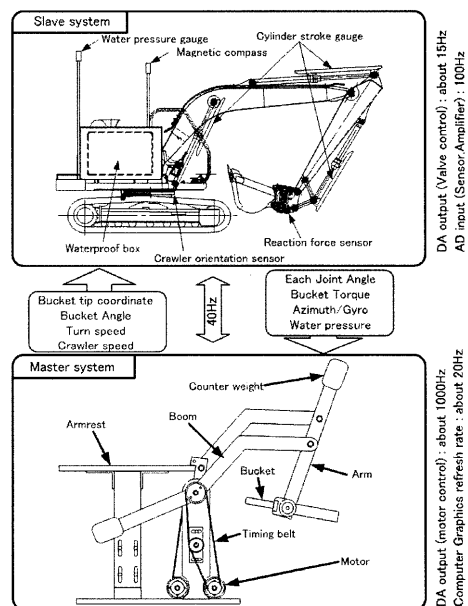


図2 遠隔操作システムの図

Fig. 2 Related chart of interface system

3. 操作インタフェースの改良

前述の同構造型マスタスレイブ機構を用いた遠隔操作では、実機による作業に必要な先端座標の指示精度を $\pm 50\text{mm}$ 、オペレータの操作による最小分解能を 2.5mm としたため、機体重量12tonクラスのバックホウのスケールにあてはめると入力装置の可動範囲は前後方向で最大400mm、垂直方向には最大500mm以上となる。これに対し各シリンダの伸縮速度を制御する通常の方法はレバーが倒れる範囲での入力となり、オペレータの操作入力量は少ない。さらにアームを大きく動かす場合でも入力したレバー角度を保持するため、長時間の操作に適していると考えられる。

そこで本研究では、オペレータの入力量や操作頻度を低減し、操作による疲労の低減を図るため、作業アーム部の先端を速度制御する方式のインタフェースについて提案する。また対象が人工構造物の場合、不用意に接触すると破壊する恐れがあるため、海中作業の

周辺状況認識を触像のみで行なうのは困難である。そこで触像の代りとなる対象物認識方法として、対象物にマーカーを貼付し、エンドエフェクタに設置したカメラ映像によりマーカーの座標・傾斜を計測することとした。このようなインタフェースにより、水中バックホウをベースとした重作業マニピュレータの遠隔操作を実現する。

3.1 操作入力装置形状の検討

操作効率を向上させるためには直感的で操作しやすい入力装置が必要となる。操作入力方法としては相似形入力装置のような位置制御によるものと、JIS規格レバー方式のリモコン装置のように速度制御によるものがある。位置制御では装置を小さくすることで入力量が少なくなり疲労は軽減できると考えられるが、微小操作入力が難しくなり精密な位置決めが困難となると考えられる。よってここでは速度制御による入力方法を検討することとした。

JIS規格による操作方式では各関節を個別に操作しており、バックホウの作業アームのようなシリアルリンクマニピュレータの先端座標を直線的に動かすには複合的な操作入力となり、熟練を必要とする。複数の関節をもつロボットアームの操作を行うにはエンドエフェクタを直接指示する方式が良いと考えられ、本研究では、バックホウ作業アームの先端座標をレバー入力により速度制御する方式とした。

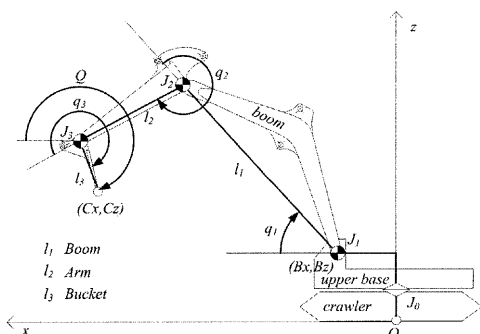


図3 バックホウモデル

Fig. 3 Model of Excavator

バックホウの形状を考えたとき、図3のように4つのリンク機構を持つシリアルリンクマニピュレータと考えることができる。ここでJ1からJ3までは油圧シリンダの伸縮により駆動されるため、ある程度精度の高い位置制御が可能である。しかしJ0については油圧モータの回転力を1段の歯車によりベース部に伝達しており、モジュールも大きくなるためバックラッシュも大きい。また、旋回動作により作業アーム先端に負荷をかけるとJ1軸に大きな捻れ力が発生するため、J1からJ3の油圧シリンダと比較してJ0の旋回トルクは低く制限されており、メーカーも旋回動作で大負荷をかけないことを推奨している。つまり作業としては、方向を決めてから掘削などを行うことになる。そこで旋回動作のための入力レバーは別に設けることとし、本研究における操作入力装置の制御対象である先端座標はバックホウ正面をX軸としたX-Z平面内に制限する。また、作業アームのエンドエフェクタをフォークグラブなど

とし把持作業を行う場合、対象物とフォークグラブの成す角度が重要であると考えられる。つまり操作入力装置にはJ3の角度が制御可能であることが求められる。

以上のことを考え、操作入力装置はレバーグリップ部が回転入力できるジョイスティックを横に設置した形状とした。レバーを倒すことにより先端座標を速度制御し、レバーを捻ることによりJ3を角速度制御する。また、横置きとしたことで入力方向がX-Z平面となり、レバーを倒す方向にアーム先端が動くため直感的な操作も期待できる。

しかし、入力量が減少した場合、微小な入力が行いにくくなるのが想定される。遠隔操作型建設機械では比例電磁弁（パイロット弁）により低圧の油圧を制御し、その油圧で高圧のメインバルブを動かす構造となっている[7]。つまり物理的に動く弁が二段階あるため、駆動するまでにタイムラグが発生することになり、ハンドリング作業に必要な微調整が難しくなるものと考えられる。

この問題に対しては最終的な座標を指定できる位置制御が有効であると考えられる。具体的には機体が停止状態、レバー中立の場合に、速度制御と位置制御を切替えるようにする。ここでジョイスティックの最大入力角度は約30degであり、その範囲を10段階程度で入力できた。また実験機の先端座標の目標分解能は50mmとしている。よって位置制御に移行した場合、その時点での位置を中心として、レバー入力最大のときに先端座標が25cm動くように設定することとした。

通常の遠隔操作リモコンによる操作方式であればシリンダを個別に駆動させるため、レバーの入力角に応じた信号を電磁バルブに入力すれば良く、作業機械の遠隔操作化は容易であるのに対して、先端座標を制御するには、座標から関節角度を求める逆運動学計算、各シリンダのセンサ情報の取得・処理する演算装置が必要となり、遠隔操作化のための機構は複雑になる。

そこで横置きのジョイスティックの形状で個別に油圧弁を駆動させる関節角度入力方式についても比較することとした。バックホウの作業アーム形状を考えるとJ1、J2の角度が可動範囲の中心付近にある場合、J1の角度を変化させることで先端座標は上下する。J2角度を変化させれば先端座標は前後に動く。厳密には円弧軌道となるが、直感的な操作ができると考えられる。

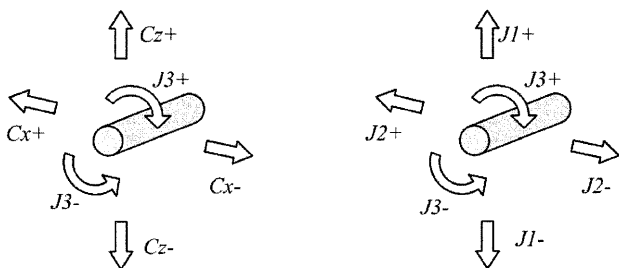


図4 座標指示方式と関節角度入力方式

Fig. 4 Coordinates input method, Angle input method

3.2 ARToolKitによる対象物座標の計測

海底面に積まれている鋼材など不用意な力がかかることを避けねばならない状況下での物体認識を想定し、

対象物にもっとも近接できるフォークグラフ部に設置した水中カメラにより、対象物の位置を同定する。

前述のバックホウのモデルでは、バックホウ旋回中心を Z 軸、バックホウ正面を X 軸とし、Z 軸とクローラ下面と交わる点をバックホウローカル原点 O としている。旋回を考慮しなければ、バックホウは一般的な 3 自由度シリアルリンクマニピュレータと考えることができ、先端部に設置したカメラ座標 (C_x, C_z) 及びカメラの向き Q は式(1)から(3)によって表すことができる。

$$C_x = l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3) + B_x \quad (1)$$

$$C_z = l_1 \sin q_1 + l_2 \sin(q_1 + q_2) + l_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3) + B_z \quad (2)$$

$$Q = q_1 + q_2 + q_3 \quad (3)$$

この式からカメラ視線は式(4)の一次直線として表すことができる。

$$z = (\sin Q / \cos Q)x - (\sin Q / \cos Q)C_x + C_z \quad (4)$$

また、カメラと対象物の位置関係は ARToolKit により取得することとした。これは、対象物を船上から投入する場合や潜水士作業により予めマーカーを設置することが可能であれば、ARToolKit ライブラリに用意された arGefTransMat()関数により対象物と視点との位置関係が把握でき、式(4)によるカメラ視線に加えることでバックホウと対象物との相対関係が明らかとなると考えられる。そこで遠隔操作システムの他に ARToolKit を動かすためのコンピュータを別に設け、UDP によりカメラ座標行列データを MasterPC に送信する。前述の実海域実験において作業中の透明度は 2m 程度であった。そのため、陸上実験ではカメラとマーカーの距離が 2m 以上ある場合、MasterPC に座標情報を送信しないこととした。

なお、物体の形状を計測するにはレーザレンジファインダなど光学測量装置を用いることが一般的であるが、水中ではレーザが減衰すること、気中と屈折率が異なるため市販品をそのまま防水容器に入れても利用できないこと、精密機械であるためバックホウへの搭載に不向きであることから、本研究では水中カメラの利用を前提としている。

3.3 横視点からの CG 表示による位置関係呈示

本研究ではマーカーを添付した既知形状の建設部材を台船上から投入し、その部材をハンドリングすることを想定作業とする。この場合、マーカーと部材の形状を関連づけることで容易に対象物の形状を CG 呈示することが可能となる。これはカメラ画角に納まらない長尺物でも有効である。また、効果的に位置関係を認識できる視点として、作業アームの自由度から、バックホウ座標系における X-Z 平面に直交する視点からの描画が有効であると考えられる。

4. ポインティング動作による操作性の評価

4.1 ヒアリングによる疲労比較

4.1.1 ポインティング動作による評価

バックホウでの掘削や埋戻しなどの作業では、バケット先端を目標位置へ素早く移動する必要がある。先端を目標位置に正確に移動する動作を連続することで、実作業と類似した動作となり、操作効率を評価できると考えた。また、このポインティング動作を連続して 30 分行い、疲労度に関してヒアリング調査を行う。

実験ではスピードと正確性を評価することとした。作業に要した時間、および、目標位置（以後、ポイントと表示する）を思い通りに指示できなかった回数、つまり誤動作した回数をカウントした。スピードについては作業時間が短いほど操作効率が良く、誤動作については回数が少ないほど正確に指示できていると評価できる。

ポイントは直径 10cm の赤い円形とし、その周囲を白く縁取りした。これはバックホウの運転席からブームやアームを伸ばして届く点、いわば最大作業半径においても、正確にポインティングできたか確認することが出来る程度の大きさである。

疲労度については、それぞれの操作装置を比較して肉体的に疲労すると感じた順位を付けてもらう事とした。また、長時間の操作のためには直感的に操作が可能である必要があると考え、操作が容易だった順についても評価することとした。

4.1.2 実験用バックホウ

実験では 0.09m³ 級の市販ミニショベル（日立建機社製 EX40-2）を使用した。遠隔操作用に油圧系統を改造したもので、搭乗操作、リモコンによる遠隔操作のほかに、電圧信号を各シリンダのバルブドライバに入力することで制御することが可能である。電圧信号操作では搭載した SlavePC の DA ボードにより行う。SlavePC には AD ボードも搭載しており、各関節に設置したポテンシオメータの情報を取得している。図 5 に実験状況、図 6 にシステムダイアグラムを示す。

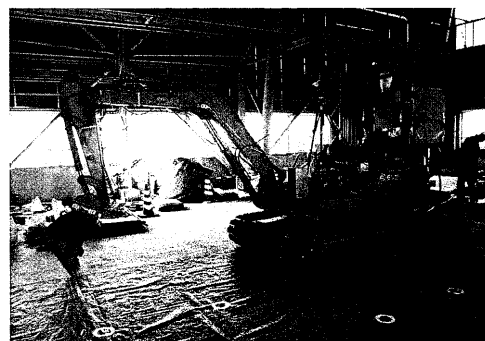


図 5 実験用バックホウ（陸上用）

Fig. 5 Experimental Excavator (Land type)

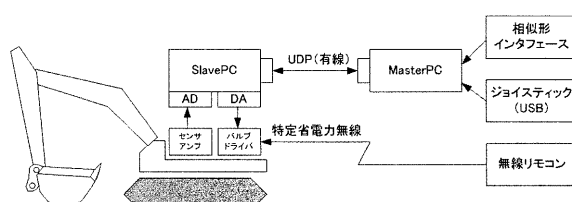


図 6 システムダイアグラム

Fig. 6 Block diagram of Land model system

4.1.3 操作入力装置

・無線リモコン

リモコン装置（アンリツ社製 KC316F）は比例電磁バルブを無線遠隔操作することのできる市販のものを利用した。このような無線リモコンは災害復旧現場などの遠隔操作で既に利用されており、一般的なバックホウの操作系と同様に左右 2 本のレバーで各関節を個別に操作する機構となっている。

・ジョイスティック

ジョイスティックは Microsoft 社製の SideWinder Force Feedback2 を使用した。右手でバックホウアーム部の操作を行うものとし、左手は別途に配置したレバーにより旋回操作を行うこととした。

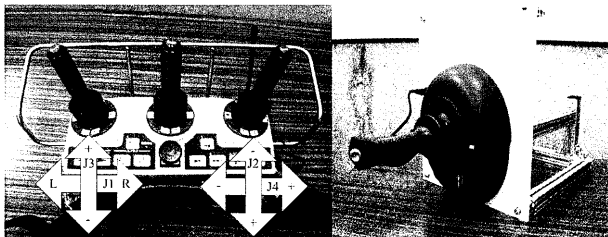


図7 リモコン及びジョイスティック

Fig. 7 Remote Controller and Joystick

・相似形インタフェース

相似形インタフェースは 2 章で述べた実海域実験に使用したものをを用いた。旋回操作においては別途に設置したレバーにより旋回操作を行うこととした。

4.1.4 TVカメラ・モニタ

視覚情報としてTVカメラ 2 台を使用し、バックホウの運転席とアームに取付けた。作業現場全域を撮影することは濁水中では困難であるため、鳥瞰的な映像を取得するカメラは設置していない。海上からの遠隔操作を想定しているため、搭乗操作以外は本モニタ映像のみで遠隔操作を行う。TVカメラ映像（左：運転席視点、右：アームカメラ）を図 8 に示す。

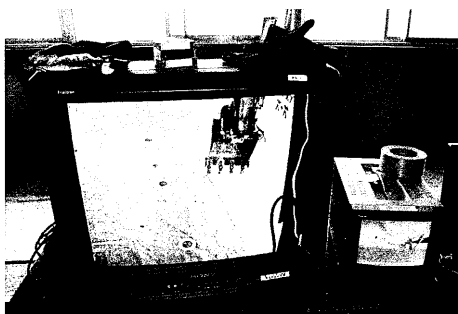


図8 TVモニタによる遠隔操作画面

Fig. 8 Situation presentation by monitor

4.1.5 ポインティング実験方法

ポインティング実験では 18 点のポイントを 1 m 間隔で配置し、数字の若い順序にポインティングする。図 9 に示す一番目のポイントを指示した状態を初期位置とし、操作はバケット先端にある 4 本の爪の左端 1 本がポイントに合致した場合に次の点に進むこととする。誤動作した場合は再度同じマーカーと合致するまでポ

インティングする。この動作を搭乗操作・無線リモコン・相似形インタフェース・ジョイスティックによる遠隔操作により行う。ただし、ジョイスティックは座標入力方式と関節角度入力方式の 2 種類とする。

以上の 5 種類の操作方法を 3 回ずつ行い、ポインティングに要した時間および誤動作した回数を計測した。被験者は 3 人とし、車両系建設機械の資格保持者により行った。被験者の習熟度については三名とも資格所有後数年のレベルであり、建機オペレータとしては経験の浅い部類に入る。しかし、本研究が対象とする水中バックホウは実用化から年数も経っておらず、基本的には潜水士が操作するため、熟練オペレータは少ないものと予想される。

また、疲労度については 1 種類の操作方法につき 30 分ずつ連続で作業してもらい、肉体的な疲労と追従性を含む操作入力の容易さについて順位を付けるとともに、その理由についてもヒアリングを行った。なお長時間の連続運転において他の被験者と同じ条件とすること、指示の順番の混乱を避けるため、ポイントする順序はランダムとせず、シーケンシャルにポイントすることとした。

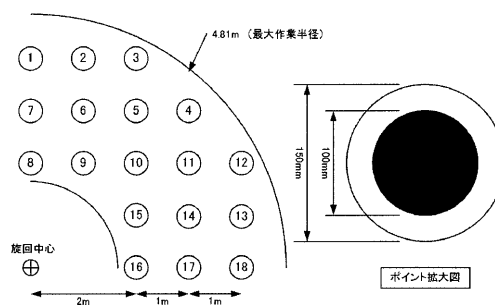


図9 ポインティング順序

Fig. 9 Arrangement of target point

4.1.6 ポインティング実験結果

指示時間の平均値を図 10 に、また誤動作回数の平均値を図 11 に示す。

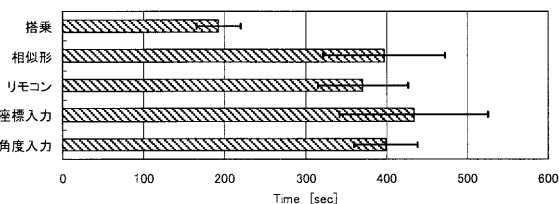


図10 指示時間平均値[sec]

Fig. 10 Average of working time

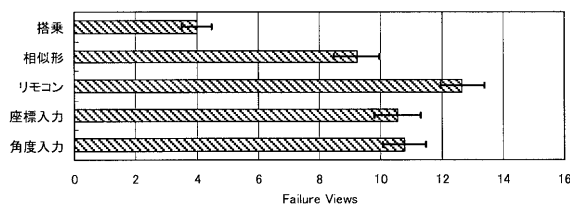


図11 誤動作回数平均値[回]

Fig. 11 Average of failure frequency

実験後のヒアリングでは肉体的な疲労度と直感的な操作性について表 1 に示す評価基準で順位を付けてもらった。表 2 に疲労度と操作性についてのヒアリング結果を載せる。表 3 には疲労度に対するヒアリング意見を、表 4 には操作性に対するヒアリング意見を載せる。

表 1 ヒアリング評価点数

Table 1 Criterion of hearing

	疲労度	操作感覚
5点	2時間以上の連続作業でも問題ない	特に意識せず直感的に操作が可能
4点	1時間程度の連続作業なら可能	姿勢をイメージすれば操作が容易
3点	適宜インターバルがあれば半日作業は可能	姿勢をイメージすれば操作可能
2点	適宜インターバルがあれば1時間作業は可能	イメージしても思い通りに動かすには慣れが必要
1点	15分以上は困難	思い通りに動かない

表 2 疲労度と操作性のヒアリング結果

Table 2 Hearing result (tiredness and operativeness)

	疲労度				操作性			
	被験者A	被験者B	被験者C	合計	被験者A	被験者B	被験者C	合計
リモコン	5	4	5	14	2	4	4	10
相似形	3	2	2	7	4	2	2	8
座標入力	2	3	4	9	3	1	3	7
角度入力	2	3	4	9	3	4	3	10

表 3 疲労に対するヒアリング意見

Table 3 Comment concerning tiredness

リモコン	指先で操作できるので疲れにくい
相似形	腕を常に持ち上げる姿勢でつらい
座標入力	前後方向は良いが、上げるのは疲れる
角度入力	前後方向は良いが、上げるのは疲れる

表 4 操作性に対するヒアリング意見

Table 4 Comment concerning operativeness

リモコン	操作が慣れている。 個別に角度を入力できるので、バックホウの姿勢が予想しやすい。
相似形	思ったところで止まらない。 姿勢の認識はできる。
座標入力	関節角度の予想がつかない。 現在の姿勢がわからないので、動かしにくい。
角度入力	倒す方向と関節の対応を覚えれば、リモコンと同じように扱える。 個別に角度を入力できるので、バックホウの姿勢が予想しやすい。

4.1.7 ポインティング実験考察

無線リモコンは操作効率において、指示時間は相似形インタフェースより良好な結果となったが、誤動作回数は1番多い結果であり、操作スピードは速いが乱雑な操作であったと考えられる。

ジョイスティックでは座標入力、関節角度入力ともにほぼ同等の結果となった。指示時間については相似形インタフェースと比較してほぼ同等の結果となったが、誤動作回数に関してはともに多い結果である。これは相似形インタフェースではバックホウの姿勢を入力装置の姿勢から確認できるのに対し、ジョイスティックではTVカメラ映像の動きから現在の姿勢を予想しており、バックホウの姿勢を直接的に確認できないためと考えられる。

しかしヒアリング調査での意見では、関節角度入力方式と比べ、座標入力方式は操作性が悪いと感じる結果となった。同じ形状であるにもかかわらずこのような差が発生したのは、関節角度入力方式ではバックホウの姿勢がある程度予想できるのに対し、関節角度を自動的に制御する座標入力方式ではどのように関節が変化するか想像しにくいという事が原因である。この

結果から、バックホウの動きや姿勢は遠隔操作において重要な情報であると言える。

ジョイスティックによる操作疲労度は相似形インタフェースより少ない結果となった。ヒアリングからはジョイスティックを上げる動作に疲労を感じたものの、前後させる操作や下げる操作ではほとんど疲労を感じないという意見であった。

以上の結果からジョイスティックを横置きにした形状はバックホウの遠隔操作において通常のリモコンよりも操作の正確性が高く、相似形インタフェースより長時間の操作入力に適した形状であるといえる。

4.2 操作性実験

フォークグラブを用いた建設資材ハンドリング作業では、最終的な座標だけではなく、対象物へのアプローチも重要な要素となる。つまりエンドエフェクタの座標を直線的あるいは任意の曲線上に移動させる場合が想定され、これをオペレータが容易に入力できる必要がある。本章では移動目標追従実験により座標入力方式、関節角度入力方式について、先端座標の精度と入力の煩雑さを比較する。

4.2.1 移動目標追従実験

座標入力方式、関節角度入力方式について、操作性と操作精度を検証するための実験を行なった。実験は実機の機体姿勢が描画されるCG画面上でTargetを描画し、作業アームの先端がTargetに合致するように操作入力を行う。実機の先端座標軌跡とレバー入力量によって評価する。Targetの移動軌跡は二辺が1000mmの直角三角形を移動し、その移動速度は75mm/secとした。なお本実験では先端座標の軌跡に注目するため、J4(バケット角)は180度固定としている。

4.2.2 実験用水中バックホウ

本実験以降、新たに製作した水中バックホウ(図12)を実験機体として用いる。動力を三相200V22kwの水中モータに換装し、ポンプを回転させることで駆動油圧を発生させる。また拡張ポートにも比例電磁弁を設置しており、このポートからの油圧によりフォークグラブを駆動させている。電気系は水密容器に格納しており、水槽での実験を行うことを目的としている。作業アームなどの基本的なディメンションは前述の陸上機とほぼ同様である。

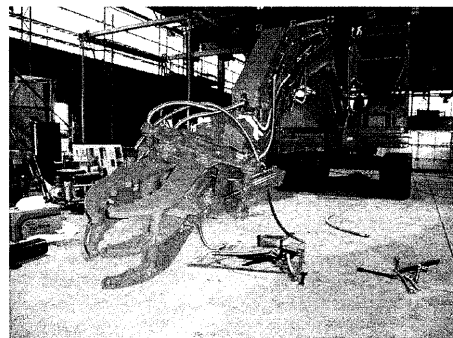


図 12 実験用バックホウ (水中用)

Fig. 12 Experimental Excavator (Underwater type)

4.2.3 移動目標追従実験結果

図13に先端座標の軌跡を示す。関節角度入力方式で

は水平に移動させる部分では直線的な軌跡となっているが、特に斜面部において目標ラインを大きく外れている。座標入力方式ではほとんどの場所において良好な結果を得ている。

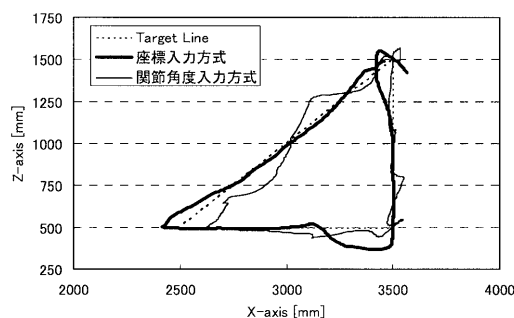


図 13 先端座標軌跡

Fig. 13 Tracks of Fork type grapple

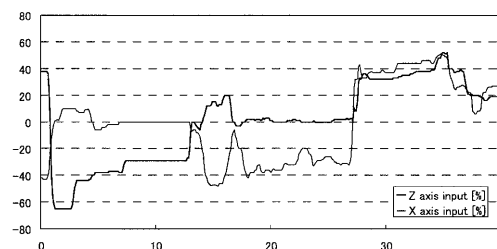


図 14 座標入力方式における操作量

Fig. 14 Amount of lever input by coordinates input method

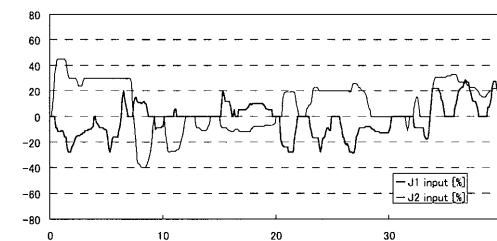


図 15 関節角度入力方式における操作量

Fig. 15 Amount of lever input by angle input method

また図 14, 図 15 はインタフェースのレバー入力量である。横軸の 0~13sec が垂直動作, 13~27sec が水平動作, それ以降が斜面動作時の入力量となる。関節角度入力方式では全体的に細かい動作を行っており, Target を追従するために複雑な動作を必要とすることがわかる。座標入力方式のレバー操作量を見ると, 微小な変化はあるものの, 各辺においてほぼ一定の操作量であった。つまり先端座標を直線的に移動させる場合でも複雑な操作を必要としないため, マニピュレータとしてのインタフェースに適しているといえる。

4.2.4 移動目標追従実験考察

接触干渉が作業に重大な影響を与える把持作業ではその経路が重要となり, 高い精度が求められる。

ポインティング実験では座標入力方式, 関節角度入力方式に大きな違いがみられなかったが, 先端座標を定められた経路で移動させる場合, 座標入力方式は関

節角度入力方式と比べて経路が滑らかであった。先端座標を Target の動きに合わせて動かす場合, J1 と J2 の二つのバルブを協調し, バルブの開ける方向, 大きさ, 割合を常に制御する必要があるが, 図 15 を見ると, 関節角度入力方式ではバルブのオンオフを断続的に繰り返すような入力が見られた。オペレータは Target と差分ができた場合にバルブを開け, Target に近接した場合にバルブを閉めるという動作を, Z 軸に対しては J1 を, X 軸に対しては J2 の入力で行ったものと考えられる。その結果, 軌跡も鋭角的になってしまい, 直線的な動作や任意の曲線を描く動作には適していないと言える。対して座標入力方式ではバルブ開度の割合を考慮する必要が無く, 先端座標の位置のみに専念できるため, Target の描く軌跡に追従できている。また図 14 から, 直線的に動かす場合はレバー操作量をほぼ一定の値で固定されており, 疲労の軽減にもつながると考えられる。以上の結果から, 水中バックホウを重作業マニピュレータとして活用するには座標入力方式が適していると言える。

4.2.5 座標入力方式における位置制御の有効性

座標入力方式では, 把持作業時の微調整など先端座標の微小な操作を行うことを想定し, 任意のタイミングで位置制御に移行することが可能である。ここではその有効性を調べるため, 目標位置から 50mm の誤差で停止させる作業を, 位置制御を利用した場合としない場合と比較する実験を行った。目標位置はバックホウ座標系原点から X=4m, Z=1m の場所とし, 50mm の誤差範囲内に 3 秒静止させることとする。なお J3 の角度は 180deg 固定とし, 先端座標の初期位置は X=2.8m, Z=0m とする。作業回数はそれぞれ 10 回行った。

目標位置に到達するまでの時間を図 16 に示す。なお, この結果は 3 秒の静止時間を差し引いたものである。

位置制御を利用した場合は, 利用しなかった場合と比べて約 1.8 秒程度の時間短縮しか見られず, 位置制御は作業時間の短縮に効果があるとは言えない結果となった。しかし, 位置制御を利用した場合の標準偏差は小さく, さらに移行するには一度操作を停止するための時間ロスがあることを考えると, 最終位置決めにかかる時間は短縮したと考えられる。以上の結果から, 位置制御の移行は微調整作業に有効であると言える。

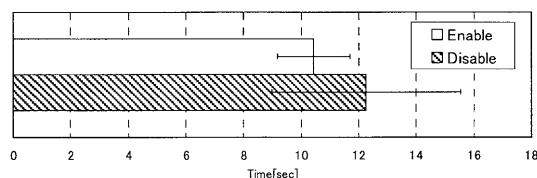


図 16 操作時間

Fig. 16 Operation time

5. 把持作業による高難度操作性の評価

5.1 単純把持作業実験

5.1.1 ARToolKit を用いた傾斜 H 鋼把持作業実験

H 鋼等の部材が海底面に無造作に置かれた場合, その姿勢は水平であるとは限らない。ARToolKit は, 認識

したマーカーの位置姿勢を4行4列の行列式で表しており、その行列を用いて図17のようにMasterモニタにH鋼の姿勢を描画すれば、H鋼とフォークグラブの位置姿勢の関係を容易に認識できる。なお、水中カメラ（アナログコンポジット出力）を本実験装置に設置しマーカー測定精度を計測した結果は、X方向に平均+11.6mm、Z方向に+24.7mm、それぞれの標準偏差は27mmと36mmであり、把持作業に十分な計測精度が得られている。

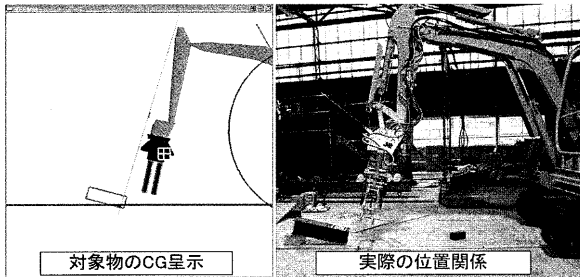


図17 CGによる対象物の呈示

Fig. 17 Display of object by Computer Graphics monitor

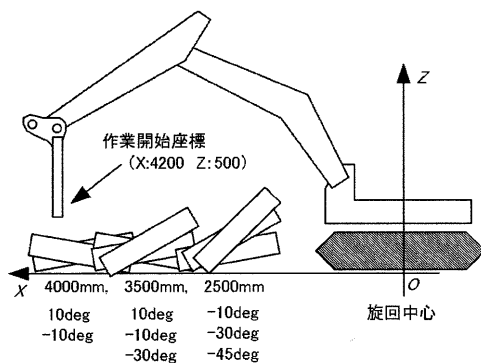


図18 実験時のH鋼設置位置

Fig. 18 Position of H steel shapes

そこでH鋼(L700×H200×W200mm)をピッチング方向に傾斜させた場合の把持実験を行った。実験時のH鋼の設置位置・姿勢を図18に示す。それぞれの姿勢において3回ずつ把持作業を行い、把持時の座標とフォーク角度を評価項目とする。フォーク先端座標の初期位置として、X:4200、Z:500、フォーク角度は真下の状態から作業を開始する。オペレータはH鋼の中心を目標とし、H鋼の設置角度と直交するように把持作業を行う。実験は座標入力方式のジョイスティックにより操作し、評価はH鋼の中心位置からの差分と、H鋼と直交する軸とフォークグラブ角度との差分とする。なお、ARToolKitを稼働させているPCのモニタ(フォークカメラ映像)はオペレータに呈示しておらず、図17のCGモニタのみでの遠隔操作となる。さらに3.2で述べたように、マーカーとカメラの距離が2m以上ある場合はCGモニタにH鋼を表示させないこととした。

5.1.2 単純把持作業実験結果

把持時のフォーク先端座標とフォーク角度をH鋼を基準とした座標系に変換したものを図19に示す。図の長方形がH鋼を示しており、プロット点から伸びている線は把持時のフォーク角度を示している。

実験の結果、把持時のフォーク先端座標の誤差はH鋼の中心から長手方向に最大96.7mm、短手方向に最大71.2mmであり、H鋼に対する角度誤差は最大7度であった。また、計24回の把持作業においてすべて把持することができており、様々な視点からの映像が確保できない水中においてARToolKitによる座標認識とCGモニタによる位置関係の呈示は有効であると言える。

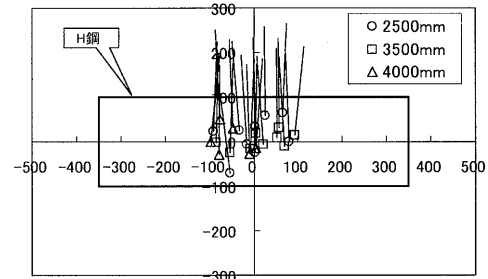


図19 フォーク先端座標及び角度

Fig. 19 Position and angle of Fork type grapple

5.2 港湾工事における把持作業

水中での重量物の把持・運搬は、現在のところクレーン台船により行っており、その玉掛や指示は潜水士により行っている。ここで、クレーン運転士は水中の状況を目視で確認することが不可能であり、操作は潜水士の音声指示により行っている。また、台船上からの荷役であるため、台船が波浪により動揺すると、吊荷も安定せず、近傍で指示を行う潜水士に危険を及ぼす可能性がある。

そこで水中バックホウの先端にフォークグラブを取り付け、重量物のハンドリングに用いることを想定し、遠隔操作による把持作業について実験を行った。

5.2.1 H鋼を対象とした把持作業実験

実験はフォークグラブを取り付けた実験機によりH鋼を把持し、水平面に対し一定の角度を保持したままH鋼を移動させる作業を行うこととした。これは長尺資材を地面などに接触しないように任意の姿勢で運搬する作業を想定しており、具体的にはH鋼(700×200×200)の中心を機体の旋回中心から2.7mの距離に設置し把持動作を行い、垂直に持ち上げた後、水平状態を保ったまま4.2m先に設置したタイヤ(中心高さ610mm、内径680mm)に通す作業を実験タスクとした(図20)。

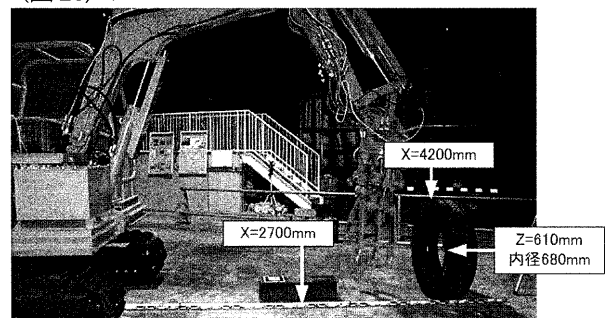


図20 把持作業実験状況

Fig. 20 Situation of handling work experiment

評価はH鋼の角度の誤差と中心座標の軌跡とする。但

し、H 鋼を直接計測することは困難であるため、把持後のフォークグラブの座標・角度の変化量から算出することとした。さらに、比較実験として JIS 型リモコンによる入力方式、及び、直視での座標入力方式による操作実験を行った。それぞれの入力方式においてそれぞれ 5 回実験を行うこととした。

5.2.2 ARToolKit による把持対象物認識

H 鋼には 180×180mm のマーカーを貼付しており、ARToolKit を用いてマーカーを認識させることで H 鋼の座標・角度データを得ている。得られた座標から H 鋼とアーム姿勢を側面方向からの視点で CG 描画することで、位置関係を呈示する。

ARToolKit で計測された座標・傾斜情報を、バックホウを中心とする座標系に変換し横視点からの描画とすることで相対関係を呈示するのは図 17 と同様であるが、把持後は H 鋼の座標・傾斜にフォークグラブの先端座標・傾斜を加えることで H 鋼を移動させており、オペレータはこの画面上の H 鋼姿勢情報により遠隔操作を行う。

5.2.3 把持作業実験結果

図 21 は横軸を時間とした場合の H 鋼の角度変化、図 22 はそれぞれの入力方式において最も角度誤差が大きかった回の H 鋼の中心座標の軌跡を示したものである。データは H 鋼を掴んでから 0.5sec 毎に記録している。

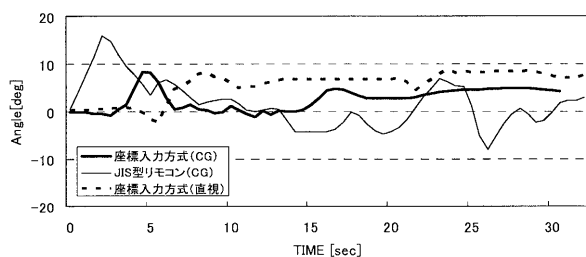


図 21 H 鋼の角度の変化
Fig. 21 Angle of H steel (JIS type)

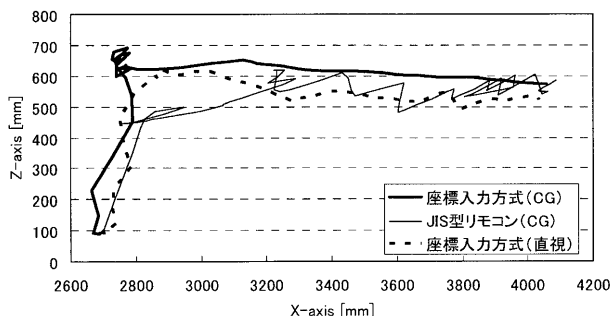


図 22 H 鋼中心座標の軌跡
Fig. 22 Tracks of H steel center coordinates

JIS 型入力では常に角度が大きく変化しているのに対し、座標入力方式では前半に角度誤差が大きくなるものの、後半では一定の角度で推移している。

H 鋼座標軌跡の図では、JIS 型入力が鋭角的な動きになっているのに対して、座標入力方式は水平移動時に ±5cm の範囲で直線的に移動している。これらの結果から、座標入力方式では J1, J2, J3 の角度を連携して

操作することができており、任意の姿勢で直線的に対象物を移動させる入力操作を容易に行うことができたと言える。

直接目視の場合では、操作装置を運転席横 1m に設置した。角度の変化や水平移動時の軌跡は細かく変化することはないが、目標からの誤差は横視点 CG を呈示した座標入力方式と比較して大きくなっている。これは、直接視認することで立体感はあるものの、水平や高さなどの情報は運転席付近からの視点では正確に判断できなかったためであると考えられ、横視点 CG による情報呈示は精度を要求される遠隔操作に有効であると言える。

5.2.4 把持作業実験考察

長尺物の部材を移設することを目的に、フォークグラブの角度を維持したまま部材を移動する実験を行った。JIS 型操作方式での H 鋼の角度誤差は最大 18deg に対して、座標入力方式の角度誤差は 8deg と良好な結果となった。建設現場で一般的に利用されている 4m の単管パイプの中心を掴み、実験と同様な移設作業を行った場合、端部の高さ方向の誤差は、JIS 型の入力では約 62cm になるのに対し、座標入力方式では約 24cm である。また、陸上でのクレーン作業において部材が 8deg 傾斜するには、3m のロープ繰り出し量の場合 41cm の振れがあった場合と同等であり、作業員による介錯が無ければこの程度の荷振れは十分にありうる。これらの結果から、横置きジョイスティックによる操作は従来の JIS 型の入力方式と比較して操作精度が高く、運搬中の部材傾斜も介錯無しクレーン操作と同等に保持できると言える。

また JIS 型操作による H 鋼中心座標の移動軌跡において、前後に往復する箇所があった。オペレータは H 鋼を水平に移動させる場合、先端座標位置に応じて J3 (バケット角) の角度を変更していく必要があるが、水平から大きく傾いた場合、先端座標の移動を停止してしまい、J3 のみ修正したためであると考えられる。座標入力においても同様にレバーの回転入力により水平を保つ必要があるが、図 22 の軌跡をみると直線的に移動しており、フォークグラブの角度と先端座標を連携して制御できていると言える。また最終的な位置決め精度については、4.2.5 の位置制御の有効性実験において ±50mm の範囲で静止できており、建設部材の運搬などに必要な精度は有していると言える。

本システムでは ARToolKit により対象物の座標を認識しているが、把持中はマーカーを確認することができなくなる。そのため、把持中に部材が滑って姿勢が変化した場合でも CG には反映されず、安全な作業には把持部材の滑り量、または滑ったことを感知するセンサが必要になると考えられる。

6. 考察

過去の研究では、遠隔操作における作業性の低下を補うため、同構造型マスタスレイブ機構による操作を行っており、その有効性は実海域における実験により実証したが、長時間作業における疲労が大きいという

問題も確認された。本研究では腕の動きを小さくすることで疲労度を改善できると考え、エンドエフェクタを速度制御する方式とした。さらにインタフェース形状について、アーム部の自由度から、レバーを横置きとした形状とし直感的な操作を図った。

実験は先端座標を迅速に目的の位置まで移動させる単純な作業と、対象物を正確に把持する高難度な作業の二段階で行い、単純作業では連続操作により疲労度と操作性を、高難度作業では操作精度を従来方式と比較した。

単純作業実験では提案する横置きレバー形状が疲労度について同構造型マスタスレイブ機構より改善されたことが明らかとなった。作業現場では休憩時間があるため、連続90分程度の操作が可能であれば良いと考えられる。過去の実験では同構造型マスタスレイブ機構でも60分程度の連続作業を行っており、本装置により疲労が改善できたとすれば十分実用に耐えられると考えられる。

さらに、把持対象物を水平に保持したまま移動させるハンドリング作業を行い、座標入力方式では移動中の対象物の傾斜誤差が従来の遠隔操作方式と比較して約半分となったことが確認された。

また、遠隔操作における作業効率は、状況をオペレータに呈示するレイグジスタンスが重要である。本研究ではARToolKitにより対象物の位置を認識し、横視点からのCG表示により対象物との位置関係を明確に示すことで、触像に代わる作業状況の呈示を行うこととした。実験ではH鋼が傾斜していた場合でも把持を失敗することがなく、その有効性が確認された。

以上の結果から、提案するインタフェースは相似形インタフェースの問題点であった疲労度について改善し、水中遠隔操作作業において従来のJIS型操作方式より優れた操作精度を有することが確認された。

本研究の成果により水中バックホウによる重量物の把持運搬作業が可能となれば、潜水作業の安全性が大幅に向上すると考えられる。

しかし最終目標である現場導入を実現するには耐久性という問題が残っている。センサ類やバルブドライバの耐久性について、メーカーや建設会社と協力し検証を行う必要があると考えている。

7. おわりに

陸上での工事では作業内容に応じて多種にわたる建設作業機械が開発・普及しており、さまざまな作業を効率よく施工している。

それに対し水中における工事では、その特殊性から機械化が進んでおらず、いまだ潜水士の手作業に依存している。しかし水中作業は極限作業環境下であり、最も機械化が必要な分野であると考えている。

そこで近年現場導入されはじめた水中バックホウ[8]に注目し、アタッチメントを変更することで様々な作業に適応できる水中作業マニピュレータとして活用することを目的に研究を行っている。

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、情報の呈示に優れたVR技術を建設機械遠隔操作に応用し、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] 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)
- [2] 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; pp.14-15(2001)
- [3] 山口, 石松, 山元: 無人化施工のマンマシンインタフェースに関する調査; 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)
- [4] Hirabayashi, Yamamoto, Yano, Iwata: Experiment on Teleoperation of Underwater Backhoe with Haptic Information”, International Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp.36-41(2006)
- [5] 計測自動制御学会編: ロボット制御の実際; コロナ社(1997)
- [6] 川村: ロボット制御入門; オーム社(1995)
- [7] 一柳建: 電子油圧制御; 日刊工業新聞社(1993)
- [8] 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)

(2008年9月17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。2006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