

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1222

December 2010

水中建設機械の遠隔作業支援システムに関する研究

平林 丈嗣

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	4
1. 目的と背景	5
1.1 現状の水中作業	5
1.2 水中作業の危険性	5
1.3 機械化が要望される工種	7
1.4 将来機械化が必要となる工種	7
1.5 水中における機械化の現状	7
1.6 研究の目的	9
2. 水中バックホウ遠隔操作の技術課題	9
2.1 陸上土木作業の遠隔操作技術	9
2.2 遠隔操作時の作業精度	10
2.3 遠隔操作時の作業効率低下	10
2.4 水中バックホウの遠隔操作技術	11
2.5 水中に適応した場合の技術課題	12
2.6 技術課題の整理	12
3. 水中建設機械の遠隔操作を実現する技術仕様	13
3.1 本研究が対象とする遠隔操作技術	13
3.2 水中遠隔操作のためのシステム要件	13
3.3 技術仕様	13
3.4 研究の目標	15
3.5 研究フロー	15
4. マウンド均し作業の遠隔操作に関する研究	16
4.1 要素技術の検討	16
4.2 センサ系の機構	17
4.3 室内模型実験機による実機機構への適応討	21
4.4 陸上実験機の製作	25
4.5 陸上実験	40
4.6 実海域作業実験	61
4.7 まとめと考察	69
5. 水中マニピュレータへの発展	70
5.1 潜水土作業の機械化	70
5.2 ハンドリングマニピュレータ実験	77
5.3 まとめと考察	80
6. まとめと展望	81
6.1 まとめ	81
6.2 水中作業における本研究成果の展望	81

謝辭	83
参考文献	84

Research on Tele-operated Support System of Underwater Excavator

Taketsugu HIRABAYASHI*

Synopsis

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 are required for these machines. The problem is that the conventional TV camera system is impractical in water because of turbidity. Haptic information is introduced to help to control construction machines substituting for visual information. In 2003, the experiment of leveling unknown gravel terrain to a certain height using a land model of teleoperated backhoe was carried out. In 2004, the author 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 $25.6\text{m}^2/\text{h}$. It is proved that the concept of the 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.

The transportation of heavy materials in water are done by crane vessels. But, it is very difficult that the crane operator confirms divers safety by watching. The technology which can do 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 operability of the joystick-type-interface that is newly proposed. The operability 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 interview with 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 underwater can be expected by the result of this research.

Key Words: underwater excavator, unmanned underwater construction, diver, teleoperation

* Researcher, Measurement and Control Technology Group, Construction and Control Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone: +81-46-844-5062 Fax: +81-46-844-0575 e-mail: hirabayashi@pari.go.jp

水中建設機械の遠隔作業支援システムに関する研究

平林 丈嗣*

要 旨

港湾施設はその大部分が水面下に構築されるため、その整備や点検・診断、維持・補修等、多くは水中での作業となるが、現在は相当程度を潜水士等の人力に依存している。このため水中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る。本研究では、視覚情報が得られない状態でも遠隔操作が可能な水中独自のインタフェースとして、作業機械から得られる接触情報を用いこれをバイラテラル操作系によりオペレータにフィードバックする遠隔操作手法を提案し、水中バックホウによる捨石荒均し作業を対象事例として研究を進め、室内模型実験、陸上実験を経て、平成 16 年度に実施工現場における実海域実験を行い、その施工精度や施工能力について検討を行った。

この実験の結果、無視界の遠隔操作において施工精度は $+17\text{cm} \pm 8\text{cm}$ 、施工能力は $25.6\text{m}^3/\text{h}$ であり、潜水士が搭乗する施工方法と同等の施工精度、施工能力を有していることが明らかとなった。この遠隔操作システムでは、作業中に生じる濁りにより視覚情報を得られないような状況においてもオペレータは作業を継続することができ、これは当初の目的であった視覚情報に頼らない遠隔操作を実現できたといえる。

さらに、点検診断・維持補修を目的とした重作業用ロボットアームとして利用することを提案しており、平成 18 年度よりマニピュレータ化に関する研究を行っている。マニピュレータとして活用するにはエンドエフェクタ座標を直線的に移動させる場面があると予想され、この問題に対し重力補償を用いることにより解決することとした。これはフロント部の重心を計算し、その重心位置により制御指令値に補償を加えるものである。実験の結果、水平、垂直の軌跡ではほぼすべてにおいて目標とした $\pm 50\text{mm}$ 以内に入っており、従来の比例制御と比較して目標追従が大幅に改善され、直線的な動作が可能となった。これにより建設機械側の操作追従性が向上されれば、遠隔操作における作業効率の向上が期待できる。

キーワード：水中バックホウ，無人水中施工，潜水士，遠隔操作

* 施工・制御技術部 計測・制御研究チーム研究官
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5062 Fax：046-844-0575 e-mail:hirabayashi@pari.go.jp

1. 目的と背景

1.1 現状の水中作業

大水深岸壁、廃棄物埋立護岸、海上空港の整備や点検・診断、維持・補修等は、今後ますますその要請が高まるものと考えられ、これらを安全かつ効率的に実施することが求められている。しかし、これらの施設の大部分が位置する水中部では、海上から直接的に構造物を見ながら作業することが困難だけでなく、TVカメラ等を用いて遠隔操作を行おうとしても濁りや浮遊物質による光の散乱によって対象物の視認が困難であるなど、陸上とは作業環境が大きく異なるため、作業の無人・遠隔操作は容易でない。このため、潜水士による作業に大きく依存しているのが現状であるが、水中作業は、視界の悪さや潮流などの海象条件によって、作業能率が低いだけでなく、船舶が多く航行する港内での作業であるなど、危険の察知や回避の困難性から安全性にも課題がある。また、水中での重量物の搬送作業は船上のクレーンから行われており、クレーンオペレータは潜水士の安全確認を目視により行うことができない。さらに、長時間の作業は水圧による肉体への負担が大きいため、その労働条件は陸上に比べて過酷である。図-1.1に潜水士による均し作業を、図-1.2にクレーン作業中の水中の様子を示す。



図-1.1 水中均し作業(佐伯建設工業広報ビデオより)

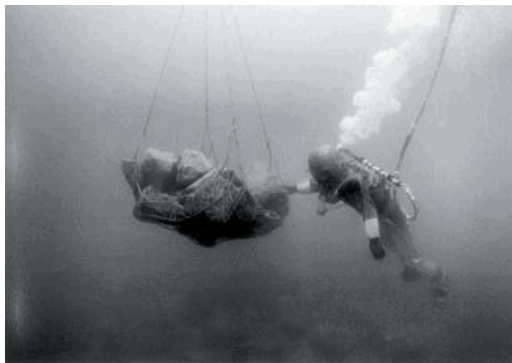


図-1.2 吊り荷の誘導(佐伯建設工業広報ビデオより)

1.2 水中作業の危険性

潜水士作業の安全性について調査を行った。表-1.1に旧運輸省が独自にデータベース化した直轄工事における潜水作業中の重大事故を示す。データベースに記録されている事故件数は552件で、うち海上事故件数は274件である。潜水中の事故は、昭和47年から平成12年までの27年間で38人が事故に遭い、17名が亡くなっている。また死亡でなくても減圧時の脊椎梗塞や潜水病等、運輸省の直轄工事だけで毎年約1名の潜水士が生命に関わる事故に遭遇している。

表-1.1 潜水士事故(旧運輸省データベースより)

経緯	被災部	被災の性質	休業日数	原因	作業	
47	胸部	その他		疾病	調査	
50	10年	窒息	死亡	送気異常	捨石及び均し	
52	10年	窒息	死亡	送気異常	機材等設置	
52	12年	窒息	死亡	潜水器具故障	捨石及び均し	
55		裂傷		はさまれ	捨石及び均し	
58	20年	窒息	死亡	送気異常	機材等設置	
59	09年	胸部	潜水病	8~15	潜水器具故障	調査
59	13年	頭部	潜水病	16~30	ホース	調査
59	18年	頭蓋部	骨折	8~15	激突	捨石及び均し
60	04年		窒息	死亡	送気異常	捨石及び均し
60	25年	指	切断	31~	はさまれ	調査
60	13年		窒息	死亡	ホース	捨石及び均し
62	30年		溺死	死亡	送気異常	調査
63	20年		溺死	死亡	ホース	捨石及び均し
2	30年	上肢部	減圧症		減圧	捨石及び均し
2	25年	指	切断	16~30	はさまれ	捨石及び均し
3	09年	指	切断	16~30	はさまれ	掘え付け
4	16年	肩、ひじ	関節傷害		減圧	調査
5	01年	手	創傷		接触	調査
5	16年	胸部等	内臓破裂	31~	接触	調査
5	05年	頸部等	骨折	31~	接触	調査
6	40年	頭部	窒息	4~7	送気異常	掘え付け
6	10年	胸部	肺臓破裂	死亡	送気異常	捨石及び均し
7	10年		溺死	死亡	送気異常	溶接
7	00年	頭部等	潜水病	8~15	送気異常	調査
7	01年		溺死	死亡	送気異常	溶接
8	32年		減圧症	16~30	減圧	調査
8	15年	上肢部等	切断	16~30	はさまれ	掘え付け
9	07年		窒息	死亡	潮流	捨石及び均し
9	24年		溺死	死亡	送気異常	掘え付け
10	03年		窒息	死亡	潜水器具故障	調査
11	30年		脊椎梗塞	31~	減圧	調査
11		頭蓋部	骨折	死亡	スクルー	調査
11	27年		潜水病		減圧	捨石及び均し
11	03年	手	裂傷	0~3	激突	捨石及び均し
12	15年		潜水病	0~3	減圧	捨石及び均し
12			潜水病	0~3	減圧	捨石及び均し
13	09年	胸部	内臓破裂	死亡	はさまれ	捨石及び均し

したがって、これらの状況を踏まえれば、水中作業を安全かつ効率的に行うことが可能な、無人・遠隔操作技術の実現が急がれる。

港湾工事での潜水士は作業船近傍、作業中の海面下、防波堤造成前の海域等での作業となり、ここでの事故は生命の危険に直接関わるものとなる。事故を防ぐには安全確保に十分すぎるほどの注意を払う必要があるため、労働安全衛生法により定められる潜水士免許の他に港湾潜水技術士資格といった潜水作業の安全を目的とした資格が必要であるなどの対応がとられている。

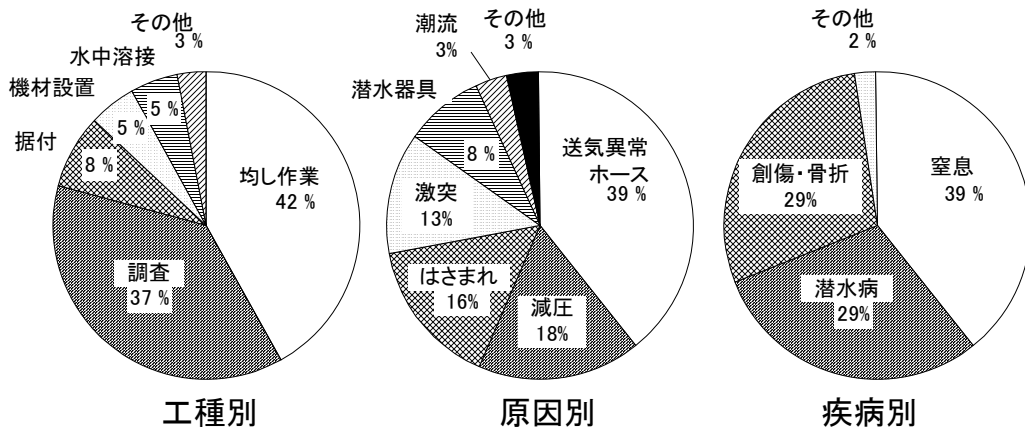


図-1.3 工種別，原因別，疾病別に見た潜水士事故の割合

しかし中央労働災害防止協会のとりまとめている労働災害統計によると、海岸・港湾工事中の事故は平成2年から平成9年において1,782名が被災し、そのうちおぼれによる被災者は17名であった。ただしおぼれには陸上作業員が誤って海に転落した場合も含まれており、また潜水士事故であってもおぼれ以外の事故である場合もありえるため、正確な潜水士の被災者数では無い。そこで旧運輸省の直轄工事に限定し事故事例を参照することにより、潜水士事故の傾向を検証する。図-1.3は工種別，原因別，疾病別に見た潜水士事故の割合である。

事故発生件数を工種別に見ると水中均し作業が最も多い。これは作業量が大きく潜水時間が長いことによると推測している。また輻輳する作業海域であるため送気ホースの挟まれや巻き込みといった事故が多く見受けられた。その他にも水中溶接の事例では船上に設置してあるエンジンの熱で送気ホースが焼けてしまったという事故も発生している。

原因別で見ても送気ホースに関する事故の割合が一番高い。事故原因として二番目に高い減圧時間に関する事故は、基本的に人為的なミスでしか発生しえないため潜水病への認識不足と分析できる。しかし潜水時間や深度によって減圧時間が変わってくるため、潜水作業を職業にして潜水病に関して知識のある人間でも事故を起こす可能性は存在する。特に均し作業など重労働の後では単純なミスを起こす可能性が高くなると考えられる。

疾病別に見ると窒息や潜水病といった陸上作業ではありえない事故が全体の約7割を占めており、水中という条件が事故の大きな要因となっている。また、窒息という事故は死亡に至らないまでも後遺症が残りやすいという事実も問題視すべき点である。

図-1.4は旧運輸省直轄港湾工事の全体事故被災者数における死亡者数の割合である。陸上と海上で分割して考

えるとそれぞれ10.1%と23.4%となり海上作業中での死亡率は2倍以上高い結果となった。

さらに海上工事での事故274件中の死亡事故割合を発生場所別に分類したグラフを図-1.5に示す。この図を見ると潜水作業中の被災者数に対する死亡事故の割合が44.7%と他の作業と比較して格段に高い。この結果は海中での作業の危険度の高さを示していると言える。

図-1.6は潜水経験年数に見た被災者の割合である。潜水経験年数別に被災者数を分類すると、経験年数に応じて被災者数が減少しているように見受けられる。しかし現場経験が20年以上のベテランが被災者数全体の30%を占めている点からわかるように事故は年齢と関係無く発生していると考えられ、事故の発生は経験不足が要因ではなく偶発的もしくはケアレスミスから発生するケースが多いのではないかと推測できる。

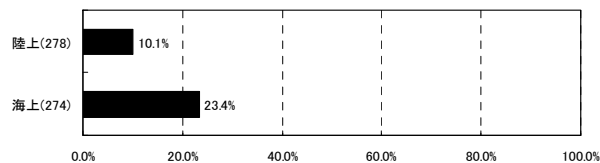


図-1.4 重大事故被災者における死亡者数の割合

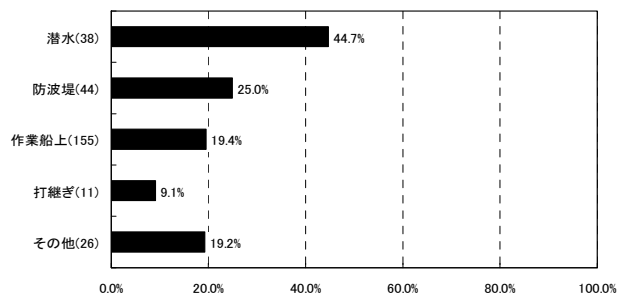


図-1.5 海上工事における災害場所別の死亡者数の割合

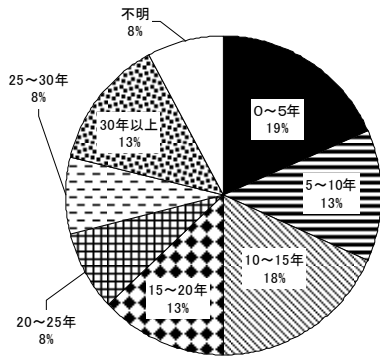


図-1.6 潜水経験年数による被災者数の割合

水中での施工は機械化が進んでいないため未だ人力施工が主流であり潜水士への負担が大きい。また視界の悪さや潮流などの海象条件は作業能率を大幅に低下させるだけでなく、危険の察知や回避といった安全性も低下させる。さらに長時間の作業は水圧による肉体への負担が大きいなど、その労働条件は陸上に比べて劣悪である¹⁾。こういった極限作業域における安全性の確保や労働の軽減のための機械化は以前より研究開発が行われてきたが、積極的に進められてきたのは火災現場や原子炉内等の人間が立ち入ることが不可能な場所が対象となっている。これは主に経済性の観点から実用化が難しいと考えられてきたためである。図-1.7に国立社会保障・人口問題研究所が発表している労働力人口の推移²⁾を載せた。このグラフでは55歳未満の労働力人口が今後減少を続け、2010年には労働力人口の4割以上が55歳以上になると予測している。この推移が直接潜水士の数に比例するとは言えないが、全体的な流れとして高齢化が進む事は避けられないと考えられる。このことから今後施工の効率化が求められると予想することができ、それに伴って機械化に対する要請も高くなると考えている。また、潜水士の負担を軽減する点においても海洋工事の機械化を推進すべきであり、同時に安全性の確保に関しても大幅な改善が期待できる。

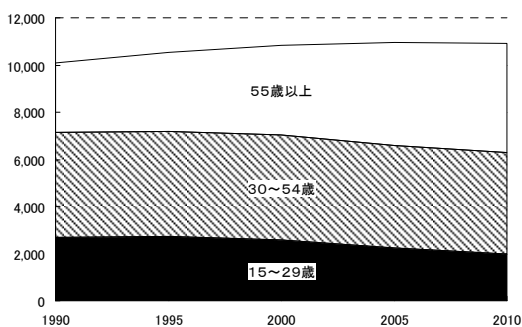


図-1.7 労働人口の推移

1.3 機械化が要望される工程

前述した水中作業の中で、最も重労働となるのが捨石荒均し作業である。

これは割石投入直後の状態では不陸が大きく、割石が山になった場所から投入が不足した場所への割石の移動を行うなど、他の作業に比べて肉体的負担が大きいためである。この作業は潜水士が搭乗し操作を行う水中バックホウの主な作業である。

比較的作業内容が似ている本均し作業は基本的にその場で回転させる、径の小さな目潰し石を間隙に詰めるなどの作業であるため、荒均しと比較して肉体的負担は少ないと言える。

1.4 機械化が必要となる工程

将来機械化は必要となる工種として、被服石の設置作業が予想される。

これは重量物の移設に船上からのクレーンを用いており、波浪による船体の動揺が荷の振れに直結する点と、荷の位置を目視できないため潜水士の音声指示に依存しており、作業性が低くなるためである。またクレーンオペレータから潜水士の位置を目視により行うことができないため、安全確保の問題も存在する。さらに将来の海洋開発を考えたとき、海底に投入された建設資材などの搬送や組立て作業が想定される。

このように海中での重量物把持や運搬作業について、機械化の要望が高くなるものと考えられる。

1.5 水中における機械化の現状

近年における水中施工の機械化の事例として潜水士が搭乗して操作する水中バックホウの実用化(図-1.8, 図-1.9)が挙げられる^{3,4)}。水中バックホウは平成6年に実海域実験においてその性能が実証されてから、港湾構造物の施工において活用されている。対象としているのは主に捨石荒均しであり、平成7年に沖縄開発庁沖縄総合事務局により行われた平良港パイロット工事の実績では、管理基準±30cmの捨石荒均しでの施工能力が35.4m²/hであった。同様の条件下において在来の作業方法と比較すれば、潜水士船1隻あたりの標準均し能力は4.3m²/hであることから、水中バックホウの施工能力は潜水士の約8倍であり、良好な能力といえる⁵⁾。なお、平良港は特に透明度が高いことに留意する必要がある。図-1.10に平良港パイロット事業における施工場所を、図-1.11に荒均し出来形を示す。

水中バックホウによる均し作業の特徴として、クローラやバケット背面による転圧作業が可能となる点があげ

られる。この作業は人力による施工では不可能である。また従来捨石投入時に不陸が発生した場合はガット船等のグラブで山崩しを行っていたが、水中バックホウにより石の掘削や移動が容易に行えることから均し作業前の不陸修正にも有効であると言える。また、潮流に対する能力は潜水士の施工限界が1ノットであったのに対し、水中バックホウでは2.2ノットでの施工も可能であった。このように工事の休止率の高い港湾に対しても有効であると言える。



図-1.8 水中バックホウによる均し作業
(佐伯建設工業株式会社広報ビデオより)



図-1.9 潜水士による搭乗操作
(佐伯建設工業株式会社広報ビデオより)

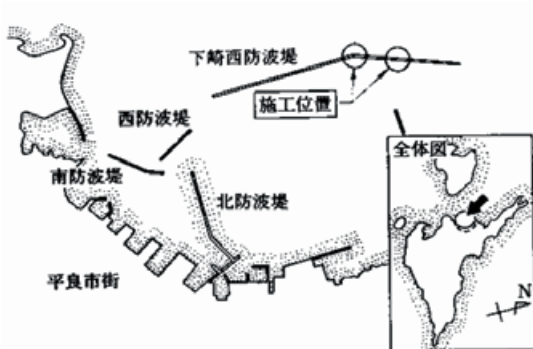


図-1.10 パイロット事業施工位置図

現在実用化されている一般的な水中バックホウの仕様を表-1.2に示す。この水中バックホウは前述した平良港でのパイロット事業のために製造されたもので、バケット容量0.55m³級のバックホウをベースとして水中作業用に改造したものである。水中では内燃機関など動力源の使用が困難であるため、動力源を支援船上に設置し、油圧ホースによって動作に必要な動力を供給している。この方式はD-H(DIESEL-HYDRAULIC)方式と呼ばれている。機体の構造が単純であるが、油圧ホース長による圧力損失やホース重量が重くなる問題もあり、近年では電動油圧ポンプを機体に搭載し動力として電圧を供給するE-H(ELECTRO-HYDRAULIC)方式も存在している。

フロント軸等の動作機構については陸上機と同様に油圧シリンダを用いており、大幅な改造は必要としていない。ただし作動油に関しては環境を考慮し生分解性のものを利用している。

ただし、この水中バックホウも操縦席に潜水士が乗り操縦することによって作業が行われている。したがって機械力が導入されたといっても完全に自動化されているわけではない⁶⁾。

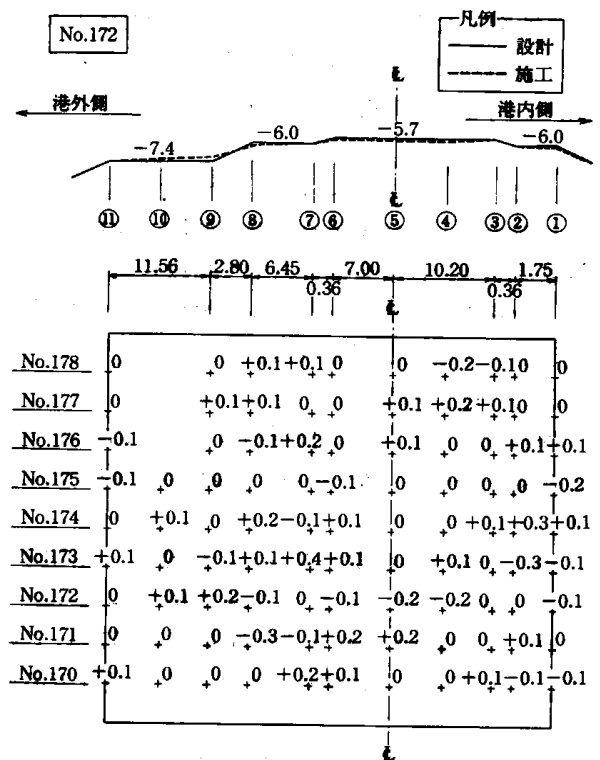


図-1.11 荒均し出来形 (単位 : m)

表-1.2 水中バックホウ仕様

駆動方式	エンジン・油圧方式
動力	水冷ディーゼル方式
出力	62.3kW (85PS)
標準バケット	0.55m ³
主要本体寸法 (m)	全長: 7.70 幅: 2.49 高さ: 2.85
機体重量 (気中/水中)	13.2t / 9.0t
最大作業水深	-60m
最大作業半径	8.27m
水中登坂能力	1:2 (約26度)
付属装備品	緊急送気器具

1.6 研究の目的

水中での作業は機械化が進んでおらず、ほとんどの工種を潜水士の手作業に依存している。さらに、潜水時間管理ミスによる潜水病、潜水器具の故障、濁りによる危険認識の遅れなど、その作業環境は陸上施工と比較して劣悪である。

このような問題に対し、近年になり水中バックホウが実用化された。これにより、特に捨石マウンドの荒均し作業において潜水士の肉体的労働環境が改善されつつある。しかし潜水士が搭乗し操作する必要があり、潜水病や潜水器具の故障などに対する安全性については改善したとは言えない。さらに、手作業と比較して潜水士と作業対象までの距離が遠くなることや、作業中に発生する濁りが多くなるなど作業対象の認識に問題があり、全国的な普及には至っていない。

本研究の目的は、濁りに対応した外界認識技術を有するバックホウの遠隔操作システムを構築し、安全で効率的な水中作業を実現するものである。

2章では建設機械に関連した遠隔操作技術について調査した。陸上における遠隔操作施工は災害復旧などの実践的な開発により実用化の域に達しているが、外界認識は視覚情報に依存している。水中バックホウの遠隔操作化は数例あり、基本的には超音波による形状認識を行っている。しかしリアルタイム性や測量精度などの問題から、施工精度の求められる均し作業には適応できていない。

3章では2章で明らかとなった技術課題から水中遠隔操作における技術仕様を提案する。また本研究の対象とする作業を現在水中バックホウで行われているマウンド荒均し作業の遠隔操作化とした。さらに将来的な海洋開発に必要な技術として水中での重量物運搬に注目し、バックホウをマニピュレータとして利用することを提案した。

4章では提案した技術仕様に基づき、触像を用いた遠隔

操作システムの研究について述べる。濁水中など視覚情報が期待できない状況下において接触情報は有効であると考えられる。またロボットアームなどの遠隔操作では、作業中の負荷を力覚として呈示することで状況を認識するものも存在する。本研究では同構造型マスタスレイブによるバイラテラル制御を水中バックホウの遠隔操作において適応した。またバケットが接触した座標を蓄積し、コンピュータグラフィクスにより描画することで、マウンド形状の呈示を行う外界認識手法を提案した。それぞれの要素技術について室内実験、陸上実験による要素技術の統合を行い、さらに実海域実験により有効性を確認した。

5章では海洋開発における水中作業に対し、水中バックホウをマニピュレータとして利用するための研究について述べる。対象物が人工構造物であり、接触による形状認識は破壊などの恐れがある。また把持には機体と対象物との位置関係の呈示が必要となる。そこでマーカー認識により対象物の位置姿勢を計測し、コンピュータグラフィクスに位置関係を描画することで把持作業を行う。実験はH鋼を対象に遠隔操作による把持作業を行い、その把持の精度を検証する。

6章ではそれぞれの実験の結果を鑑み、様々な作業に対応するための残された技術課題、本研究成果の展望について述べる。

2. 水中バックホウ遠隔操作の技術課題

2.1 陸上土木作業の遠隔操作技術

陸上での無人化施工技術は既に実用段階に入っている⁷⁾。これは1991年6月の雲仙普賢岳噴火災害や2000年3月の有珠山噴火災害など、実施工を伴った長年の技術開発の成果であるといえる⁸⁻¹¹⁾。本研究を開始するにあたり、陸上での遠隔操作技術の現状と、実際に遠隔操作施工を行っている施工現場の状況を把握しておく必要があると考え、有珠山での遠隔操作施工現場の現地調査と遠隔操作建設機械オペレータのヒアリング調査を行った。

2000年12月に行った現地調査の時期は、除石工や運搬作業を終えコンクリートブロックの設置により擁壁や導流堤を施工している段階であった。コンクリートブロックの運搬は遠隔操作装置を取り付けた特装運搬車により行い、操作は立入禁止区域外の安全な場所に設置された遠隔操作室において行う。この遠隔操作室は10tトラックに架装されており、万が一の場合には遠隔操作室ごと避難できるようになっている。コンクリートブロックは中央に穴が開いており、バケットの代わりに特殊な把持装

置を用いることで玉掛け玉外しを行う。コンクリートブロックの設置位置の認識はTVカメラにより行われており、バックホウ運転席上部からの映像で左右位置を合わせ、側面に配置した移動カメラ車により奥行き位置を調整している。また、バックホウや特装運搬車の位置は、遠隔操作室付近に配置された高所作業車からの鳥瞰図映像により把握する。これら無人機械の操作指令はすべて無線により送信されており、操作入力レバーは市販のものを利用して、図-2.1から図-2.3に陸上遠隔操作の状況を示す。



図-2.1 無人移動カメラ車



図-2.2 遠隔作業室及び高所カメラ



図-2.3 オペレータ作業状況

2.2 遠隔操作時の作業精度

有珠山でのコンクリートブロック導流堤設置の事例では、ブロック中央に穴が開いており、バケットの代わりに特殊な把持装置を用いることで玉掛け玉外しを行っている。コンクリートブロックの設置位置の認識はTVカメラにより行われており、バックホウ運転席上部からの映像で左右位置を合わせ、側面に配置した移動カメラ車により奥行き位置を調整している。

また、クローダンプの上部にカメラを設置した移動カメラ車のほか、遠隔操作型バックホウのバケット背面にカメラを搭載した車両（図-2.4）が運用されていた。この車両により、視点高さの変更が容易となり、オペレータの望む始点からの映像が取得できる。

このように複数のカメラにより操作に必要な映像情報を与えることで、コンクリートブロック設置作業に十分な精度を実現できている。図-2.5にコンクリートブロックの設置状況を示す。



図-2.4 バケット背面にカメラを搭載した移動カメラ車



図-2.5 遠隔操作による導流堤ブロック設置状況

2.3 遠隔操作時の作業効率低下

さらに遠隔操作時の問題点についてヒアリングを行った。当初、TVカメラによる遠近感の喪失から施工能力が大幅に低下するものと考えていたが、土砂の掘削・積込

みなどの単純作業では搭乗操作の8割以上とのことであった。コンクリートブロック設置では運転席カメラ映像での位置決めの後、側面からの映像を見て前後の位置を決めるため、搭乗操作の5割以下との回答を得た。ただし、さらに精度を求める作業はカメラ映像だけでは困難だろうとの回答もあり、作業内容によりその施工能力は大幅に変化する可能性がある。次に、視覚以外の情報が必要であるかを調査したところ、有珠山災害復旧現場においても初期段階は作業音を伝送したが、特に必要としなかったため現在では利用していないとのことであった。また作業中の手応えや建設機械の振動の情報についても調査したが、これらも特に必要としていないとの意見が多く、その理由として映像のブレなどでだいたいの状況は把握できているとのことであった。

このように陸上遠隔操作では操作状況の把握を映像からの情報に頼っており、逆に映像以外の情報は混乱を招くと考えられていた。遠隔操作では運転席からの映像と側面からの映像でほぼすべての作業を行っており、今後の遠隔操作の技術開発はデータの伝送距離や映像情報の明瞭化に進むものと考えられる¹²⁻¹⁴⁾。

さらに建設機械のロボット化を目指し、IT技術を活用し計測データや設計データとの連携を強化したシステム¹⁵⁻¹⁶⁾や、地形状況から掘削軌跡などを生成し自動制御を行う無人化施工の研究¹⁷⁻²¹⁾も進められている。

2.4 水中バックホウの遠隔操作技術

水中作業の安全性の問題から、水中バックホウに関しても遠隔操作に関する技術開発が成されている。現在までに確認できている水中バックホウの遠隔操作の試みとして、以下のものがある。

- ① 佐伯建設工業株式会社の技術開発の事例
- ② 国土交通省関東地方整備局において行われた水中施工ロボット技術開発の事例
- ③ 東亜建設工業株式会社の技術開発の事例

このうち、①佐伯建設工業株式会社の事例は、陸上で遠隔操作と同様にカメラ映像を用いた遠隔操作を社内でも実験的に行ったものであるが、鳥瞰図の映像、側面からの映像が無いことから、立体感を得ることができず、マウンド均しといった精度を求められる作業は困難であった。

次に、②国土交通省関東地方整備局が平成12年度に行った水中施工ロボット技術開発の事例²²⁾は、常陸那珂港のケーソンマウンドを実験現場とし、深淺測量結果を地形画面として表示して、オペレータはこの画面を見ながら水中バックホウを遠隔操作するものであった。しかし、

地形画面の更新がされないため、作業によるマウンドの変化を把握することが困難で、作業中の判断の大部分をオペレータの勘に依存していたため、施工能力、施工精度ともに潜水士搭乗による水中バックホウより下回る結果となり、実用化に至っていない。図-2.6に地形表示画面を示す。

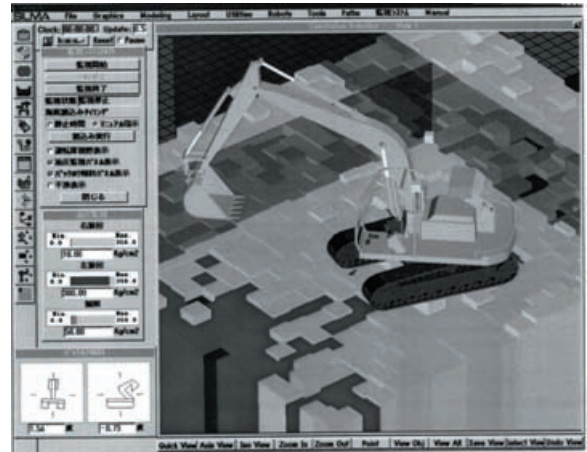


図-2.6 による地形表示画面

最後に、③東亜建設工業株式会社の事例は、バックホウ前面にカラーイメージングソナーを2器配置して地形の断面表示を行うとともに、マルチナロービームにより地形認識のリアルタイム性を向上させたものである。さらに、運転席にモーションベースを利用し、バックホウが傾斜すると運転席も連動して傾斜することで、機体の姿勢や作業状況が直感的に認識できるようになっている。水中バックホウでの無人化施工の可能性を示した興味深い事例であるが、作業条件は比較的単純であり、また、必ずしも高い精度を要求されていない作業であった。図-2.7にイエローマジック7号を示す。



図-2.7 イエローマジック7号全景

2.5 水中に適応した場合の技術課題

水中用作業機械の開発条件として、電気電子機器の防水、内燃機関の利用不可などの事情に加えて、視界が不良な場合が一般的であるため操作状況の認識を映像情報に依存できない問題がある。例えば国際海上コンテナターミナルを有する中核国際港湾として現在整備を進めている茨城県の常陸那珂港では、水中透視度がおおむね0.3～0.5m、良くて1.2m程度であり、この条件では光学式カメラによる地形状況把握は不可能である。さらに水中では赤外線やレーザー等の光波の減衰が著しいため、陸上で用いられる光波式測量機器等の使用が困難である。さらに水中では電波も減衰するため、陸上で用いられている計測センサ類のほとんどが利用できない。

このため水中では超音波を用いた測量、位置計測等が行われるが²³⁾、光波や電波と比較して波長が長く精度に限界がある²⁴⁾。

以上のことから、陸上作業であれば簡単な遠隔操作であっても水中では困難な場合が多く、未だマウンド均し作業の遠隔操作は実現していない。

2.6 技術課題の整理

水中作業の遠隔操作にあたっての技術課題は次のようにまとめられる。

(1) 実用化への容易さ

本研究は水中作業の安全性・効率性を目的としており、その成果は現場へフィードバックされることが重要である。現場への適応のためには、大規模な設備や莫大な先行投資を必要としないことが望まれる。現在の水中作業では、潜水士が搭乗する水中バックホウが実用化され、従来の人力作業から機械化作業へと前進がみられる。潜水士が搭乗する必要はあるものの、佐伯建設工業株式会社所有の水中バックホウでは平成6年から平成11年3月までの約5年間の総均し面積は78,655㎡となり、年間約300mの防波堤延長を水中バックホウで施工したこととなる。このうち沖縄県の平良港と石垣港で行った事業がほとんどを占めており、透視度の高い海域での施工であれば事業として成り立っており、現在では約20台の水中バックホウが国内の港湾工事において稼働されている。本研究では既存の水中バックホウをベースに市販のセンサや陸上施工機械で用いられている電磁弁の設置など小規模な改造を加えることで、現場利用の容易さが図られる。

(2) 汎用性

現在の搭乗型水中バックホウは均し作業を主な作業対

象としているが、バックホウはエンドエフェクタであるアタッチメントを交換することで様々な工種に対応できる。例えば浚渫ドラグヘッドによる浚渫作業やウォータージェクタによる堆積土の除去など、従来潜水士の手作業では行うことが不可能であった作業を実現している。

つまり水中バックホウの機構、油圧弁やシリンダストロークセンサなどを基本ハードとし、比較的脱着の容易なエンドエフェクタとソフトウェアのみの変更で均し作業以外の動作にも適応可能なシステムである必要がある。

(3) 外界認識

建設機械の操作は、一般に目視によって操作が行われるため、海域の透明度や作業中の土砂の舞い上がりによる濁りなど、水中における視界の良否が作業性に直接的に影響する。これは陸上建設での遠隔操作は移動カメラ車や高所カメラにより様々な視覚情報を得て操作を行うが、港湾域では水中透明度が2m程度であるため、視覚情報に全面的に依存した方式では作業状況の認識が困難なためである。さらに水中では電波、光波の減衰が著しく、陸上で用いられるGPSや光波測量機器等の使用が困難であるため、海底地盤や海中構造物の測量、作業機械の位置計測等においても独自の技術を必要とする。

(4) 均し作業における作業効率

水中作業の遠隔操作システムの研究開発にあたっては、実用性の観点から従来技術と同程度の作業能力を有することが求められる。つまり、水中バックホウを遠隔操作型に改造する費用を念頭に置いた実用性の観点から、作業能力の目標値を考察する必要がある。

ここで、潜水士搭乗型（従来技術）の水中バックホウの作業性について考えると、潜水士が目視によって作業を行うため、透明度が低い海域（作業中の土砂の舞い上がりを含む）では、作業効率も低くなる。さらに水深によって1日の潜水時間が定められており、作業水深によっては潜水士の交代が必要となる。作業水深による潜水士のべ人数の増加は通常的人力作業の場合に大きく影響するため、現在、潜水士搭乗型のバックホウは、透明度が高く、比較的水深の深い場所で利用されている。これに対して、遠隔操作型水中バックホウの作業効率は透明度に依存せず、潜水士の交代の必要がない。

そこで、水深-15m以上、透明度4m以上の作業海域において、遠隔操作型への改造（2,000万円と仮定）に伴う損料を加算計上しても、潜水士搭乗型と同等のコストで施工が可能な作業能力を研究開発にあたっての目標値とし、遠隔操作型の水中バックホウの施工能力の目標値を

26.4m²/hとした。

(5) 把持作業における操作精度

クレーン作業の場合は適応する積算根拠が存在しないためコスト的な比較が困難である。また、バックホウで重量物を搬送するにはフォークグラブによる把持動作が基本となり、対象物の任意の位置を把持し、エンドエフェクタであるフォークグラブを任意の姿勢に保持する必要がある。これは対象が人工構造物の場合に、把持や他の構造物との接触により破壊される可能性があるためである。本研究では疲労度、位置精度、対象物の姿勢について評価を行う。

3. 水中建設機械の遠隔操作を実現する技術仕様

3.1 本研究が対象とする遠隔操作技術

本研究では、現在実用化が進む水中バックホウを遠隔操作化し、安全で効率的な水中作業の実現を目指すものである²⁵⁾。対象となる作業を割石などの自然物と、建設部材などの人工構造物に分類し、その代表的な作業例として、捨石荒均し作業、及び、フォークグラブアタッチメントによるハンドリング作業について作業性に関する実験を行う。

3.2 水中遠隔操作のためのシステム要件

水中での作業では濁水により対象物の認識が困難となる。また精度の高い遠隔操作を行うには、エンドエフェクタの位置が重要であり、容易な操作入力系と精度の高い機体制御が必要である。

つまり外界認識エンジン、操作インタフェース、建設機械制御がシステム要件として挙げることができる。

- 外界認識エンジン
位置情報や内界センサなどの局所センサ情報を統合し提示する。
- 操作インタフェース
エンドエフェクタの姿勢を直感的に入力する。
- 建設機械制御
操作入力や負荷に対応し、エンドエフェクタの位置姿勢を高精度に制御する。

これら三要件を対象や作業条件に合わせて満足させることで、水中での遠隔操作が実現できると考えられる。

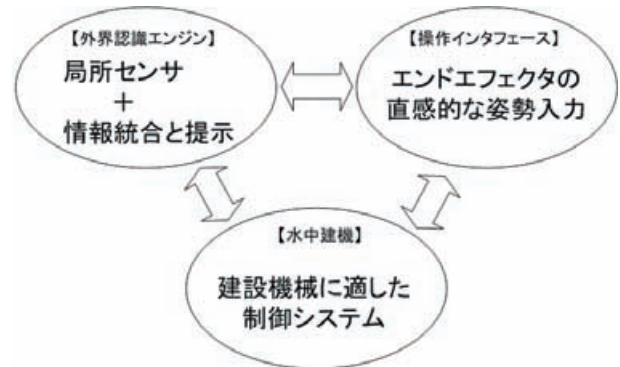


図-3.1 水中遠隔操作のためのシステム要件

3.3 技術仕様

(1) 自然物を対象とする場合の技術仕様

マウンド荒均し作業では、掘削による割石移動やバケット背面などによる叩き動作が有効であり、陸上の土砂掘削や均し動作と同様の作業内容となるものと考えられる。そのためエンドエフェクタの形状は一般的なバケットとし、そのバケット姿勢や位置を遠隔操作により制御することが条件となる。さらに掘削時には抵抗が少なくなるようにバケットの角度を制御し、叩き動作や均し動作などバケット背面を利用する場合には、バケット背面が水平になるよう制御する必要がある。つまり地面に対するバケットの姿勢をブーム角度、アーム角度に影響されずに操作入力できることが有効であると考えられる。さらにバックホウの関節形状と油圧シリンダの関係を考えると、ブームとアームの角度が直交する付近で最も掘削力が発揮されるため、バックホウの関節姿勢を直感的に認識できることが操作効率の向上に繋がるものと考えられる。そのため操作入力装置として同構造マスタスレイブ機構が有効であるものと考えられる²⁶⁻²⁸⁾。

また水中における独自の問題点として、掘削や均し作業により濁りが発生し視覚が遮られるという問題がある。また港湾区域では常時透明度が低い場合が多く、陸上遠隔操作のようなカメラ映像を利用できない。このような問題に対して接触情報の利用が有効²⁹⁾であると考えられる。つまりバケットを接触端子とし接触時の座標からマウンド形状を構築していくことで、視覚に依存しない作業状況の認識³⁰⁾が可能となる。バケットの場合、接触面が大きい複雑な形状は把握できないが、対象作業が平面均しであり、平面であるか否かの判別ができれば良いと言える。

さらに作業中に受ける負荷の変化を呈示すれば接触の有無が直感的に認識できる^{31, 32)}ため、特にバケット背面を押し付けながら移動させる均し動作に有効な情報である

と言える。自然物を対象とする場合の作業イメージ図を
 図-3.2に示す。

自然物を対象とする場合の技術仕様をまとめると、以

下の技術を用いた遠隔操作が有効であると考えられる。
 なお、以下の内容については4章マウンド均し作業の遠隔
 操作に関する研究において述べる。

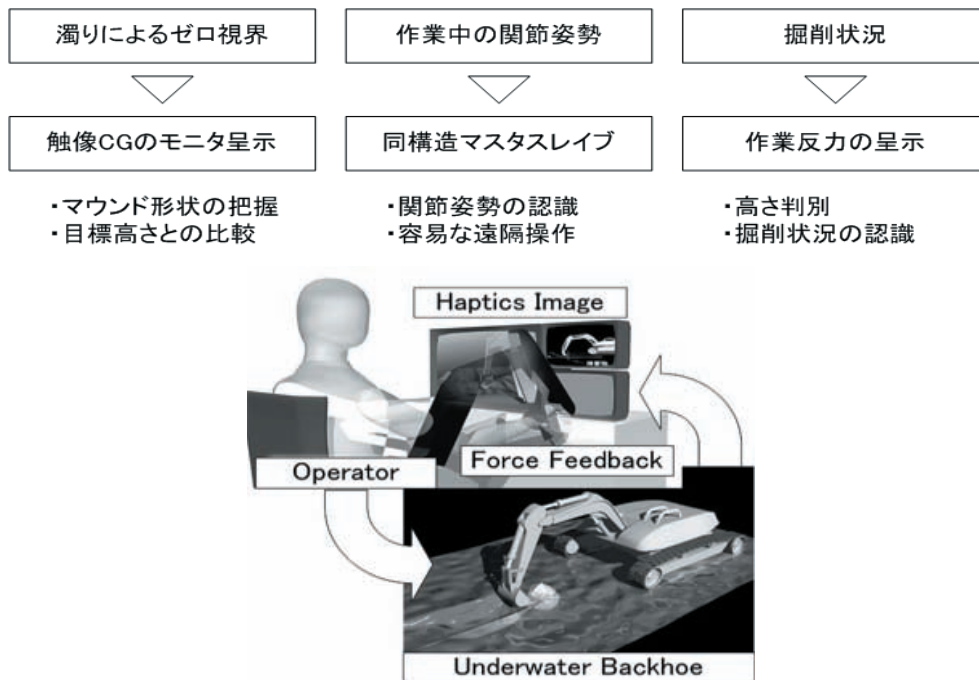


図-3.2 自然物を対象とする場合の作業イメージ

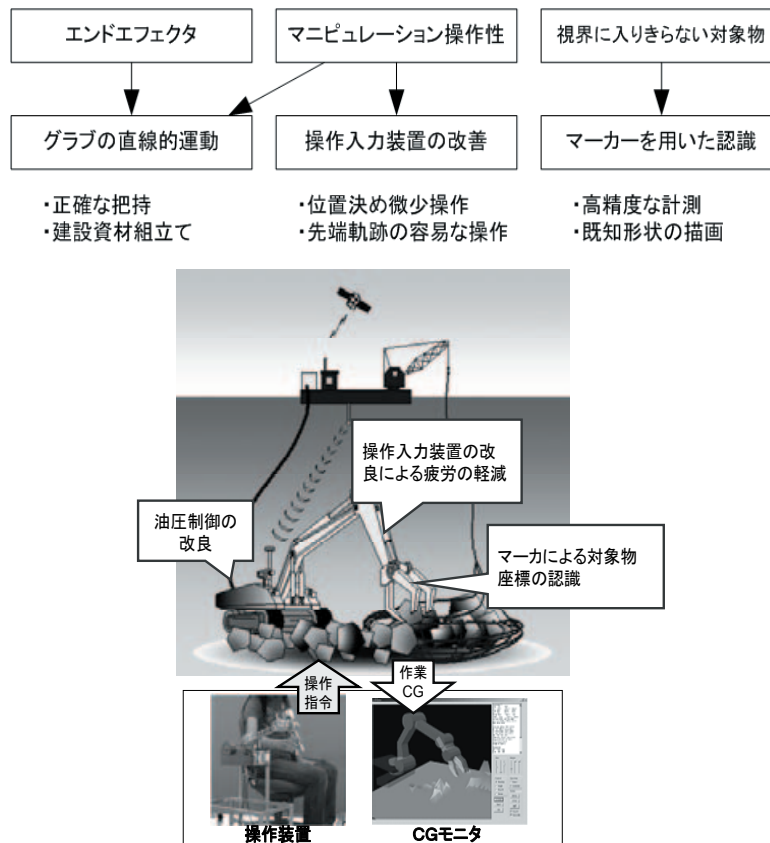


図-3.3 人工構造物を対象とする場合の作業イメージ

(2)人工構造物を対象とする場合の技術仕様

重量物の把持運搬などハンドリング作業は水中でのクレーン作業の代替となり、安全性向上のほか今後の大水深施工において有効となる手法であると考えられる。

しかしその作業対象は主に人工構造物となり、前述の接触による形状の認識では対象物が破壊される恐れや、荷が積まれた場合では崩落することが考えられるため、触像以外の濁水中での認識方法を考える必要がある。ここで対象物が人工構造物であることを考えると、形状が既知であることが多い、台船上から投入する場合マーカを貼付することが容易という特徴がある。既に設置された水中構造物にマーカを貼付する作業は危険作業や重労働とはならないという点から、マーカから対象物の形状や座標を認識する手法が有効であると考えられる。また、作業中に発生する濁りについても均し作業のような土砂を巻き上げるような作業ではないため、常に約2m程度の透明度が確保されているという条件とすれば、水中カメラによる画像解析が可能である。そこで人工構造物の認識にARToolKit³³⁾を用いることとした。

操作系に関しては前述の力覚呈示が有効な情報とならず、また掘削動作と比較して把持作業中の負荷は一定となり姿勢により操作効率に変化しにくいと考えられるため、同構造型マスタスレイブである必要が無くなる。把持作業に必要な入力項目はエンドエフェクタの位置や姿勢のほか、フォーク開閉やグラブの回転などエンドエフェクタの操作が追加される。さらに長時間の作業を行うことを考えると、操作による疲労は減少させる必要がある。そこで操作入力装置としてレバーを横置きにした形状とし、エンドエフェクタの座標を速度指示する方式が良いと考えられる。

また乱積みされた対象物の把持ではエンドエフェクタと対象物のアプローチ角度が重要となる。一般的なバックホウでは、油圧発生源が一つで複数のシリンダを同時に駆動させる構造となる。このような場合、負荷が少ない関節が先に動くため先端座標を直線的に移動させることが困難であり、バックホウ先端座標の追従性を向上させる必要がある。またバックホウのシリンダ制御に利用される油圧弁はスプール型の方向切替え弁であり、この方向切替え弁を比例電磁弁により制御されたパイロット油圧系により駆動する方式である。新たに機体を製作する場合、制御特性に優れた流量制御弁を搭載することは可能と考えられるが、既存の機体を利用する場合には大掛かりな改造が必要となり、信頼性やコスト的な点を考慮すると現実的とは言えない。また油圧弁は物理的に弁を開閉³⁴⁾するため、その特性は経年変化するものと考えら

れる。変化した特性をを検査するためには建設機械製造元ではなく油圧弁の製造元に依頼することとなるが、建設機械を分解し検査中は利用休止となることは現場利用を考えると好ましくない。そこでバックホウフロント部（ブーム・アーム・バケット）の重心位置と実際にブームシリンダが動き始める制御指令値をテーブルとして持ち、姿勢に応じて補正する方式を利用する。また先端座標の誤差を監視し誤差の少ない関節のシリンダ弁を絞ることで、作動油の流量を遅れているシリンダに供給することとした。

人工構造物を対象とする場合の技術仕様をまとめると、以下の技術を用いた遠隔操作が有効であると考えられる。以下の内容については5章水中マニピュレータに関する研究において述べる。

3.4 研究の目標

(1)目標とする作業（自然物を対象とした場合）

自然物を対象とした場合の作業を、防波堤設置工事におけるマウンド均し作業とした。これは水中工事の中で潜水士の肉体的負担が大きく、また今後も防波堤延長工事が継続して行われることから作業量も継続すると考えられるためである。さらに沖縄など透明度の高い海域では潜水士が水中バックホウに搭乗して均し作業を行っており、実績もあることから実現可能性が高いと言える。この水中バックホウによる施工技術を全国的に普及させることにより、安全で効率的な水中作業の実現を目指すものである。

(2)目標とする作業（人工構造物を対象とした場合）

人工構造物を対象とした場合の作業目標は建設部材のハンドリング作業とする。これは被覆ブロックの位置決め作業以外に、今後の海洋開発を想定し水中バックホウをハンドリングマニピュレータとして利用する場合の基本的な技術となる。

作業実験では、海上の台船からH鋼などの部材が投入された場合に海底に乱積みされることを想定し、傾斜した対象物を把持し、任意の姿勢で移動させる動作を行なうこととした。

3.5 研究フロー

図-3.4に本研究におけるフロー図を示す。

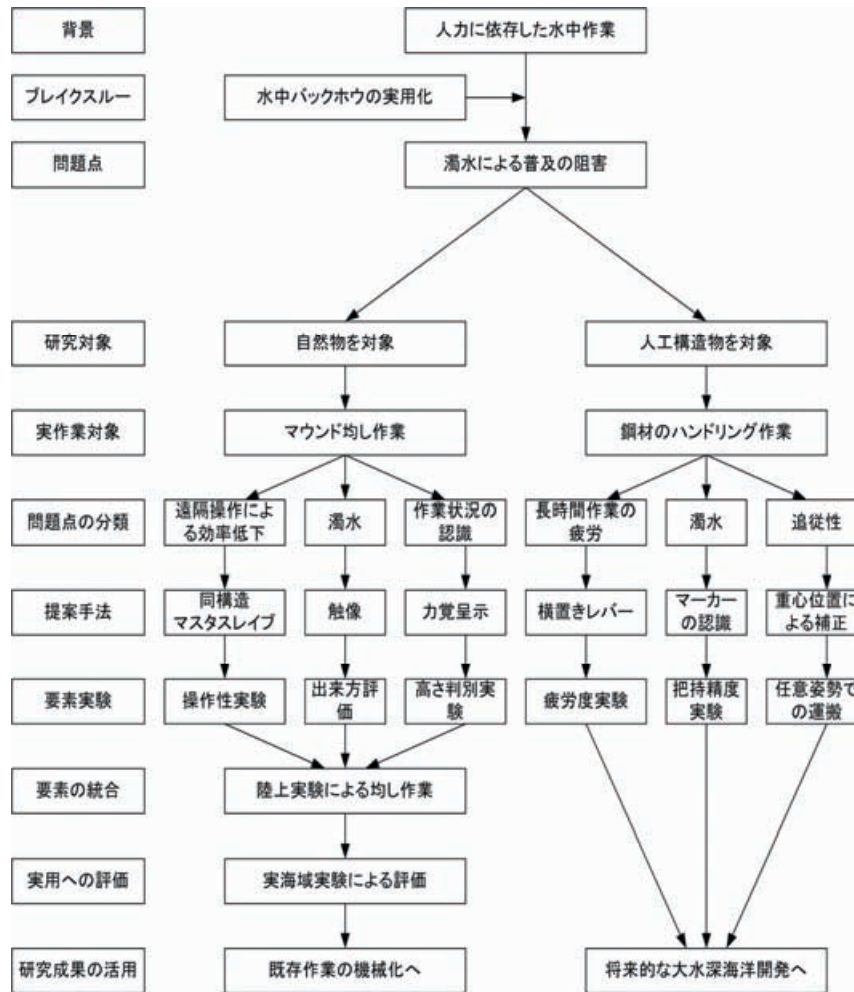


図-3.4 研究フロー図

4. マウンド均し作業の遠隔操作に関する研究

4.1 要素技術の検討

有珠山でのオペレータのヒアリングでは映像の振れで掘削等の作業状況を認識しているとの結果を得ており、映像情報を利用できない濁水中において何かしらの掘削状況の呈示は必要である。ここでロボットアームによる作業効率を向上させるには反力をオペレータにフィードバックするバイラテラル制御が有効であると言われており^{35, 36)}、この制御は水中バックホウの遠隔操作でも有効であると考えられる。

またバックホウは掘削や積込み作業を目的とした作業機械であり、その可動範囲は狭いため効率の高い作業のためには関節姿勢の把握が常に必要となる。前述の有珠山での災害復旧現場ではバックホウの関節角度を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することが予想される。

こうした点に着目して、TVカメラ等の直接的な視覚情報に拠らずに、オペレータが水中作業の状況を直感的に認識できる手法を開発するという観点から、次のような遠隔操作手法の提案を行う。

- 作業機械から得られる接触情報（接触時に作用する反力、接触点の位置等）を活用する。水中バックホウの遠隔操作の場合について具体例を挙げれば、バケット部に圧力センサを設置し、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する。その情報をオペレータが理解しやすいようにフィードバックすれば、作業状況に関するオペレータの認識力が高まる。
- オペレータが、作業機械からフィードバックされる接触情報を直感的に理解できるよう、作業機械と相

似形の入力操作系にする。水中バックホウの場合で具体例を挙げれば、オペレータが手招きするように操作端を動かせば、その形どおりバックホウのバケットが石をすくう動きをする機構とし、さらに、マウンド石を動かそうとしてバケットに負荷がかかる状態になれば、オペレータの手の動きにも負荷がかかる機構を導入する。こうした機構にすれば、作業機械の動きをオペレータは“手応え”として直感的に理解できる。

- 上述したフィードバック機構により作業機械と操作端とを制御するにはバイラテラル制御方式が適する。
- 接触情報は、対象物の形状認識にも活用される。水中バックホウの場合で具体例を挙げれば、どの姿勢でバケットに反力が作用したかといった履歴を蓄積してCG描画することによって、オペレータは、均し作業によって整形されていくマウンド形状を知ることができる。これにより、オペレータは均し作業中の地形画面を見ながら、既述した操作の“手応え”を感じることで、TVカメラによる視覚情報がなくても水中作業の状況がリアリティをもって認識される。

(1) 力呈示による掘削状況の把握

バックホウの掘削動作時にアームの引き込み速度が遅くなった場合、オペレータは過大な負荷と認識し、ブームを上げて掘削深さを浅くする。このようにバケットにかかる負荷に応じて各シリンダの操作比率を変更する必要がある。また表面を平らに整地する均し動作においても、オペレータはバケット背面を常に接地させ滑らせるような動作を行っている。このようにバックホウの操作には負荷の情報が重要であると言える。

そこでバケットにかかる負荷を計測し、反力としてオペレータにフィードバックするバイラテラル制御を水中バックホウの遠隔操作に適応する^{37,38)}。

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、作業効率の向上が期待できる。

(2) 相似形による作業効率・操作精度の向上

水中バックホウと相似の関係を持つ同構造型マスタスレイブを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できる。つまり可動範囲の狭いバックホウの遠隔操作において、操作装置の姿勢が水中バックホウの機体姿勢となるため、作業効率の高い関節角度や姿勢を直感的に把握でき、エンドエフェクタであるバケ

ットを高い効率で操作することが可能となる。

さらに負荷があった場合に入力に対してバックホウが追従できず相似の関係が崩れてしまう問題に対しては、モニタに入力姿勢・機体姿勢を重畳表示することで解決する。重畳表示にすることで、バケットがどの方向に進むのかが予測しやすくなり、均し作業に重要な水平引き動作の精度が向上するものと考えられる³⁹⁾。

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、作業精度の向上を目指す。

(3) 触像の視覚化による作業情報呈示

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ックス(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^{40,41)}。

均し作業には目標となる高さを示すための基準が必要となる。通常の潜水士作業では、目標高さから30cm程度高い位置に丁張りと呼ばれる水糸を張る作業が必要であった。本システムのCGには現状のマウンド形状のほか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ており、丁張り作業を省略できると予想される。

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。

4.2 センサ系の機構

(1) 水中作業遠隔操作システムで必要とするセンサ

遠隔操作に伴い水中バックホウに関する情報で必要となるのは次の通りである。

- 水中バックホウ各部の姿勢に関する情報
- 機体位置に関する情報
- バケットに作用する反力の情報

(a) 水中バックホウ各部の姿勢情報に必要なセンサ

水中バックホウ各部の姿勢として、ブーム、アーム、バケットの関節角度、クローラ方位、旋回体方位、機体

傾斜を計測する。このうち、機体傾斜については取り付け位置の制限を受けず、防水の密閉容器内に設置することが可能であるが、その他の情報取得のためのセンサは-20m程度の防水性能が必要となる。センサの機構に可動部分がある場合、防水性能は急激に悪化するため、関節角度等の計測センサには回転計ではなく、磁歪式ストローク計を用いる。クローラ部と上部旋回体の回転角度の計測も同様の理由で回転計を用いることができないが、さらに、旋回範囲が限定できないという条件も付加されるため磁歪センサも利用できない。そこで非接触型近接センサを用いることとする。遠隔操作の場合センサの初期化などを行う事が困難であり、さらに電源を入れたときからの相対的な値を取得する方式は適していない。そのため旋回体方位については絶対値として計測する必要があり、本システムでは地磁気方位計を用いることとした。この場合、磁性体であるバックホウ機体から可能な限り遠ざける必要がある。

(b) 機体位置情報に必要なセンサ

機体位置に関する情報ではバックホウの座標を計測する。水中での座標取得には超音波の伝播時間の差分から座標を計算するSBLが一般的であり、本遠隔操作システムでもSBLを利用する。ただし、SBLの実用的な精度は±30cmであり、高精度の測量には向いていない。そのため、XY座標平面に関してSBLを用い、z座標に関しては高精度な水圧計を用いる。

(c) バケットに作用する反力情報取得に必要なセンサ

本遠隔操作システムでは接触情報を利用しており、さらにその時の反力を可変ゲイン位置対称型バイラテラル制御に利用することから、バケットに作用する反力の大きさを取得する必要がある。ただし、前述の通りバックホウの出力に耐えられる6軸分力計は存在しないため、反力センサの機構については検討する必要がある。そこで高い負荷を計測できるロードセルを用いることを提案し、バックホウ掘削力に耐えられる反力取得機構について検討を行った。

(2) 部分模型を用いた反力取得機構の検討

ロボットアームの場合、反力センサはエンドエフェクタ付近に分力計を取り付けることが一般的である。しかし最終年度のバックホウ実機に搭載することを考えると、実機の最大掘削反力に耐えられる分力計は存在しない。また、バックホウの負荷を計測するには油圧経路に油圧計を設置する手法があるが、ブームおよびアームの自重

による負荷、シリンダの加減速時の負荷、複数のバルブを同時に開いた場合の圧力の均圧化など影響が想定され、純粋な掘削反力を認識することが困難であると考えられる。

ここでバックホウによる作業を考えると、基本的にはバケットの引き込み掘削動作および払い動作であり、横方向に負荷のかかる利用はされていない。旋回動作による横払い動作に関して建設機械メーカーに質問したところ、旋回用油圧モータの出力がシリンダと比較して小さく、さらに旋回中心軸からバケットまでの距離があるとトルクは非常に小さくなる、ブーム軸にネジレの負荷がかかるということ、土砂などの表面を最後に平らにするといった利用しかされていないとの回答を得た。

そこで本システムにおける反力センサの検出対象を掘削トルクだけに絞り、設置位置をエンドエフェクタであるバケットの軸とした。室内模型ではアタッチメント形式で装着できる形状を考案し、圧力センサタイプとリミットスイッチタイプについて比較を行う。さらにロボットアームで一般的な6軸分力計を取り付けたものと比較し、その検出情報が必要十分であるかを確認する。

使用したアタッチメント型センサを図-4.1から図-4.4に示す。

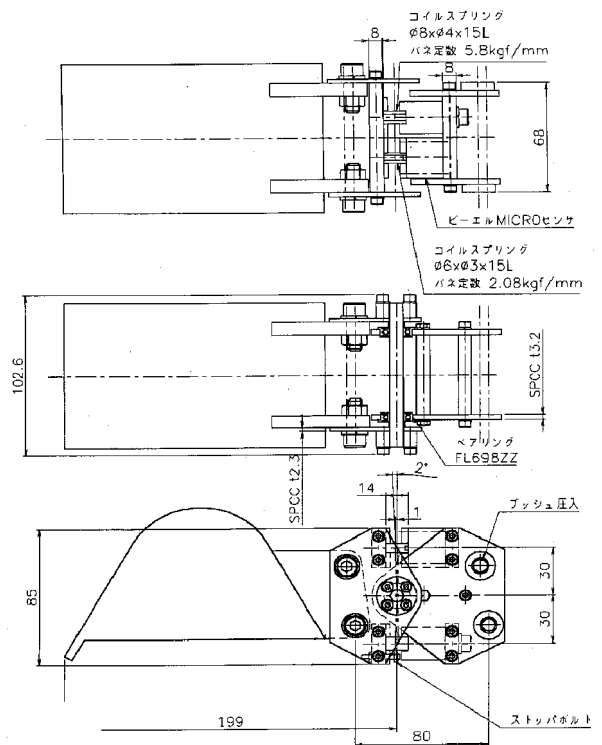


図-4.1 圧力センサタイプ

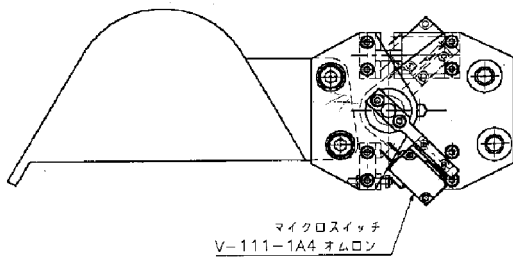


図-4.2 リミットセンサタイプ

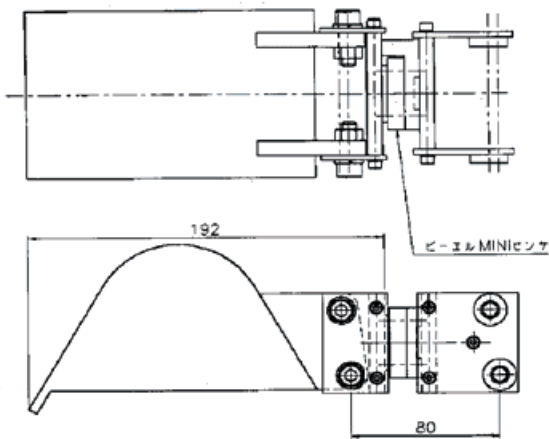


図-4.3 6軸分力計タイプ

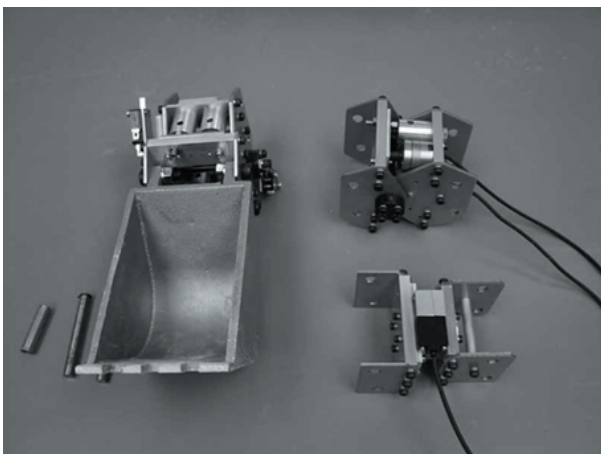


図-4.4 製作したアタッチメント型センサ

室内模型実験では掘削動作、払い動作時のアタッチメント型センサから出力される電圧値をADボードによって計測を行う。なおリミットスイッチタイプは5V電圧のon-offである。

6軸分力計の各軸周りのモーメントではグラフy軸の値を10倍し単位は[kg・cm]とした。圧力センサタイプではさらにセンサ位置とその圧力差から機構の回転軸まわりの

モーメントを算出する必要があるため、回転軸からの距離を乗算している。単位は6軸分力計と同様である。

このような補正で各センサ機構の値を比較することとした。なお値の取得間隔は0.1秒毎としている。

掘削動作はブーム・アーム・バケットを同時に操作する一般的な操作とした。操作は被験者の手入力で行うが、対象物に接触している時間を1秒間と定めできるかぎり同様の軌跡をとるように事前に十分に練習を行った。

掘削動作のイメージ図を図-4.5に示す。計測した各センサからの出力をグラフ化したものを図-4.6に示す。

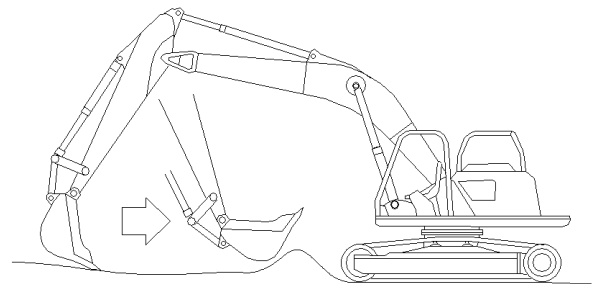


図-4.5 掘削動作

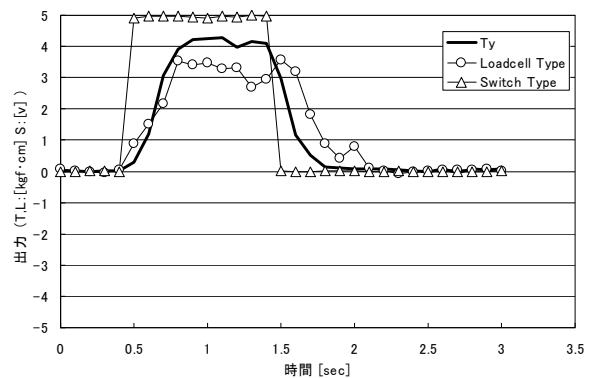


図-4.6 センサ出力比較

圧力センサによる出力特性は多少ばらつきがあり、出力の最大値が異なっているが、これは人の手入力により負荷が同等にならなかったものと考えられる。動作開始時はバックホウのブーム・アーム・バケットを常に同じ姿勢に戻しており、比較的同じ負荷となりやすい掘削初期入力時の特性に注目すると6軸分力計によるy軸周りのモーメントと同等であると言える。

リミットスイッチタイプの出力特性はon-offであるため一定の閾値を超えた負荷の認識は容易であるが、負荷の大きさを計測することは困難である。また閾値の調整にはバネ定数を変更するかリミットスイッチの位置を変

更するなど機械的に調整を行う必要があり、バケットの角度によっては自重だけでスイッチが入ってしまう可能性があることを考えると実機への搭載は困難であると考えられる。

次に6軸分力計により得られた電圧値をグラフ化したものを図-4.7に示す。これは掘削動作時のxyz軸方向の力と各軸周りのモーメントをあらわしたものである。このグラフをみると主に計測されているのはy軸周りのモーメントであり、掘削時にはバケット軸まわりの負荷がかかっていることがわかる。また掘削動作前半にはz軸の押し込み方向に力が加わっていたが、後半には押し込みの力が抜けていることがわかる。x軸方向にも多少の負荷が計測されたが、y軸周りのトルクと比較して非常に小さいため、この値で掘削しているかどうかをソフトウェア上で判断することは困難である。

次に払い動作のイメージ図を図-4.8に示す。払い動作はブームを下げバケット先端を地面に突き刺した後にアーム・バケットを開くような制御を行っている。この操作入力も被験者の手入力でおこなっており、対象物に接触している時間も1秒間と定めた。計測した各センサからの電圧出力をグラフ化したものを図-4.9に示す。

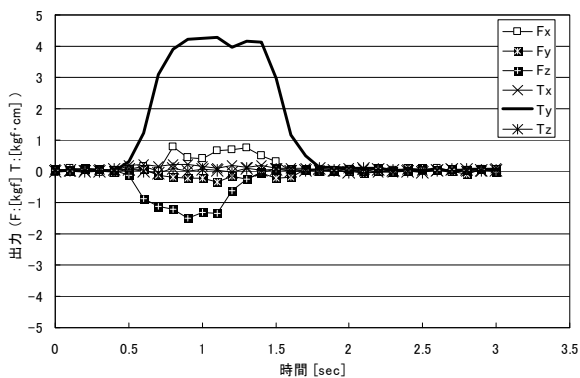


図-4.7 6軸分力計出力

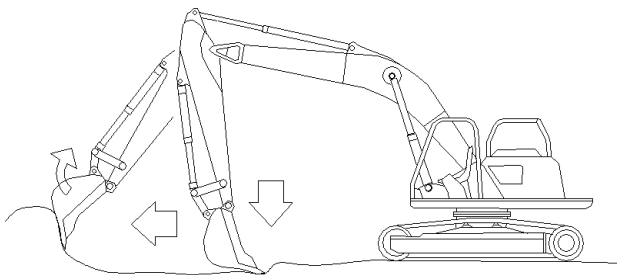


図-4.8 払い動作

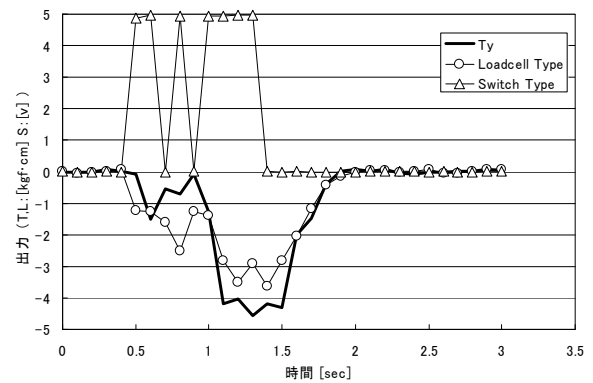


図-4.9 センサ出力比較

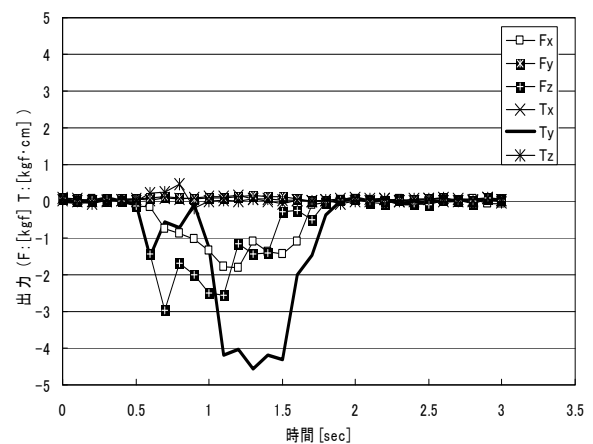


図-4.10 6軸分力計出力

払い動作の場合、y軸周りのモーメントは掘削時とは逆方向の負荷となるため、マイナスの値が検出されている。払い作業前半ではバケットの先端を押し込んでいる状態であるため、バケット軸周りに大きなモーメントは発生しておらず、その後バケットを開いている状況においてモーメントが計測されている。これは均し動作と同様に6軸分力計と圧力センサタイプにおいて同じような出力特性であるといえるが、リミットスイッチタイプでは接触認識に乱れがある。これはバケット先端を押し込んだときの負荷が閾値付近であったためであると考えられる。

次に6軸分力計の出力特性をグラフ化したものを図-4.10に示す。払い作業の初期段階にz軸方向に押し込む力が検出され、バケットを開いた場合にはy軸まわりのモーメントが検出されている。またx軸方向の力も検出されているが、これは大きな特徴を持っておらずx軸の出力で接触を判断することは困難であると考えられる。また、z軸方向の押し付け力については、接触についての検出には有効ではあるが、マウンドを変形させる作業中には特徴ある出力特性とはならなかった。

(3)室内実験模型を用いた実験結論

バックホウの出力に耐えられる6軸分力計が存在しないため、高い負荷を計測できるロードセルを用いる方法について、部分模型を用いた実験により検討を行った。この結果、実用上、バケット軸まわりのモーメント（ピッチングトルク）の検出によってマウンドとの接触を判定できることが分かった。なお、ピッチングトルクは、2基の引張圧縮型ロードセルの圧力を計測し、その圧力差から求めることができる。

4.3 室内模型実験機による実機機構への適応検討

バックホウは、機体移動のベースとなるクローラ部と、バケット軸、アーム軸、ブーム軸、旋回軸の4自由度で動く上部旋回体とで構成されるが、ここでは、遠隔操作において特に重要な上部旋回体の制御方法を中心に論じる。

バケット軸、アーム軸、ブーム軸、旋回軸は、4自由度を持つロボットアームと考えることができる。オペレータの操作によりバックホウ各部が作動し、同時に、各部のストロークやバケットが受ける反力が操作にフィードバックされる機構は、バイラテラル制御系と呼ばれる機構の採用によって実現できる。これは、バックホウの実機と相似形で同じ可動範囲を持つ操作端を用意することにより、操作端の動きを実機の指令値とし、この指令に基づく実機の動きを検出して、その値が操作端を制御する指令値にフィードバックされるという制御機構である。これにより、操作端を動かすオペレータの手と、バックホウのアーム・ブーム・バケットとが相似形の動きになり、また、マウンド石を押し動かそうとしてバックホウのバケットに負荷がかかった状態になれば、オペレータの手の動きにも負荷がかかる。

この際、バケットが受ける圧力そのままを比例的にフィードバックするのではなく、むしろオペレータが状況を理解しやすいように情報を加工する方がよと考えられる。これは、バーチャルリアリティ分野で強調現実感または拡張現実感（Augmented Reality：AR）と呼ばれる。

さらに、どのような位置、姿勢でバケットに反力が作用したかの現状と履歴をCG画像として提示することによって、オペレータは、視覚的にもバックホウによる作業状況を理解することができる。

他方、実際的水中バックホウは油圧による動作であり、遠隔操作のためには追従性の低さや大出力を考慮した要素技術を検討する必要がある。ここではバイラテラル制御手法、反力取得機構、触覚情報の視覚化、相似形入力装置の各要素技術を水中バックホウに適応させるため室内模型実験による検討を行い、それらを組み合わせた遠

隔操作システムを提案する。

(1)作業機械への指令の与え方

作業機械の操作方法を大別すれば、ジョイスティックやボタンなどによる入力により作業機械を操作する方法と、Masterと呼ばれる作業機械と同じ形状の入力装置で作業機械（Slave）を操作するMaster-Slave方法がある。

ジョイスティックの場合、レバーの入力量によってマニピュレータの関節角速度を制御する。これは、操縦形ロボットへの指令方式の最も基本的な例である。

この方式の特徴は、それぞれの関節への指令値を、対応するレバーにより直接作成することである。この方式の具体的な例が通常のバックホウであり、二本のレバーにより、ブーム・アーム・バケット・旋回を協調して駆動させ、複雑な作業を実現させている。しかし、この方法はロボットアームやハンド等、関節が多くなった場合には操作が複雑になる。

そこで考案されたのがMaster-Slave方式である。これはロボットと同じ形をしたものを1つ用意し、これを操作端として用いる。オペレータが操作用ロボットの先端を動かせば、操作用ロボットの各関節の値自体が作業用ロボットの各関節の指令値となり、作業を各関節の運動に分解するという必要は無い。このMaster-Slave方式をバックホウに適用するとすれば、アーム、ブーム、バケットという関節で構成されたバックホウ実機が“Slave”であり、これと同じ関節の構造を持つ相似形の操作端が“Master”である。

(2)ジョイスティック方式とMaster-Slave方式の比較

ここで、ジョイスティック方式とMaster-Slave方式による遠隔操作型の作業機械（水中バックホウ）への指令の与え方のメリット・デメリットについて下記のとおり考察した。

- 通常のバックホウの操縦に用いられるジョイスティック方式は、建設作業に従事するオペレータにとって慣れた操作方式であるが、次のような課題もある。
- 実機は海底にあるため直接的には視認できない。また、油圧で駆動するため、ジョイスティック操作と実機の動作には時間遅れが生じる。このため、遠隔操作を補助するCG等を用いたとしても、陸上作業時と同様にバックホウの姿勢等の状態を一目で把握できるかどうか疑問が残る。
- 遠隔監視用のTVカメラの使用が困難な海中において、バックホウ各部が受ける負荷等をオペレータにフィードバックする機構を導入しようとする際、ジ

ョイスティック方式によって“手応え”をオペレータに巧く伝達できるかどうか疑問が残る。

- アーム、ブーム、バケットの動きと同じ形で実機に指令を与えるMaster-Slave方式は、実機の動作等の情報を操作端にフィードバックすることにより、リアルタイムにバックホウ各部の姿勢と、動作時の“手応え”の直感的な把握が期待できる。

以上の理由から、本研究ではMaster-Slave方式による操作方式を用いることとした。

(3)遠隔操作のための入力インタフェース

実機は海底にあって、遠隔操作による機体の動きがオペレータから全く見えないことを考えれば、入力インタフェースには操作入力のしやすさ、直感的な分かりやすさが重要である。

そこで、まずバックホウ上部の動きをバケット軸、アーム軸、ブーム軸の3自由度の操作と、旋回軸の操作とに分けて、

- 旋回軸の操作はクローラの前進・後進操作と同じ操作系としてまとめ、機体の前進・後進（旋回による進路変更を含む）、機体上部の旋回を一括して司る操作系とする。
- バケット軸、アーム軸、ブーム軸の操作は、一つの入力インタフェースとしてまとめ、詳細な動きに適合した分かりやすい操作系とする

こととした。

(4)本システムに適用するバイラテラル制御方式

バイラテラル制御とは、制御の対象をMasterの位置と力、Slaveの位置と力の4つとし、MasterとSlave間で位置や力を一致させるような制御を指す。つまり動作に指示を与える「Master装置」と実際に作業を行う「Slave装置」を用意し、MasterからSlaveへ姿勢を指示し位置決めを行う制御系と、これとは逆向きに作業に伴う反力などをSlaveからMasterへ伝達する制御系を同時並行して制御する方式をいう。

a)対象型バイラテラル制御

最も一般的な対称型バイラテラル制御は、Masterの変位にSlaveを追従させるようにMaster、Slave両者のアクチュエータを制御するものである。すなわちMasterに変位が生じると、MasterとSlave間に相対変位が生じるが、その相対変位を0にするようにMasterおよびSlaveを制御し、両者に駆動トルク、拘束トルクを発生させるように制御するものである。これを対称型バイラテラル制御と呼ぶ。

この方式ではSlaveに負荷がかかり停止した場合でも、その変位はMasterに拘束力としてフィードバックされる。この方式はSlaveにかかる力を計測する必要が無く、制御が単純で安定性も高い。図-4.11に対象型バイラテラル制御の模式図を示す。

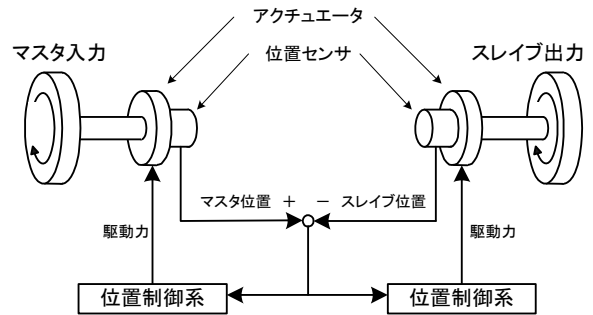


図-4.11 対象型バイラテラル制御

b)力逆送型バイラテラル制御

力逆送型バイラテラル制御は、MasterとSlave間の相対変位からSlaveの位置決め制御を行う一方で、Slaveに加わる力を検出して、それをMasterで再生する方式である。前述の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。力逆送型は、このような不具合を解決するために、直接Slave側の荷重を計測して、その力をMasterの拘束力に反映させるものである。図-4.12に力逆送型バイラテラル制御の模式図を示す。

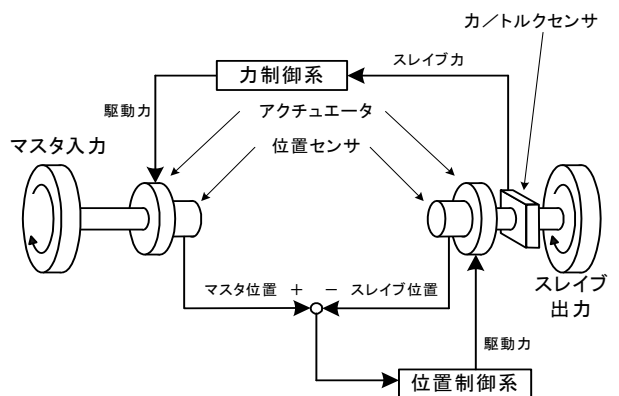


図-4.12 力逆送型バイラテラル制御

(5)バイラテラル制御を適用するための課題

ここで制御対象である水中バックホウの特徴を考える。

- 水中バックホウの動力は油圧であり、制御対象とする水中バックホウと同等クラスの建設機械のバケット最大掘削力は約9tonfと非常に大きな出力である。
- また、バックホウの動作は緩慢であり、素早い入力

に対する追従性は低いと考えられる。

- 油圧シリンダの速度は作動油の流量に比例するが、流量制御弁を用いておらず、弁開度と作動油流量は比例関係とならない。
- 油圧弁は物理的に弁を開閉させており、建設機械に搭載されているものは反応が遅いため、速度制御は困難である。

このような特徴を持つバックホウに前述の制御法を適用する場合、それぞれに下記のような問題が発生すると考えられる。

- **Slave**が負荷によって停止させられることでオペレータが接触を認識するような対称型バイラテラル制御では、このような大出力によるマウンド割石の掘削時、つまり**Slave**が負荷によって停止しない場合に接触を判断することは困難である。
- 力逆送型バイラテラル制御では、**Slave**に負荷がかからないかぎり**Master**には一切の拘束力は出力されず、自由に入力することができる。さらにバックホウの速度が遅いため入力に追従できず、**Master-Slave**の間に位置の相関関係が得られないことが予想される。つまりバケットが対象物に接触したことを感知しその反力を**Master**で提示したとしても、位置の相関関係が無いとどの位置で接触したのかが不明となる。

以上のことから、水中バックホウの遠隔操作にバイラテラル制御を実際に適用するためには、いくつかの制御特性を具体的に確認し、対称型と力逆送型の各々の長所を組み合わせたバイラテラル制御の方法を検討することが必要である。そこで、バックホウ遠隔操作への適用性を検証するため、部分模型による操作実験を行うこととした。

(6)バックホウの運動学方程式

実機に用いられている油圧シリンダは外力による変位がほとんど無く動作速度が遅いことを考慮し、本模型では関節角の制御をウォームギアによる直動シリンダとした。また、関節角度検出センサとしてポテンショメータを設置し、角度差分を電流出力とする位置制御とし、速度制御は行わない。また、本実験の対象は各関節角度の制御系の検討とその適応性の検証であり、旋回、移動は対象としない。図-4.13に室内模型を、図-4.14にバックホウのモデルを示す。



図-4.13 室内模型実験機

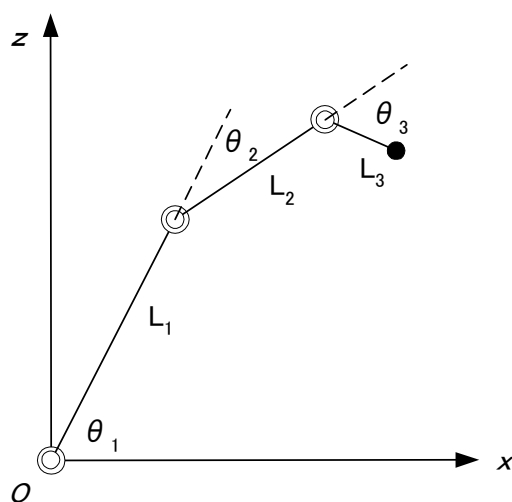


図-4.14 バックホウフロント部モデル

バックホウの先端座標と姿勢は、関節変位の値により変化する。関節変数ベクトル q とバケット先端の位置姿勢を表すベクトル r の関係は

$$r = f(q) \quad (4-1)$$

によって表される。 q が与えられたときに r を求める問題を順運動学問題と呼び、 r が与えられたとき q を求める問題を逆運動学問題と呼ぶ。

図-4.14に示す xz 平面内を動くバックホウのブーム・アーム・バケットについて、関節変位ベクトル $q = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]$ と位置姿勢ベクトル $r = [x, z, \theta]$ に関する順運動学問題と逆運動学問題を解いてみる。ただし、 θ はバケットと x 軸のなす角である。

順運動学問題は三角関数の定理より

$$\begin{aligned} x &= L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ z &= L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ \theta &= \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \end{aligned} \quad (4-2)$$

と導くことができる。次に逆運動学を求める。

$$L_2^2 = \{L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)\}^2 + \{L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)\}^2 \quad (4-3)$$

に式(4-2)を代入し整理すると

$$\begin{aligned} (z - L_3 \sin \theta) \sin \theta_1 + (x - L_3 \cos \theta) \cos \theta_1 \\ = \left\{ (z - L_3 \sin \theta)^2 + (x - L_3 \cos \theta)^2 + L_1^2 - L_2^2 \right\} / (2L_1) \end{aligned} \quad (4-4)$$

となる。ここで、

$$a \sin \sigma + b \cos \sigma = c \quad (4-5)$$

の関係が成立するとき、

$$\phi = a \tan 2(a, b) \quad (4-6)$$

と置くと、三角関数の合成則より、

$$\cos(\phi - \sigma) = c / \sqrt{(a^2 + b^2)} \quad (4-7)$$

$$\sin(\phi - \sigma) = \pm \sqrt{(a^2 + b^2 + c^2) / (a^2 + b^2)} \quad (4-8)$$

となり、 σ は、

$$\sigma = a \tan 2(a, b) - a \tan 2(\pm \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}, c) \quad (4-9)$$

と求まる。したがって、

$$\begin{aligned} a &= z - L_3 \sin \theta \\ b &= x - L_3 \cos \theta \\ c &= \left\{ (z - L_3 \sin \theta)^2 + (x - L_3 \cos \theta)^2 + L_1^2 - L_2^2 \right\} / (2L_1) \\ \sigma &= \theta_1 \end{aligned}$$

と置くことにより、式(4-9)によって θ_1 を得る。同様にして、

$$L_1^2 = (L_1 \sin \theta_1)^2 + (L_1 \cos \theta_1)^2 \quad (4-10)$$

に式(4-3)の関係を代入し整理すると、

$$(z - L_3 \sin \theta) \sin(\theta_1 + \theta_2) + (x - L_3 \cos \theta) \cos(\theta_1 + \theta_2) = d \quad (4-11)$$

を得る。ただし、

$$d = \left\{ (z - L_3 \sin \theta)^2 + (x - L_3 \cos \theta)^2 - L_1^2 + L_2^2 \right\} / (2L_2) \quad (4-12)$$

である。これより、

$$\begin{aligned} \theta_2 &= a \tan 2(\pm \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}, c) \\ &\quad - a \tan 2(\mp \sqrt{a^2 + b^2 + d^2}, d) \end{aligned} \quad (4-13)$$

を得る。 θ_3 は

$$\theta_3 = \theta - \theta_2 - \theta_1 \quad (4-14)$$

で求める。(4-13)式の複合は二つの姿勢を持つことを示しているが、バックホウの場合関節の可動範囲が限定されるため判別は可能となる。

(7)バイラテラル制御を用いた室内模型による操作実験
実験は粒径30mmの石を対象に本モデルによる掘削、均し作業の実験を行い、対象型バイラテラル制御と力逆送型バイラテラル制御について、操作性と接触の認識を調査した。

a)対象型バイラテラル制御における操作性

無負荷状態ではMaster-Slave間で位置の差分を抑える拘束力が作用し相似の関係が大きく崩れることが無いため、姿勢の認識は容易である。また、Slaveが負荷により停止した場合でも同様であり、動作の遅い油圧作業機械の制御に適していると言える。

b)対象型バイラテラル制御における接触の認識

接触を認識するにはSlaveが負荷により停止しなくてはならず、対象物に変形するような掘削作業では接触を判断することは困難である。またMasterの出力する反力は位置の差分に比例するため、Slaveが急に停止した場合でもMaster-Slaveの位置差分が大きくなるまで入力を継続してしまった。つまり接触の認識にはタイムラグが生じた。

c)力逆送型バイラテラル制御における操作性

無負荷時にはMasterに拘束力が作用しないため、動作の遅い油圧作業機械で相似の関係を維持することが難しい。つまり現在の姿勢が把握できず、Slaveの先端を任意の位置に制御することが困難であった。

d)力逆送型バイラテラル制御における接触の認識

接触センサにより小さな負荷でも認識は可能であった。ただし相似関係が維持できていない状態で負荷がかかった場合、接触した位置を認識することができなかった。

(8) 部分模型による操作実験まとめ

実験の結果をまとめると以下の通りである。

- 無負荷時には、Master-Slave間の姿勢変位を抑える「位置対称型バイラテラル制御」が適する。
- しかし、位置対称型バイラテラル制御では、Slaveにかかる負荷によって実機の動作が抑制、停止したことをタイムラグ無しに判断することは困難である。このため、力逆送型バイラテラル制御の適用を検討したが、次のような課題がある。
- 追従性能が期待できない油圧機械に力逆送型バイラテラル制御を適応する場合、Master-Slave間に相似の関係を維持させることが難しい。また負荷のベクトルを検出し、そのベクトルに応じてMasterの各関節トルクを出力する必要があるが、バックホウの出力に耐えられる6軸分力計は存在しない。
- そのため「力逆送型バイラテラル制御」はMasterのバケット関節トルクにのみ適応させる。つまりブーム関節・アーム関節は接触時も位置対称型バイラテラル制御となるが、バケットのトルクに応じてその拘束力のゲインを急激に高めることで、接触時の負荷に応じて手応えを変化させ、負荷の大きさをオペレータが容易に認識できるようにするのがよい。

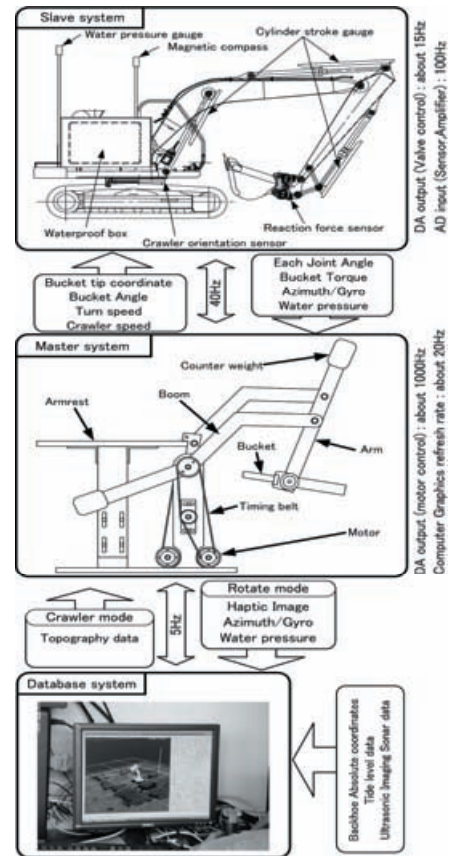


図-4.15 遠隔操作システム

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と呼ばれている。位置対象型バイラテラル制御法の欠点を力逆送型によって補った制御法であり、この制御法を用いることで作業中の操作感覚向上を図ることができる。

4.4 陸上実験機の製作

図-4.15に提案手法による遠隔操作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と、地形形状を記録し施工範囲の地形を鳥瞰視点から表示する計算機からなる。

(1) 相似形入力装置

a) 相似形インタフェースの提案

水中バックホウを遠隔から操作して、捨石均し作業を行うために、インタフェースに必要な機能や条件として、次の3つが挙げられる

- バックホウと相似形状
- バケット部分を操作
- 物体接触時に何らかの反力を呈示

まず、バックホウとの相似形状であるが、水中バックホウが海底にあり、その状態を目視によって確認できないため、バックホウの姿勢を一目で確認できる必要がある。従来の2レバー方式による操作では、形状の把握が困難で操作性の低下が予想される。そこでインタフェースの形状を実機と対応した相似形状とすることとした。インタフェースを見れば形状を把握でき、それを動かすことで実機の動作との1対1の対応づけが直感的に行える。また、実際のシステムでは通常のディスプレイにCGによる情報提示を行うことが予想されるので、相互に情報を補強する材料としても有用と考えられる。さらに、万が一、視覚ディスプレイに故障等が発生した場合でも安全に作業を中断することができる。

次にバケット部分の操作であるが、実際の作業を行う上で掘削や均しを行うのはバケットであり、ブームとアームはエンドエフェクタであるバケットを目標まで移動するために用いられている。つまり作業を行うということは、バケットを目標の位置へ思い通りに動かすことであり、インタフェースによりそれを実現するためには、バケット部分を把持することが最も適していると言える。

最後に物体接触時における反力の呈示であるが、実機

の地面や岩との接触情報をフィードバックすることで、遠隔操作の操作性が向上する。なお、実機では捨石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。硬いものに触れた感覚が得られる接触力は、応答が十分速ければ1kgf程度あればよく、任意の方向に1kgf以上出力できるアクチュエータを取付けることで対応可能である。

このように遠隔操作における特殊な条件を満たしたインタフェースとして、相似形入力インタフェースを提案した。

水中バックホウを遠隔操作するインタフェースとしては相似形のインタフェースが適当である。ここで道具媒介型操作インタフェースとして「ワンレバーシステム」および「パンタグラフマニピュレータ」、対象指向型の操作インタフェースとしてバケット直下の地面を模擬する「遭遇型インタフェース」の3種類を試作し比較することとした。

- ワンレバーシステム

ワンレバーシステムは3自由度のシリアルリンクマニピュレータで図-4.16にシステムの全景を示す。

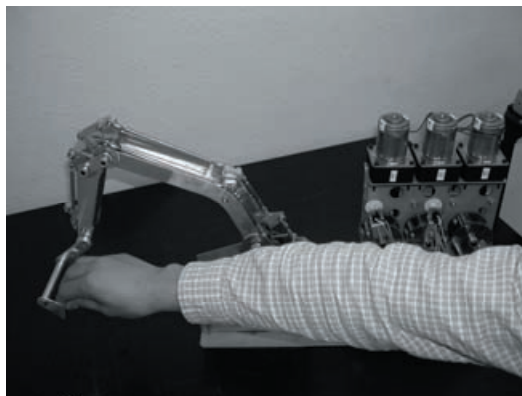


図-4.16 ワンレバーシステム

図-4.16の左側がバックホウ操作インタフェースとなっており、バケット形状を模した先端の把持板を指でつまんで、バケットの移動と回転を行う。可動範囲は半径473mm扇領域内部である。右側は各関節を駆動するためのアクチュエータである。バケット、アーム、ブームをそれぞれ駆動し、必要に応じてセルフロックがかかるようウォームギアを用いたアクチュエータが3つ配置されている。各アクチュエータには、リターン springs を介して平歯車を取り付けられており、アクチュエータと平歯車のズレ量を制御することで、リンクを自由に動かし、ロックをかけたりする。また、アクチュエータの角度を実機の現在の姿勢と対応させることで相似形

インタフェースとして利用できる。

- パンタグラフマニピュレータ

パンタグラフマニピュレータは、水中バックホウの形状を模して、平行四節リンク機構によって実現した3自由度マニピュレータである。

図-4.17にシステム全景を示す。マニピュレータは、ブーム相当のリンクが「くの字」に曲がった平行四節リンクである。アームに相当するリンクの先端にバケットを回転させるモータを取り付けたものである。ユーザはバケットのモータを指先で持ってバケット自体を移動、回転させる。バケットは180°回転するので、モータを指先で持ち、手首の回転と人差し指と親指の相対運動によってモータを転がす、2つの運動を組み合わせると180°回転させる。

パンタグラフ機構により関節を駆動するためのアクチュエータのほとんどを根元に集めることが出来、ユーザは先端のバケットを回転するアクチュエータのみの重量を支えればよい。本装置では、エンコーダとギアボックス付きモータを3台用いた。モータの出力は、バケット先端に1kgf以上の反力が呈示できる物として選定を行った。ギアボックスの仕様から先端で2kgfの反力出力が可能である。簡素な機構であり、メンテナンスも容易といえる。可動範囲は半径417mm扇領域内部で、計測誤差は0.18mmである。ロータリーエンコーダを用いているため耐ノイズ性に優れている。



図-4.17 パンタグラフマニピュレータ

- 遭遇型インタフェース

遭遇型インタフェースは、他のインタフェースが各リンクにつけたアクチュエータで反力等を呈示するのとは異なり、バケットが接触している地面の形状をY-Zステージによって呈示するものである。このシステムの全景を図-4.18に示す。

システムは、ポインティングデバイスと地面呈示部の2

つから成る。中央の黒いリンクはバックホウを模した3自由度ポインティングデバイスである。先端には直径5 mmの棒が左横方向に突き出ており、この棒を指先で持ってバケットを移動、回転させる。バケットの180°回転はパンタグラフマニピュレータと同様に、手首の回転および人差し指と親指の相対運動によって棒を転がす、2つの運動を組み合わせて実現する。関節角度の計測にはポテンシオメータを用いる。先端位置はノイズによって平均振幅0.70 mmのふらつきが見られた。

図-4.18において下半分に写っている機構が地面呈示部分である。これはストローク150 mmの直動アクチュエータ2本を直交させ、前後と上下移動が可能なY-Zステージに、100 mm×100 mmのアルミ板をX軸周りに回転させる機構を取り付けたものである。アルミ板によって地面の高さと傾斜を呈示し、さらにポインティングデバイスが硬い地面や岩にぶつかった感覚を呈示する。



図-4.18 遭遇型インタフェース

b) 制御精度に関する室内実験

3種類の装置を比較するために、ポインティング実験を行った。実験では、インタフェース座標系で約200 mm先の平面上の半径12.5 mmの半球をポインティングする。ポインティングの際には、視覚情報として地面を表すワイヤフレームと目標の球、バックホウをCGで表示した。CG画面を図-4.19に示す。

条件としては、従来のジョイスティックを用いた場合、フィードバックのないものとして遭遇型のポインティングデバイスのみ、ワンレバー、パンタグラフ、遭遇型インタフェースのそれぞれの装置を用いた場合の合計5種類について実験を行った。被験者には実験前に練習をさせた。装置の性能によって、移動可能速度が異なるため作業時間ではなく、装置先端の軌跡を記録した。

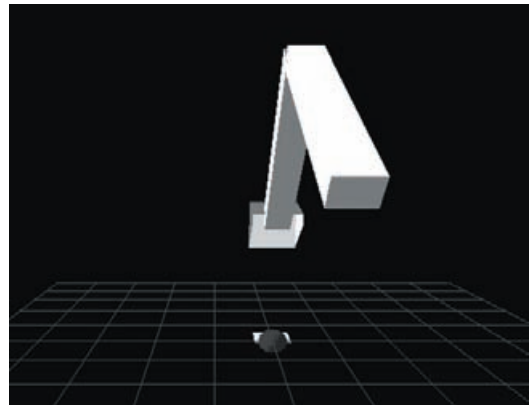
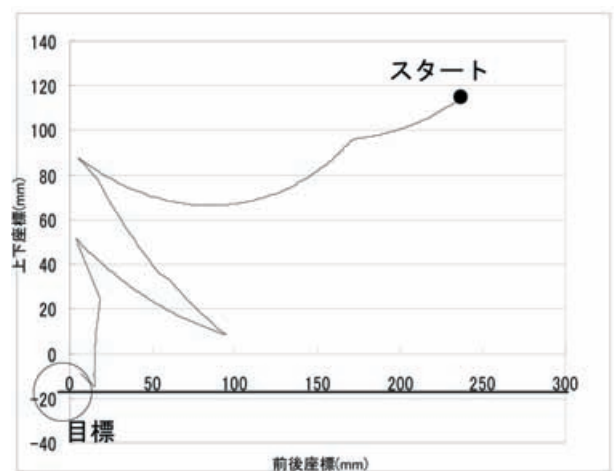
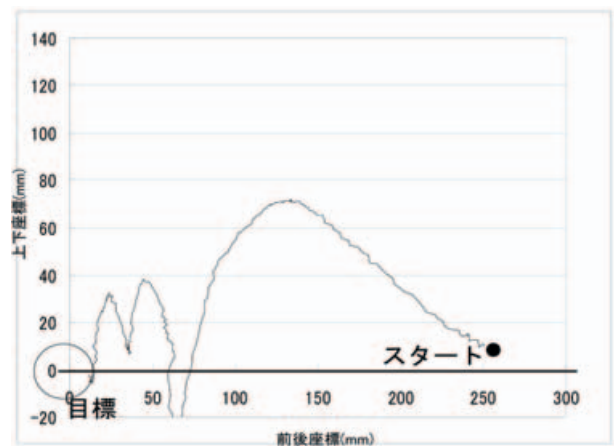


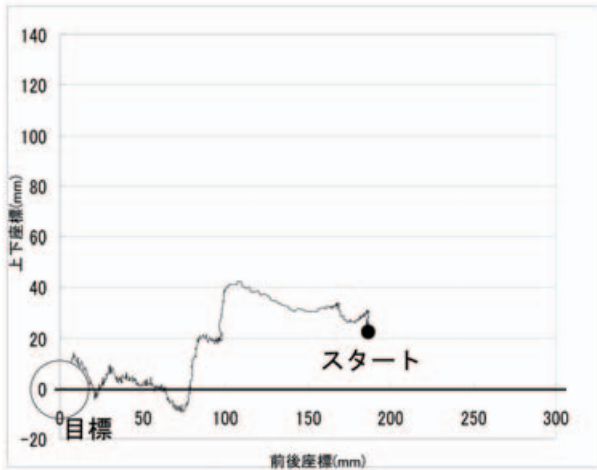
図-4.19 実験画面



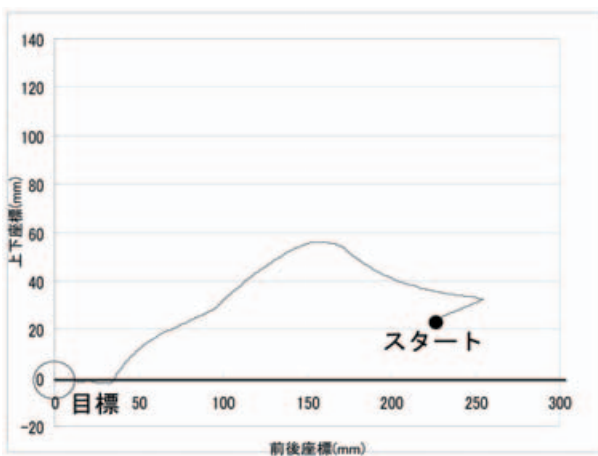
ジョイスティック



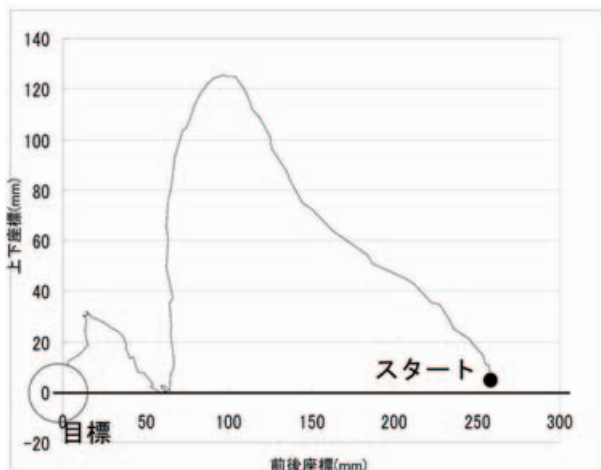
ポインティングデバイス



ワンレバーシステム



パンタグラフマニピュレータ



遭遇型インタフェース

図-4.20 各操作装置の軌跡

図-4.20に各操作装置の軌跡を示す。地面は上下座標0mmの平面としている。ジョイスティックの軌跡を見るとスタートから目標に向かって進んではいるものの、アームやブームを同時には動かさず、順を追って動かしてお

り、オーバーシュートも激しい。実際の運転員ほどの習熟は短期間では難しいことがわかる。

ポインティングデバイスはジョイスティックに比べてオーバーシュートは少ないが、地面へのめり込み量が最大43mmと非常に大きく、何らかの情報をフィードバックさせる必要があると考えられる。

ワンレバーでは、最大9.3mmの地面へのめり込みが見られるがこれはリターンズプリングによる軸の遊びによって、フィードバックが遅くなったためである。ワンレバーの仕様でロックがかかるのはスプリング中立位置から $\pm 7^\circ$ の角度である。地面等にめり込んだ瞬間に 7° 回転させたのでは遅れが生じる。例えば常にバケット先端直下の地面を目標位置として関節角を求め、ブームのアクチュエータの角度がその角度から 7° オフセットした角度以上動かないようにするなどの手法により遅れ及びめり込み量を小さくすることは可能である。ただし、下には行かないが上方向はフリーに動くなど、片方向にしかロックがかけられない。

パンタグラフマニピュレータではスムーズにポインティングが出来ている事がわかる。また、モータトルクが飽和したため、最大で2.4mmのめり込みが見られた。この程度であれば20倍しても50mm弱と仕様を十分満たすことが可能である。遭遇型インタフェースでは地面へのめり込み量は最大で0.7mmと最も少なく安定したポインティングが可能であった。

以上の結果から、ジョイスティック、ポインティングデバイス、ワンレバー、パンタグラフマニピュレータ、遭遇型インタフェースの順にポインティングの精度が上がる事がわかった。

c) インタフェースの改良

水中バックホウの遠隔操縦システムでは、視覚情報による情報提供の他に、バケットが受ける反力に相当する力覚をユーザにフィードバックすることが重要である。この力覚呈示により地面の位置だけでなくその硬さなども直感的に理解することが出来る。

これまで水中バックホウと相似な形状を持った力覚呈示装置(相似形インタフェース)と、小型の板(エンカウンタ)を相似形インタフェースの先端位置に合わせて移動し、バケット直下の地面の位置を呈示する遭遇型インタフェースを組み合わせたシステムを開発した。

エンカウンタは、遭遇型インタフェースに取り付けられた板のことである。遭遇型インタフェースは前後上下2自由度の直動アクチュエータの先端にピッチ方向の傾斜角を付けるアクチュエータから成り、その先端にエンカ

ウンタが取り付けられている。最低限の機能を持ったバックホウ操作インタフェース構成としては、相似形インタフェースのみで十分であるが、相似形インタフェースは、岩などの非常に硬い地面を呈示することが難しいという欠点がある。それを補うため、エンカウンタを用いる。すなわち、相似形インタフェースの把持部分の真下の地面を呈示するよう常にエンカウンタを移動させ、把持部分をエンカウンタに接触させると固い地面が感じられる。しかし、単に地形情報に基づいてエンカウンタを移動させるだけだと、地面を掘り起こす際にどんなに強い力で押してもアクチュエータの出力を上回らない限りエンカウンタは動かないため、返ってエンカウンタが邪魔になる。

実際のバックホウは通常、地面を掘り起こす動作は、バケットに力をかけて地面にめり込ませて行う。従って地面を模擬しているエンカウンタ部分に加わっている力がわかれば、ある一定の力よりも大きな力が加わったときに地面を変形させることでこの不具合は解決できる。そこでエンカウンタに力センサを取り付けることとした。

ところで、力センサを取り付けることによって地面を掘った感覚を呈示することが可能になるが、施工においては施工目標面が予め設定されている。エンカウンタはこの面に沿って移動させ、相似形インタフェースによって実際の地面からの反力をユーザに呈示する方式の方が、あとどのくらい掘ればいいのか、またエンカウンタによってそれ以上掘れない様にすれば、作業精度も向上することが予想される。

そこで、本研究ではまずエンカウンタに力センサを取り付け、目標施工面に沿ってエンカウンタを移動させることとした。しかしながら、この方法は目標施工面が実際の地面よりも常に低いことが前提である。実際の作業では逆になることも十分あり得る。そこで、目標施工面が実際の地面より高い場合には、エンカウンタは低い方、すなわち実際の地面の形状に合わせて移動することとする。エンカウンタが目標施工面と実際の地面どちらを呈示しているかは、CGの触像画面を見て確認することができるので、大きな問題にはならないと予想される。

これまで得られた知見を基に、相似形インタフェースおよび遭遇型力覚呈示装置を備えた新しい相似形入力機器の開発を行った。回転角センサ付きのイスに相似形インタフェース（パンタグラフマニピュレータ）、地面や施工目標面を呈示する遭遇型インタフェース、計算機へのコマンド入力やVR空間やカメラからの映像を映すタッチパネルディスプレイを取り付ける。実際に製作したシステムを図-4.21に示す。



図-4.21 システム全景

ユーザはパンタグラフマニピュレータのペン型の把持部を右手で把持して操作を行う。把持部分の真下の、遭遇型インタフェースの形状呈示板が把持部の動きに追従し、硬質な地面との接触感を呈示する。また、ユーザの目の前にはタッチパネルディスプレイがあり、バックホウの様子が映し出される。さらにユーザの左手側にはバックホウ本体の移動を制御するためのジョイスティックが設置されている。

360°回転するバックホウ機体上部の制御のために、イスの回転検出機構を取り付けた。これは、単にジョイスティック等で回転を指示する方式では、自分の体が回転しないため、現在バックホウ上部がどちらを向いているかわからなくなり作業の効率が落ちることが予想されるからである。イスにモータを取り付け、回転の指示に応じて電動で回転させることも考えられるが、ここではユーザが足を使って回転方向を調節することで、より方向感覚を明確に出来るのではないかとこの仮説の基に回転検出機構のみ取り付けた。

前述のイスの回転検出機構は、バックホウ機体上部の制御を目的としたもので、クローラを使った機体全体の移動制御のための装置が必要である。従来の装置では、2本のレバーによってキャタピラを制御している。本システムでは、前進、後退、左右回転の2自由度をジョイスティックによって操作できると仮定して、ユーザの左手側にジョイスティックを取り付けた。

遠隔地のバックホウの様子を視覚的にフィードバックするモニタ兼計算機へのコマンド入力用に、タッチパネル液晶ディスプレイをイスに取り付けた。これは、イスが回転するため、ディスプレイが常にユーザの目の前に

来る様に配慮したためである。ディスプレイは市販のディスプレイアームによってイスに固定されており、着座、起立時にはディスプレイがドアのように横に押し開くことが出来る。ユーザが着座したときにディスプレイを見た様子を図-4.22に示す。



図-4.22 タッチパネルディスプレイ

(2) 遠隔操作型ミニショベル

油圧を動力源とする作業機械は電動である室内模型と異なり、バルブを開いてから動き始めるまでのディレイ、複数のバルブを同時に開いた場合の影響、速度制御の困難性、各関節のガタ、バルブ閉時の急激な停止など、制御に関する問題点が存在すると考えられる。また接触により取得した地形データと実地形との差、均し作業における施工精度、単位時間あたりの施工面積など、模型実験では明らかにできない項目も存在する。そのため無視条件下での均し作業実験を行うことで本システムの有効性を検討することを目的に、油圧を動力源とした実際の施工機械に本遠隔操作システムを適応させた陸上実験機を製作した。

実験機を開発するにあたっては、既存のバックホウをベースマシンとし、これを遠隔操作型にカスタマイズすることとした。バックホウとしての基本的な機能を有するとともに、改造や制御および実験の容易さなどの観点から、機体重量3t未満の小型車両系建設機械ミニショベルをベースマシンとしてを用いた。図-4.23にベースマシンの側面図を示す。表-4.1に同機の仕様を示す。

ベースマシンを遠隔操作型に改造するためには、まず、バックホウの機能を発揮する主要部分であるフロント部の駆動装置を操縦装置からの電気信号によって制御が可能なシステムとすることが必要である。このためには、駆動装置の動力源である油圧システムの改造が必要となる。

次に、バックホウのフロント部はブーム、アームおよびバケットによって構成されるが、遠隔操作を行うため

にはこれらの位置情報が必要である。各部の角度を測定するセンサの設置に関する改造について記述する。

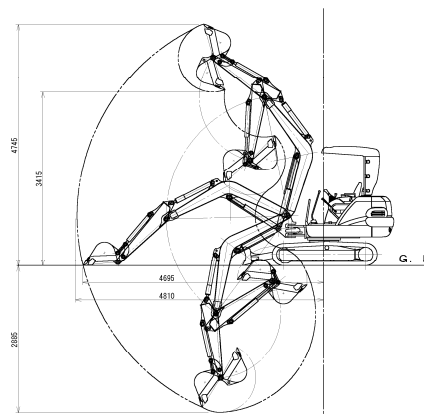


図-4.23 ベースマシン側面図

表-4.1 ベースマシン仕様

機械質量(kg)	2,750
機体質量(kg)	2,140
標準バケット容量(m³)	0.09
標準バケット幅(mm)	520
旋回速度(rpm)	9.0
走行速度(km/h)	4.5
登反能力(度)	30
最大掘削力(kN)	22.4
エンジン	
形式	ディーゼル 水冷4気筒渦流室式
定格出力(kW)	17.3
油圧装置	
油圧ポンプ形式	可変容量型ピストン式(×2) 歯車式(×1)
主リリーフ弁セット圧(MPa)	20.6
旋回油圧モータ形式	定容量型ピストン式(×1)
走行油圧モータ形式	可変容量型ピストン式(×2)
足回り	
標準シュー幅(mm)	300
接地圧(kPa)	25.7
水、油類の容量	
燃料タンク(L)	50
作動油タンク(L)	40(標準レベル30)

a) 比例電磁弁

バックホウの各シリンダの制御は油圧バルブを用いるが、高圧に対応したバルブにはバネ定数の大きなリターンスプリングが使用されており、人の手で直接操作することが困難である。そこで低圧の油圧システムを別に設け、その圧力で油圧バルブを制御する方式が一般的となっている。この低圧の油圧システムをパイロット油圧と呼び、パイロット油圧を制御するのがパイロットバルブである。運転席のレバーはこのパイロットバルブを駆動するものである。

遠隔操作型へ改造する場合、このパイロットバルブの開閉制御を電流などの電気信号で駆動するものに変更する必要がある。また油圧シリンダの伸び動作、縮み動作を制御するため油圧シリンダ1基につき2個のパイロット

バルブを必要とする。

本実験機では制御対象をブーム・アーム・バケット・旋回とし、座席下へ8機の比例電磁バルブを増設した。図-4.24に比例電磁バルブ設置状況写真を示す。

比例電磁バルブと搭乗操作レバーの操作方式切替スイッチは運転席横に設置している。

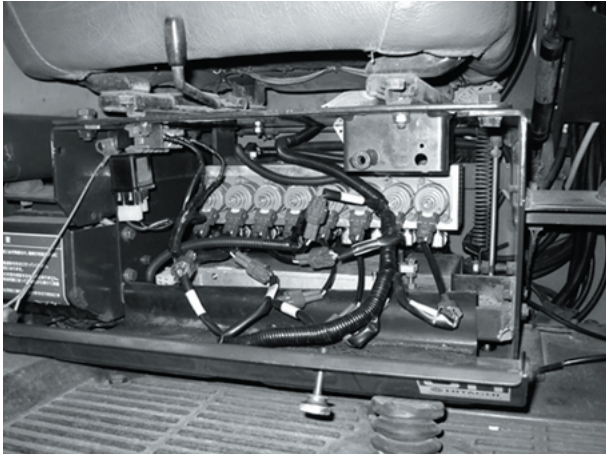


図-4.24 比例電磁バルブ

b) 比例電磁弁用バルブドライバ

比例電磁バルブを駆動するためにはドライバを設置する必要がある。本実験機に使用したバルブドライバは防滴防塵の密閉容器に収納し、座席後方に設置した。本バルブドライバの設置状況を図-4.25に示す。バルブドライバの仕様を表-4.2に示す。

ボードに入力される指令値は0V～5Vのユニポーラ電圧となっており、2.5Vを中立点として油圧シリンダの伸び動作用パイロットバルブ、縮み動作用パイロットバルブを制御する。ボードから出力されるバルブ駆動信号はPWM (Pulse Width Modulation) 信号となっている。



図-4.25 バルブドライバ設置状況

表-4.2 バルブドライバ仕様

項目	ドライバ	
ハードウェア機能仕様	スイッチ入力	6
	リレー・電磁弁出力	9
	比例電磁弁出力	16
	P/A出力	1
	シリアル入出力 (RS422)	2
	シリアル入出力 (Dr. EX用)	1
構造	アルミダイキャスト	
質量	約1.0kg	
使用温度範囲	-30～+70℃	
保存温度	-40～+85℃	
作動電圧範囲	DC 20～32V	

出力設定として入力電圧に応じた出力の調整が可能となっている。本実験機では入力電圧が0Vから0.5Vまでを不感帯として出力を停止するよう設定した。これは断線やPCの停電などで入力信号が0Vになった場合を想定したものである。また、2.5V付近でもノイズ対策として不感帯を設定した。図-4.26に入力電圧とバルブ開度の関係を示す。また全作動停止入力接点が存在しており、動作時に12Vの電圧信号を入力する必要がある。この接点は非常停止ボタンに接続しており、非常停止ボタンが押され接点が開放されるとバルブドライバの全出力を停止する。図-4.27に非常停止ボタンの写真を示す。図-4.28に陸上実験機の油圧回路図を示す。

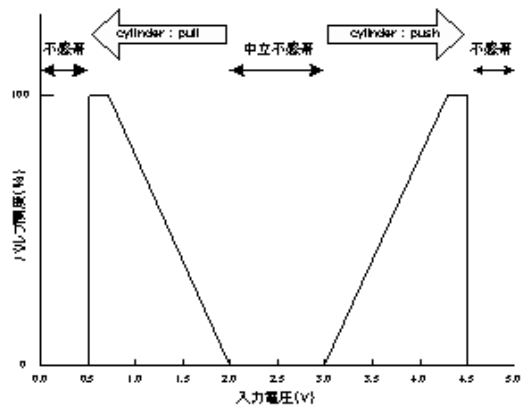
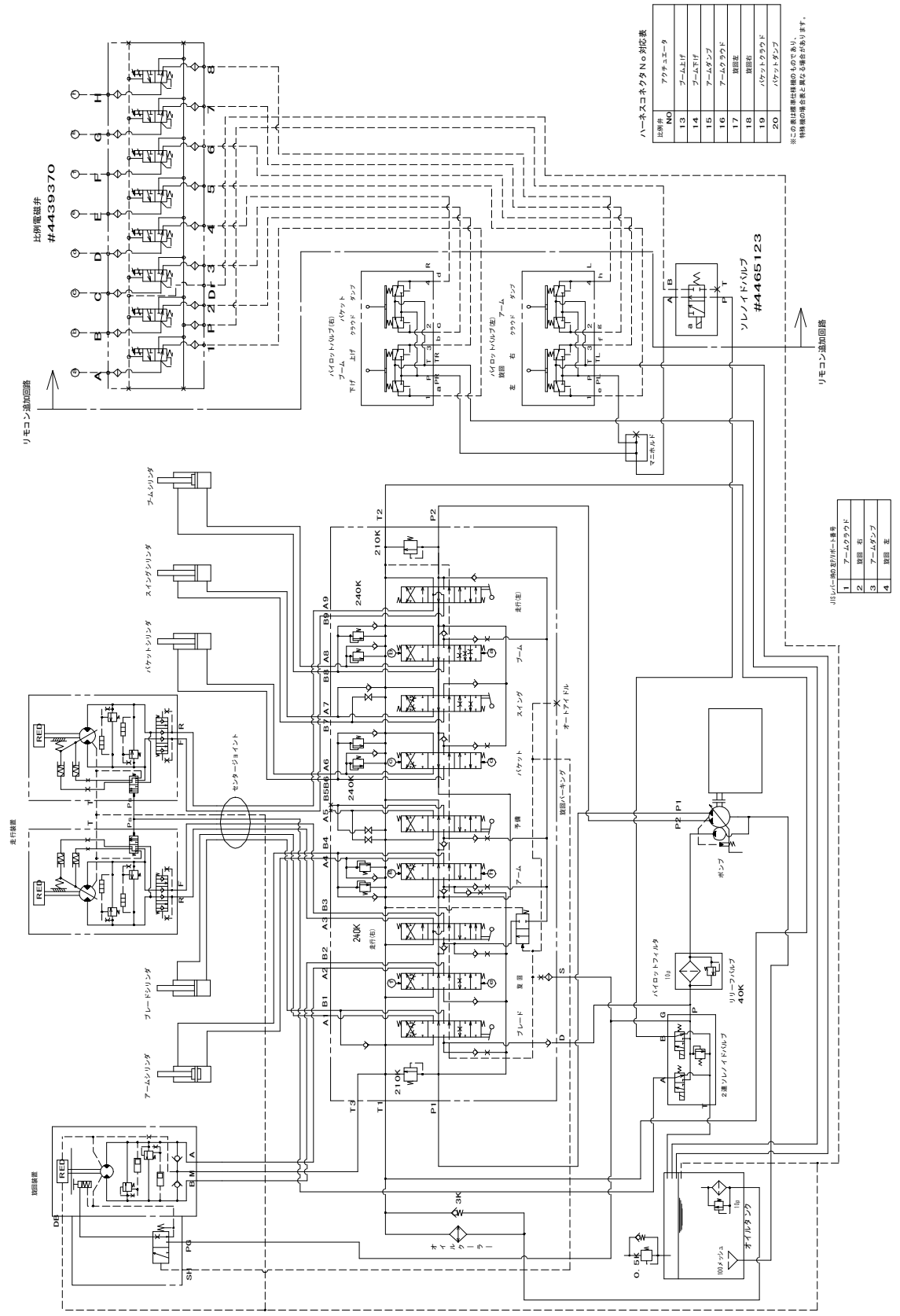


図-4.26 入力電圧ーバルブ開度



図-4.27 非常停止ボタン



ハーネスコネクタNo 対応表

出線件 NO	アタッチメント
13	アーム上げ
14	アーム下げ
15	アーム左
16	アーム右
17	アーム止
18	アームストップ
19	アームストップ
20	アームストップ

※この表は標準仕様機のものであり、
特殊機の仕様と異なる場合があります。

出線品番号対応表

1	アームストップ
2	アーム右
3	アーム左
4	アーム止

図-4.28 陸上実験機油圧回路図

c) 無線式リモコン装置の取付け

陸上での一般的な遠隔操作手法を再現するために無線式リモコン装置を取り付けた。リモコン装置操作部を図-4.29に、リモコン装置受信部を図-4.30に示す。この無線式リモコン装置は一般に市販されているものを利用した。リモコン装置の仕様を表-4.3に示す。



図-4.29 リモコン装置操作部



図-4.30 リモコン操作受信部

表-4.3 リモコン装置仕様

項目	送・受信機
無線局	特定小電力無線局
無線周波数	429MHz帯 40波
送信出力	10mW
到達距離	約100m (使用条件により異なる)
受信出力信号	制御信号出力 シリアル信号
制御器電池	連続使用時間 8時間
受信装置電源	DC18~36V 1A
寸法・質量	制御器 W290×H110×D113mm
	受信装置 W200×H70×D150mm

d) 関節ポテンシオメータの取付

各関節軸に関節角度検出用のポテンシオメータを設置した。ポテンシオメータの構造はボリューム抵抗となっており、回転角度によって出力される電圧が変化する。表-4.4にポテンシオメータの仕様を、図-4.31から図-4.33に各ポテンシオメータの設置状況を示す。

表-4.4 ポテンシオメータ仕様

全抵抗値	2K±20%Ω
出力直線度 (単独)	±3%
出力スムーズネス	0.1%以下 (MIL-R39023 4.6.17)
有効電気角	180±3°
機械的回転角	360° CONT
使用電圧	5VDC
最大定格電力	0.5W (周囲温度25°C時)
絶縁抵抗	10MΩ/500V以上
抵抗温度係数	±700ppm/°C
軸の許容回転速度	900°/s (MAX)
回転寿命	5×10 ⁵ サイクル
軸荷重	ラジアル 50N (ケース取付面より8.5mmの位置)
	アキシテル 20N
軸の回転基準精度	1.5V±0.05V (出力基準穴とキー溝位置が図面位置に合わせた場合の電圧)



図-4.31 ブーム軸ポテンシオメータ取付状況

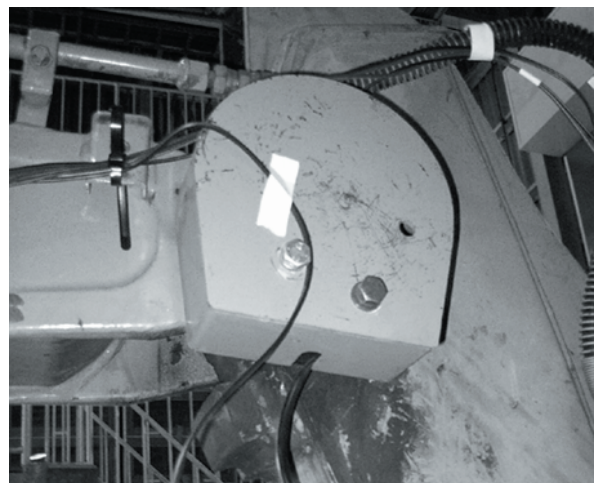


図-4.32 アーム軸ポテンシオメータ取付状況

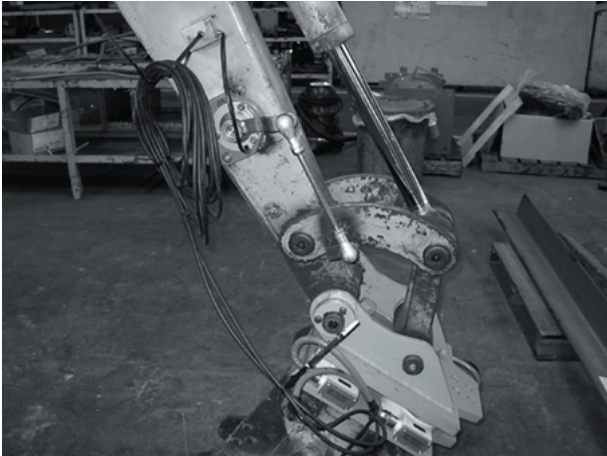


図-4.33 バケット軸ポテンシオメータ取付状況

入力電圧は5Vとなっており、車体の12VバッテリーからDC-DC電源により供給する。

制御システム開発の効率上、制御PCの設置は車外とし、安全対策上その距離は旋回範囲から十分離れたものとした。そのためポテンシオメータからPCへの接続距離はバケット角用ポテンシオメータで約25mであり、電圧によるアナログ信号を送るには非常に長い。さらにその経路にはエンジンやジェネレータ等が存在するため、ノイズや電圧降下が予想される。ノイズ対策として本実験機のポテンシオメータの配線は差動入力とし、使用するケーブルは 0.75mm^2 のシールド線とした。

ポテンシオメータの特性とノイズの影響を調べるため、各関節角を最大及び最小にしたときのポテンシオメータ出力電圧をサンプリングした。サンプリング間隔は100ミリ秒で99回のサンプリングを行っている。図-4.34から図-4.36に各関節における出力電圧の特性を示す。

ブームの場合、電圧の最大値と最小値の幅が約2.1Vであるのに対し、ノイズの振幅が約0.053Vとなった。

この値はブーム角度として約1.9度の振幅になり、無視できない値となる。ノイズの原因は25mの信号ケーブルが関係していると考えられるが、現状ではSlavePCが搭載できないため解決することは難しい。そこで今回はソフトウェア上で10回の平均を取ることでノイズの影響を減らすこととした。この平均化により振幅は0.0249Vに収まった。この場合のブーム角度は約0.9度の振れとなる。

鉛直方向の誤差は最大延長時のブームの誤差に最も影響する。ベースマシンのフロント部を水平に最大延長した場合約4,300mmとなり、この条件でブーム誤差を0.9度とすると鉛直方向には46mmの誤差となる。さらにアーム軸誤差とバケット軸誤差を考慮すると、バケット先端の鉛直方向誤差は92mmとなる。

このようなノイズへの対策としてケーブル長を短くする方法が考えられる。なお、ケーブル長を1mとしたときのノイズ振幅は0.009V程度であった。

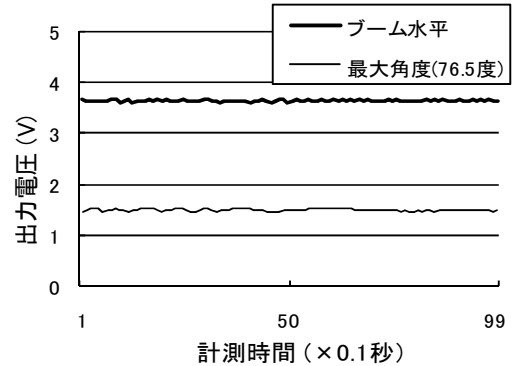


図-4.34 ブーム軸ポテンシオメータ特性

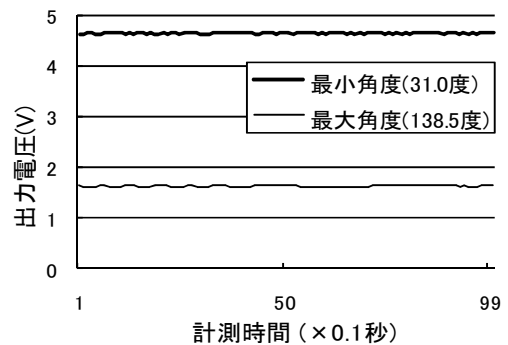


図-4.35 アーム軸ポテンシオメータ特性

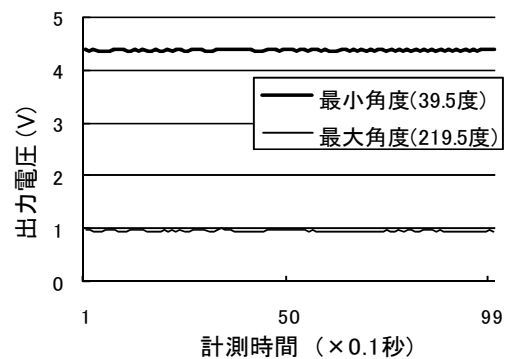


図-4.36 バケット軸ポテンシオメータ特性

e) バケットリンク機構に対する角度計算

ブーム及びアームの関節角度の検出は関節軸に直接ポテンシオメータを取り付けているため、容易に角度を算出できる。しかしバケット軸に関してはリンク機構を介しているため、バケット角度とポテンシオメータ出力電圧の間に比例関係が成立しない。そのためリンク機構の補正式によりポテンシオメータ出力電圧から角度を算出した。図-4.37にバケット軸のリンク機構を示す。

これらのリンクロッドがなす角度はすべて三角関数の加法定理により求めることができる。

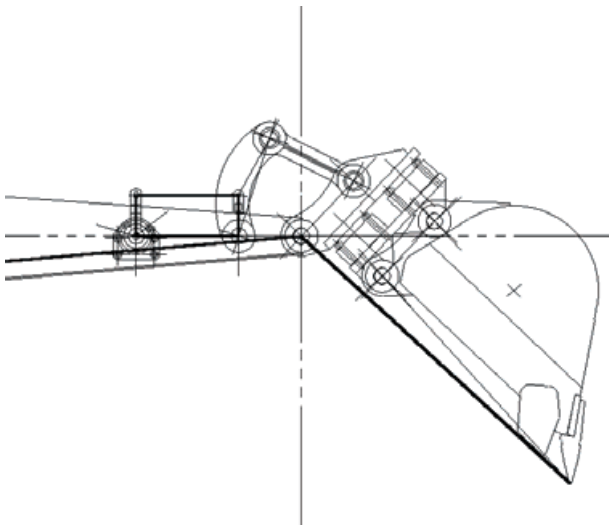


図-4.37 バケットリンク機構

f) 方位センサ

機体位置に関するセンサ類に関しては、傾斜角と方位角の取得のための内界センサとして2軸傾斜計と磁気方位計を設置した。また、旋回体とクローラ部の角度検出には近接センサを用いた絶対値型のセンサ機構を考案した。これは実海域実験を想定した場合、回転機構を有するポテンシオメータでは防水化が困難であることが考えられ、また起動時からの相対値しか取得できない機構だとイニシャライズが必要となり、遠隔操作に適さないためである。

本実験機ではクローラフレームにドグパターンレールを固定し、旋回体に6基の近接センサを二列に配置した移動台を設置した。このように6個の近接センサの値を読み取ることで6bitの分解能をもたせており、約5.6度間隔でクローラの方向を取得する。図-4.38にクローラ旋回角センサの機構図を示す。

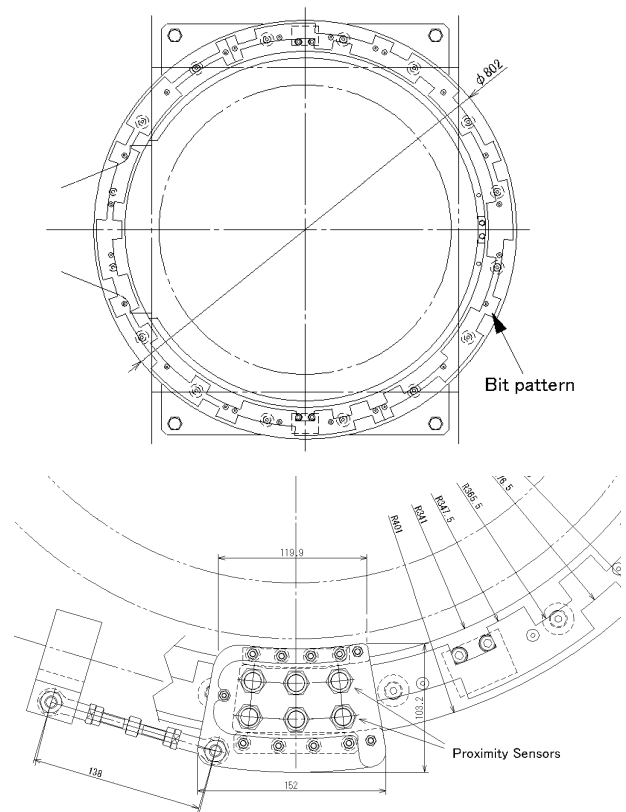


図-4.38 近接センサによるクローラ旋回角計測

g) アタッチメント型反力センサの開発

力逆送型バイラテラル制御によるロボットアームの制御ではアーム先端にかかる力の方向やトルクを計測する六軸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センサは存在しない。そこで本実験機ではバケットにかかるピッチングトルクを計測するための反力センサを新たに製作し取り付けている。機体本体の改造は最小限にとどめたいため、バケット軸にとりつけるアタッチメント方式とした。図-4.39にアタッチメント型反力センサの四面図を示す。図-4.40に取付状況を示す。機構的には平面上に引張圧縮型ロードセルを4基配置したものとし、スラスト方向の応力をキャンセルするため二箇所にストッパピンを設置している。実験機ベースマシンの最大掘削力は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。

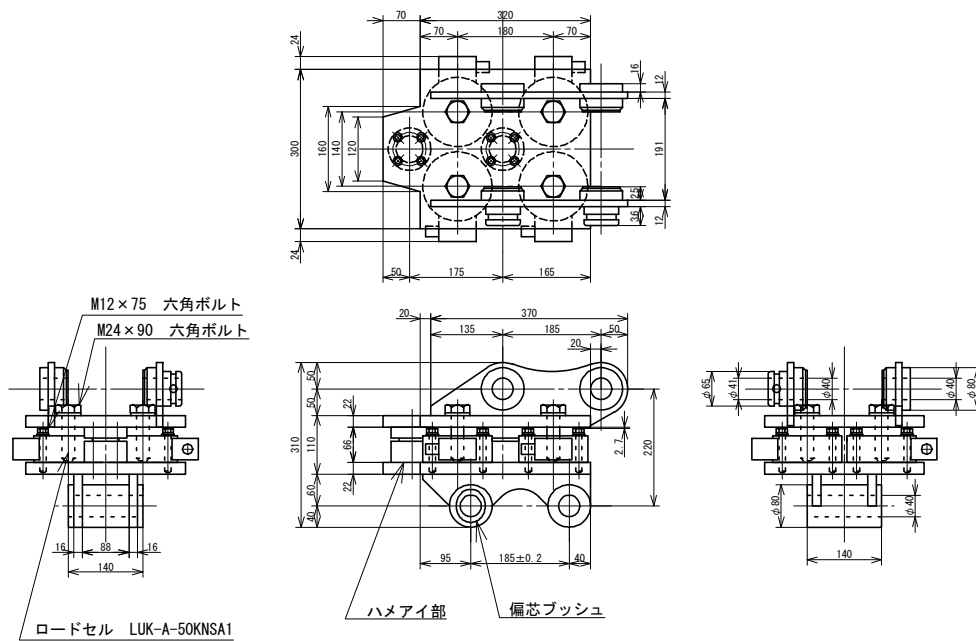


図-4.39 アタッチメント型反力センサ（四面図）



図-4.40 アタッチメント型反力センサ

(3) 制御プログラムの開発

a) D/Aボードによるバルブ制御

実験機の制御はSlavePCに増設したD/Aボードからの電圧出力により行う。表-4.5にD/Aボードの仕様を示す。

バルブドライバの仕様上、制御信号を0Vから5Vのユニポーラ出力とし、2.5Vを中立とした。なお使用するチャンネル数は4チャンネルで、ch1をブーム制御電圧、ch2をアーム制御電圧、ch3を旋回制御電圧、ch4をバケット制御電圧とした。この時点で各電圧出力を単独で制御できる

プログラムを組み動作試験を行った。

バルブドライバの設定により、2.0Vから3.0Vまでをノイズ対策として、0.0Vから0.5Vまでを断線対策として不感帯を設けているため、バルブ制御は2.0Vから0.5V、3.0Vから4.5Vとなっている。

ここで、信号を徐々に大きくし、実際のバックホウシリンダが動き始める電圧を測定する動作試験を行った。動作試験による動作電圧範囲を表-4.6に示す。動作試験の結果、実際の動作は設定電圧と異なることが確認され、この信号電圧と動作が比例しない要因として、シリンダの摩擦抵抗、フロント部の重量が考えられる。

制御プログラムでは動作試験により得られた実動作電圧範囲を利用した。

表-4.5 D/A ボード仕様

出力チャンネル数	8 ch
出力レンジ	ユニポーラ: +10V バイポーラ: ±5V, ±10V
分解能	12 bit
セトリングタイム	10 μs
誤差	±0.4 %
電源仕様	DC +5V, 1.3A
配線距離	2m以下
対応バススロット	
バス仕様	PCIバス (Rev.2.1以上)
占有スロット	1

表-4.6 シリンダ動作電圧範囲

設定電圧 (pull)	2.00V (最小) ~ 0.50V (最大)
設定電圧 (push)	3.00V (最小) ~ 4.50V (最大)
ブーム電圧 (pull)	1.80V (最小) ~ 0.50V (最大)
ブーム電圧 (push)	4.05V (最小) ~ 4.50V (最大)
アーム電圧 (pull)	1.80V (最小) ~ 0.50V (最大)
アーム電圧 (push)	3.60V (最小) ~ 4.50V (最大)
バケット電圧(pull)	1.40V (最小) ~ 0.50V (最大)
バケット電圧(push)	3.70V (最小) ~ 4.50V (最大)

b) A/D電圧入力ボードによる姿勢認識

実験機の機体姿勢は、関節に取り付けられたポテンシオメータからの出力電圧をA/Dボードにより計測し、その電圧値から関節角度を算出することで認識する。表-4.7に使用したA/Dボードの仕様を示す。

表-4.7 A/D ボード仕様

入力チャンネル数	single end 32 ch / 差動 16 ch
入力レンジ	ユニポーラ: +5V, +10V バイポーラ: ±2.5V, ±5V, ±10V
分解能	12 bit
誤差	±0.15% : +10V, ±5V, ±10V ±0.2% : +5V, ±2.5V
電源仕様	DC +5V, 0.7A
配線距離	2m以下
対応バススロット	
バス仕様	PCIバス (Rev.2.1以上)
占有スロット	1

c) 比例制御によるバックホウの遠隔操作

MasterPCからの指令値はバケット先端の座標として渡される。ただしバックホウの場合、ブーム・アーム・バケットの3自由度を有しており、先端座標だけでは関節角度を特定することができない。そこで座標のほかにバケット角度を指令値として送ることとした。

制御は最も単純な比例制御を用いている。指令値から算出した関節角度と機体の関節角度の差が大ききときはバルブ開度を大きくする。実機の動作によりその差が小さくなるにつれてバルブ開度も小さくなる。差が0となる関節角度に達したときにバルブ開度も0となる。

d) 通信プロトコルの決定

MasterPCとSlavePCで通信を行う際にあらかじめ通信内容とそれに対応した変数名、および値域を決定する必要がある。図-4.41にバックホウ制御変数名を示す。表-4.8にMasterPCからSlavePCへ指令を送る通信変数名を、表-4.9にSlavePCからMasterPCに機体情報を送る通信変数名を示す。

本実験機の操作の指令値は、機体の旋回中心を原点としたバケット先端の座標とし、その座標系は正面方向を常にx軸とする旋回体のLocal座標系とした。旋回動作に関してはオープンループ制御とし、指令値は旋回用油圧弁の開度で与えられ、機体情報はブレード方向をx軸としたクローラのLocal座標系を返す。

機体の移動に必要なクローラの制御に関しては、ベアスマシンの機構上、比例電磁バルブを取り付けることができなかったため、現在制御は不可能である。

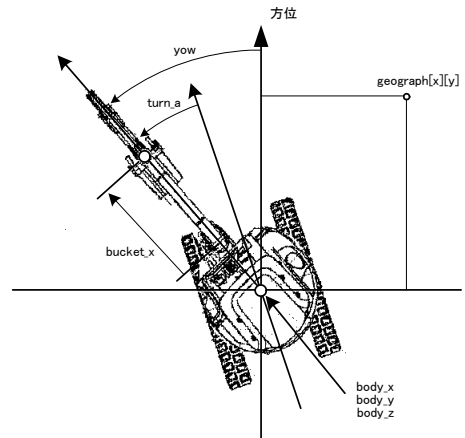


図-4.41 バックホウ制御変数名

表-4.8 MasterPC 指令値変数名

項目	変数名	単位	備考
操作コマンド	command		
チェック用カウンタ	count		
バケット指示座標(X)	bucket_x	m	
バケット指示座標(Y)	bucket_y	m	
バケット指示座標(Z)	bucket_z	m	
バケット角度	bucket_a	rad	
旋回角	turn_a	rad	旋回体のローカル値
クローラ速度(R)	crawler_VR	%	クローラのバルブ開度
クローラ速度(L)	crawler_VL	%	クローラのバルブ開度

表-4.9 SlavePC指令値変数名

項目	変数名	単位	備考
状態	state		
チェック用カウンタ	count		
バケット実座標(X)	bucket_x	m	
バケット実座標(Y)	bucket_y	m	
バケット実座標(Z)	bucket_z	m	
バケット実角度	bucket_a	rad	
機体傾斜(pieth)	pieth	rad	クローラ方向をX軸
機体傾斜(roll)	roll	%	クローラ方向をX軸
機体傾斜(yow)	yow	%	クローラ方向をX軸
ブーム角度	boom_a	rad	
アーム角度	arm_a	rad	
旋回体方位	turn_a	rad	
反カトルク	torque		ロードセルの値

e) 制御プログラムフローチャート

実験機を制御するプログラムは、MasterPCと情報を通信する通信スレッド、機体姿勢を計測・制御する制御スレッド、通信停止などのエラーを監視する監視スレッドを持つ。図-4.42にプログラムフローチャートを示す。

プログラムを実行すると、監視スレッドと通信スレッドが実行される。監視スレッドは100ms毎に実行し、MasterPCから動作開始コマンドを受けるまでバックホウ動作出力信号にリミッタをかけ中立に抑制する。また通信状況を常時監視し、データ通信が300ms以上停止した場合、断線以上と判断しバックホウ動作出力を停止させる。通信スレッドはMasterPCから通信開始コマンドを受けるまで待機する。通信コマンドを受け取ると、通信環境に異常が無いかチェックするためMasterPCとSlavePCの間で一つの変数をインクリメントしながら交互に受け渡しを行い、戻ってきた値が正しい値になっているかを100回チェックする。このチェックが終了すると制御スレッドを実行し、バックホウ姿勢を計測する。

この姿勢情報はMasterPCに送信され、相似形入力装置をバックホウ機体姿勢とシンクロさせる。シンクロに成功すると、MasterPCから動作開始コマンドが送信され、バックホウ動作出力信号リミッタを解除する。ここではじめてバックホウが動作を開始する。

通信スレッドにより受け取った指令値は、計算式によって関節角度に変換される。制御スレッドは実際の関節角度と指令値による関節角度を比較し、その差分がゼロになるよう比例電磁バルブの開度を調節する。

MasterPCから通信停止コマンドを受け取ると、すべてのスレッドを停止させプログラムを終了させる。通信エラーを診断した場合、監視スレッドは継続したまま、通信スレッドを再実行し、姿勢シンクロを再度行い動作開始コマンドを受け取るまでシリンダ動作を停止させる。

f) 断線試験

安全性を確認するため通信ケーブル断線試験を行った。実験機操作中の断線試験は危険なため、バックホウ動作出力信号である電圧値を電圧計で計測した。

試験条件として、MasterPCとSlavePCで通信を開始し制御スレッドが実行された状態で通信ケーブルを抜くことで断線状態とした。

結果として通信ケーブル切断時に2.5Vを出力することを確認した。

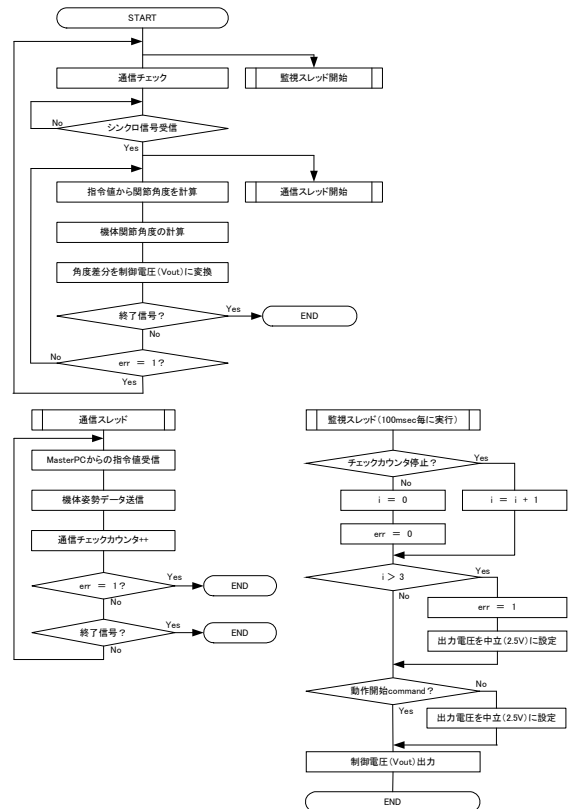


図-4.42 バックホウ制御フローチャート

(4) 基本性能試験

開発した実験機が当初想定した遠隔操作性能を有するとともに、今後、陸上実験を行うために十分な性能を有しているか確認するために動作確認試験を実施した。試験項目としては、遠隔操作性能試験と動作精度試験について行った。また、相似形入力装置を用いた実験は、本動作試験によって実験機の基本性能が確認されてから後に別途行うこととしていることから、実験機への動作指令はバケットの先端座標で行うものとし、相似形入力シミュレートプログラムからダミー信号を通信することで伝達した。

a) 遠隔操作性能試験

実験機へバケットの水平移動、垂直移動および斜め移動を指示した場合のバケット先端の移動軌跡を図-4.43、図-4.44、図-4.45に示す。また、各動作試験における開始指令座標値と終了指令座標値は各図に記載する。どの方向にも指示通りの動きを見せており、基本的な遠隔操作性能には問題がないことが確認された。

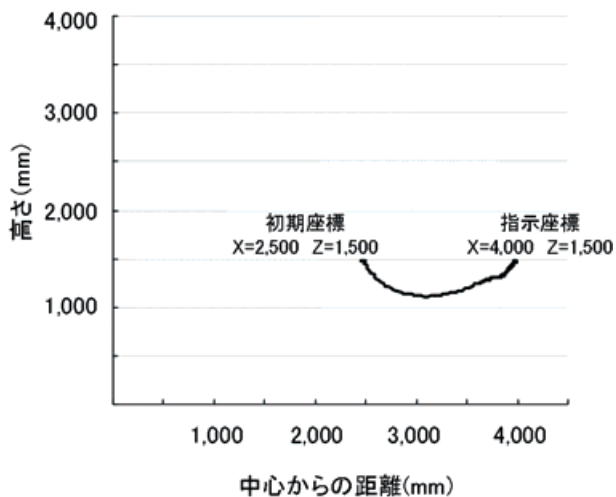


図-4.43 水平移動軌跡

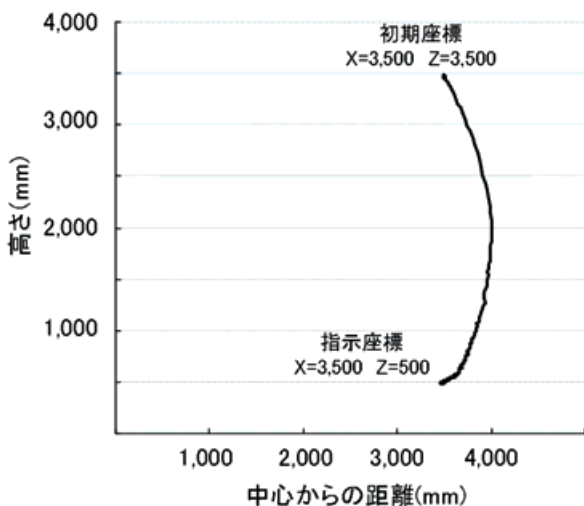


図-4.44 垂直移動軌跡

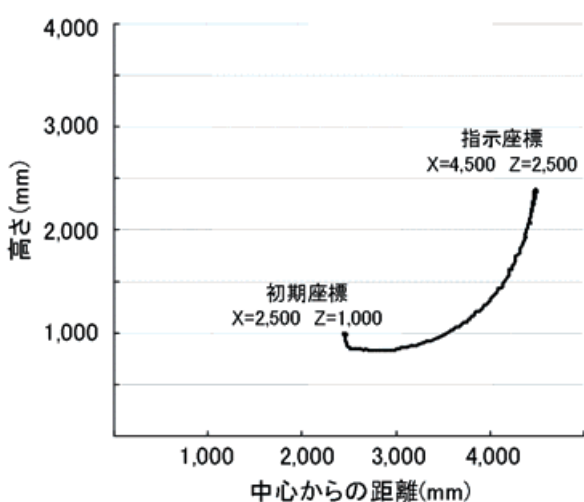


図-4.45 斜め移動軌跡

ただ、指示値は初期座標と終点座標のポイントtoポイントで与えたため、実際の軌跡は曲線を描いている。これ

はある動作指示に基づき、いくつかの油圧バルブが同時に開いた場合、摩擦抵抗の少ない油圧シリンダから動作し始めるためと推察される。機体と相似の関係を持つ相似形インタフェースでは大きな問題とされないと考えられるが、入力座標を速く動かした場合にはこのような現象が起こることを十分認識しておく必要がある。

b) 動作精度試験

指示値に対して実験機がどの程度の精度で動作が可能であるかについて検証した。実験機のバケットの先端位置について、指示値と動作後の位置をトータルステーションによって測定した値を比較した。試験範囲としてはフロント部の可動範囲を考慮して、x方向には2m～4.5m間で、z方向には1m～2m間でそれぞれ0.5mピッチの位置を指示するものとした。なお、すべての試験ケースにおいて、ブーム角最大、アーム角最小およびバケット角最小の位置を試験開始時のフロント部の初期位置とした。

試験結果を図-4.46に示す。これから、試験ケース中で発生した最大誤差はバケット先端が実験機本体と大きく離れるx=4mの場合のもので53mmである。この原因の一つとして、油圧シリンダの制御方法が角度値の差分に基づく比例制御であるため、指示値と測定値の差分が十分に大きい場合は問題ないが、目的位置に近づき差分が微小になった場合、油圧バルブの開度も微小となり、シリンダの摺動摩擦抵抗によって動作が停止してしまうことが考えられる。本実験機を用いた陸上実験では均し作業を±300mmで行うことを目標としており、これに比較して決して無視できない値であるが、動作指令の誤差が施工精度を決定するものではない。すなわち、動作指令によってバケットは対象物と接触し作業を行うわけであるが、この際、動作指示はバケットの動作方向と大まかな動作量を伝えるに過ぎない。また、このように誤差の原因が摩擦抵抗にあるとすれば、実機規模になった場合、形状寸法も大型化するものの油圧パワーも増大し、この動作誤差が寸法比率に従って大きくなるとも考えにくい。また、x=3,000mmまでの近距離では最大17mmの誤差であり、さほど大きくない。したがってこの程度の誤差であれば、実験機の性能として問題ない考える。

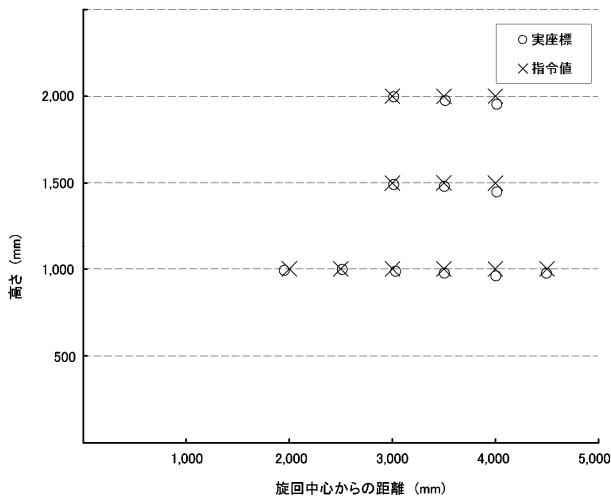


図-4.46 バックホウ先端座標精度

一方、この試験とあわせて、実験機が角度センサの値から演算することによってバケット位置と判断している位置とトータルステーションによって測定した位置を比較した。結果を図-4.47に示す。図から誤差の最大値は11mmである。この原因としては、角度センサとして採用しているポテンショメータの誤差によるものと考えられる。本システムではこのセンサによる演算値に基づき、バックホウの触像による地形描画を行うため、本誤差が前述の誤差より重要であるが、この程度であれば問題にならないと考える。

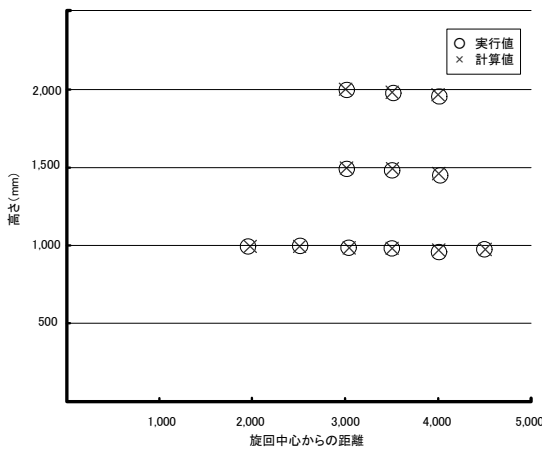


図-4.47 バックホウ先端座標計測精度

c) アタッチメント型反力センサの特性実験

反力センサをバックホウに取り付けた状態でその特性を計測した。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。計測は水平面を0度として-80度から240度までを10度毎に行った。図-4.48にバ

ケット角を示す。図-4.49に実験状況を示す。図-4.50に反力センサ特性を示す。

結果として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について十分機能することを確認した。

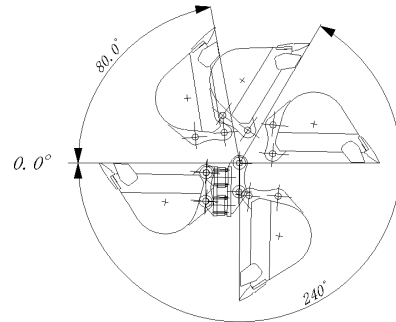


図-4.48 反力センサ特性試験バケット角度設計図



図-4.49 反力センサ特性試験 (荷重50kg, 姿勢220°)

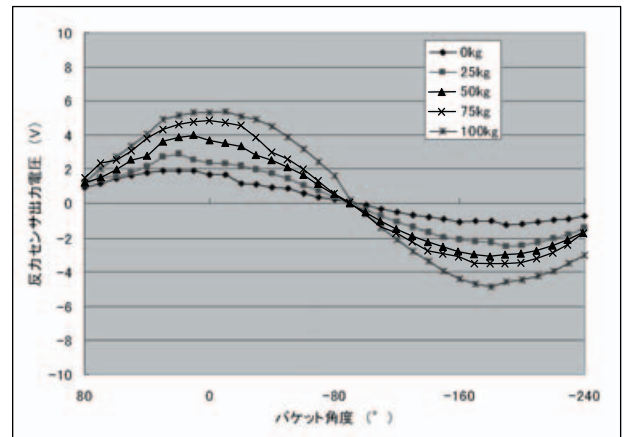


図-4.50 反力センサ特性

4.5 陸上実験

本研究では、施工が可能である条件を前提として、操作装置を選択し、操作効率の評価を行い比較する。また、操作装置の操作効率を評価するためには、基本となる操

作装置を選択する必要がある。現在の最も基本的なバックホウの操作装置は、標準操作方式の操作装置で、搭乗して行う方法である。この操作方法での操作状態を操作効率評価の基本とすることとした。

比較対象として、陸上で実用化されている遠隔操作型バックホウの場合を考える。陸上での遠隔操作は、煙や霧、大雨などの状態を除いては、視界が遮られた状態で行われることはない。このことから、直視やTVカメラといった視覚情報を用いた遠隔操作となっている。陸上での遠隔操作に用いられる操作装置は、オペレータがバックホウ近傍での操作が可能である場合は、小型化した操作装置を首からぶら下げて移動しながら操作ができる携帯型操作装置、オペレータが作業区域に近づくことができない場合などには、TVカメラの映像を用いて作業状況を確認するために、操作室に専用の操作装置とTVモニターを設置して遠隔操作を行う固定式の操作装置がある。操作方式はどちらも標準操作方式となっている。図-4.51に陸上遠隔操作事例を示す。



図-4.51 陸上遠隔操作((財)先端建設技術センター)

(1) 操作性実験

a) ポインティング動作による操作性実験

バックホウの操作装置の操作効率を評価するためには、実際に施工を行うことが、最も正確かつ適切であると考えられるが、実物の施工現場を準備するのは非現実的であり、施工を構成するパラメータが多いために計測に手間と時間がかかる。また、操作効率の評価を行うために、施工内容の標準化を行うことは困難である。

ここで、バックホウの作業は、掘削や転圧、切り崩しなど、どのような作業でもバケットを目標とする位置に移動させたあとに、所要の動作を行う基本動作がある。

そこで、この基本動作の初期動作にあたるバックホウを操作して目標点にバケット先端を一致させる動作を、操作効率の評価対象として採用することにした。この初期動作をポインティングと呼ぶことにする。

ここで、指定された目標点を順次ポインティングすることでバックホウは連続した動作となり、現実の施工状態に近い動作での操作効率を評価ができると考えられる。これをポインティング実験として、操作装置の操作効率を評価する手法とした。

実際の施工では、機械の操作にはスピードと正確性の両方が求められる。このことから、操作効率を示す要素をスピードと正確性とした。スピードを示すものとして指示時間、正確性を示すものとして調整回数とした。

指示時間とは、ある目標点をポインティングしたあとに次の目標点をポインティングするのに要した時間である。調整回数とは、目標点を正確にポインティングするまでに調整を行った回数であり、目標点をポインティングした時も含めて地面に接触した回数を測定した。

ここで、指示時間が短いと操作のスピードが速いことになり、操作効率は良いことになる。また調整回数が少ないと正確にポインティングができたことになり、操作効率は良いことになる。ここで、指示時間が短くても調整回数が多い場合を想定すると、そのポインティングは粗雑な操作と見なすことができ、実際の現場では、出来形を損傷することになり、できればの悪い施工となる。その結果、損傷した部分を修正する作業が発生し、施工効率は悪くなる。

正確性を示すものとしては、位置精度が考えられる。しかし、実際の施工では個々の作業ごとに位置精度を測定しているわけではないことと、一定水準以上の技能を有するオペレータであれば、問題のない範囲の位置精度で作業を行うことができることから、目標とする位置からバケットが外れることがないので、精度として数値を計測することにあまり意味はない。このことから、バケット先端が指定された目標点に移動できたかどうかの判断はオペレータに任せることとした。

b) 実験装置

• JIS型リモコン

リモコン装置の送信機は、作業機械の操作卓をそのまま小型化した形状をしている。操作方法は、搭乗した場合と同じ標準操作方式である。表-4.10にリモコン装置の送受信機とバルブドライバの仕様を示す。リモコン装置送信機の概略図を図-4.52に示す。

表-4.10 リモコン装置送受信機とバルブドライバの仕様

送受信機	無線局	特定小電力無線局
	無線周波数	429MHz帯 40波
	送信出力	10mW
	通達距離	約100m(使用条件により異なる)
	受信出力信号	制御信号出力 シリアル信号
	制御器電池	連続使用時間 8時間
	受信装置電源	DC18~36V 1A
	寸法・質量	制御器 W290×H110×D113mm
		受信装置 W200×H 70×D150mm
	ドライバ	ハードウェア機能仕様
		リレー・電磁バルブ出力 9
		比例電磁バルブ出力 16
		P/A出力 1
		シリアル入出力(RS422) 2
		シリアル入出力(Dr. EX用) 1
構造		アルミダイキャスト
質量		約1.0kg
仕様温度範囲		-30~+70℃
保存温度		-40~+85℃
作動電圧範囲	DC20~36V	

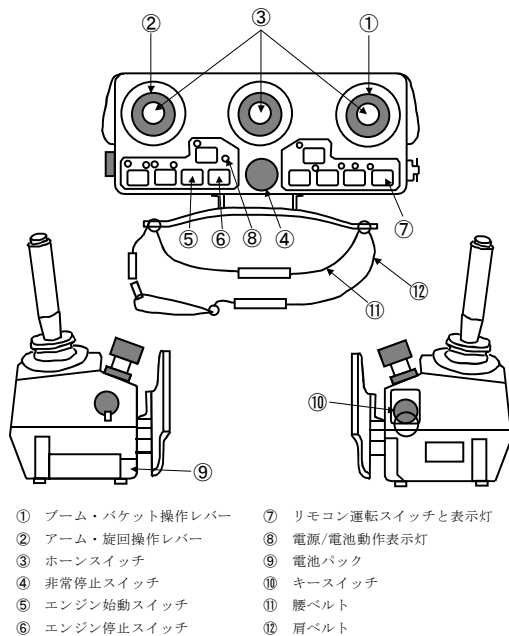


図-4.52 リモコン装置送信機の概略図

遠隔操作は、リモコン装置の送信機側操作レバーの操作に応じて、機体側の比例電磁バルブドライバボードに指令が送信され、比例電磁バルブを遠隔操作する機構となっている。

- TVカメラ設置

リモコン操作と相似形入力装置で遠隔操作するためにTVカメラを設置した。

陸上での遠隔操作事例を参考に全景や側面、バケット部を撮影するTVカメラを任意の場所に設置し、様々なカメラアングルからの映像を取得できるようにした。

- 遠隔制御プログラム

本システムでは入力装置及び陸上実験用バックホウの

制御に関してネットワーク環境に接続できる2台の制御用コンピュータを用いている。以下、入力装置を制御するコンピュータをMaster-PC、陸上実験用バックホウを制御するコンピュータをSlave-PCとする。ネットワークを構築するにあたり考慮した点は、暴走に対する安全対策であり、本システムでは通信環境の状態把握と急激な動作を抑止する機能をSlave-PCにおいて持たせている。これにより通信ケーブル等の異常によりネットワークが切断された場合でも、Slave-PCがスタンドアロンで動作し安全を確保するものとした。

Slave-PCは常に起動しており、Master-PCからCALLコマンドを受けるまで待機する。CALLコマンドを受け付けた後はNETWORK Checkフェーズに移行する。このフェーズでは、Master-PC、Slave-PCが一つの変数について交互に通信を行いカウントアップすることで通信環境をチェックする。

通信環境に問題が無ければSYNCROフェーズへ移行し、バックホウ機体姿勢をMaster-PCに送信する。その姿勢はMaster-PCにおいて描画され、オペレータはその画面上に描画された陸上実験用バックホウの姿勢と相似形入力装置の姿勢を同調させる。両者の姿勢が同調するとMaster-PCからSYNCコマンドを送信し、Slave-PCが受信した時点で遠隔操作が開始される。このSYNCROフェーズによりバックホウの急激な動作を抑止している。

相似形入力インタフェースにおいて入力された関節角度はMaster-PCで演算され、バケット先端座標、バケット角度、旋回速度を指令値として渡される。指令値を受け取ったSlave-PCは先端座標を各関節の角度へ逆演算し、機体姿勢との差分を0にするように比例電磁バルブを制御する。機体の関節角度、バケット先端座標は常に計測しておりMaster-PCへ機体姿勢情報として送信される。またバケットにかかるピッチングトルクを計測しており、機体情報と共に送信される。このピッチングトルクには振動やガタによる接触以外の力も含まれるため、Master-PCにおいてデータを監視し、一定以上の力が同じ方向に0.3秒以上継続した場合、接触として判断している。

Slave-PCでは演算・制御ルーチンのほかに、通信の監視やエラー判定を行うスレッドを独立して持っている。

これは0.3秒以上通信が停止した場合にバックホウの油圧バルブの制御を停止し、安全を確保する。また、Masterからの指令値についても監視しており、実可動範囲を超えた場合はエラーをMasterに送信する。それ以外にも前述したように非常停止スイッチを準備しているが、Slave-PCにも比例電磁バルブドライバキルスイッチを用意した。

図-4.53にSlave-PCに用意した非常停止スイッチを示す。

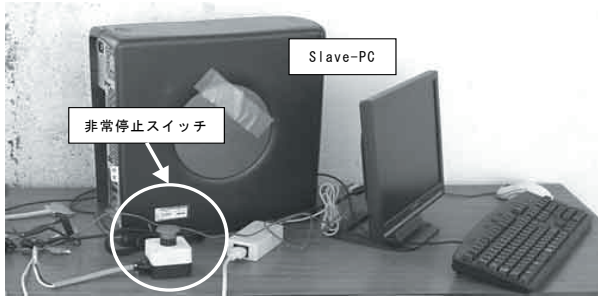


図-4.53 Slave-PC側非常停止スイッチ

c)ポインティング実験（平面）

操作効率の評価実験として、小型バックホウを用いたポインティング実験を陸上で行った。これは、実験フィールドに任意の目標点を複数配置してバケット先端で順次目標点をポインティングし、指示時間と調整回数を計測して、操作装置と操作条件の違いによる操作効率を比較するものである。

指示時間の計測は、スタート位置からバケットを動かした時点で計測を開始し、最終の目標点の指示を完了した時点で計測終了とした。調整回数は、目標点を指示する課程でバケットが地面に接触した回数を計測した。

各実験項目においてポインティングを3回ずつ2人で行い、計6回分の結果から目標点別平均値と1点当たりの平均値を求めた。

操作方法は以下の4種類である。

- 搭乗操作（標準操作方式）
- 直視によるリモコン操作（標準操作方式）
- TVカメラを用いたリモコン操作（標準操作方式）
- TVカメラを用いた相似形入力装置操作

なお走行装置の制御が確立されていないことから実験機の位置を固定として、旋回とフロント装置でのポインティングを行った。

表-4.11に実験の種類と計測データを示す。表中にあるCG描画とはMaster-Slave両方の姿勢をCGでモニタ画面に表示することを示している。

実験フィールドは、水平なコンクリート盤の水平面フィールドと、割り栗石を積み上げて水平面と斜面を組み合わせた形状に造り、実際の地盤状況に近い状態とした立体フィールドの2種類とした。被験者は、バックホウの操作が初心者である2名とした。

平面実験フィールドに格子状に目標点を1m間隔で17点配置して、ポインティングを行ったときに要した時間と調整回数を計測して操作効率を比較した。図-4.54に平面実験フィールドの目標点配置と実験機位置を示す。平面実験フィールドに格子状に目標点を1m間隔で17点配置し

て、ポインティングを行ったときに要した時間と調整回数を計測して操作効率を比較した。なお、それぞれの目標点をポインティングするのに要した指示時間と調整回数は、全景を撮影録画していたビデオから計測した。

表-4.11 指示動作実験の実験種類と計測データ

操作方式	視認方法	反力呈示	CG描画	作業音	計測データ			
					平面指示		立体指示	
					指示時間	調整回数	指示時間	調整回数
搭乗	直視	—	—	有	○	○	○	○
無線リモコン	直視	—	—	有	○	○	○	○
	TVカメラ	—	—	有	○	○	○	○
相似形入力装置	TVカメラ	—	—	無	—	—	○	○
	TVカメラ	有	有	有	○	○	○	○
	TVカメラ	無	無	有	○	○	○	○

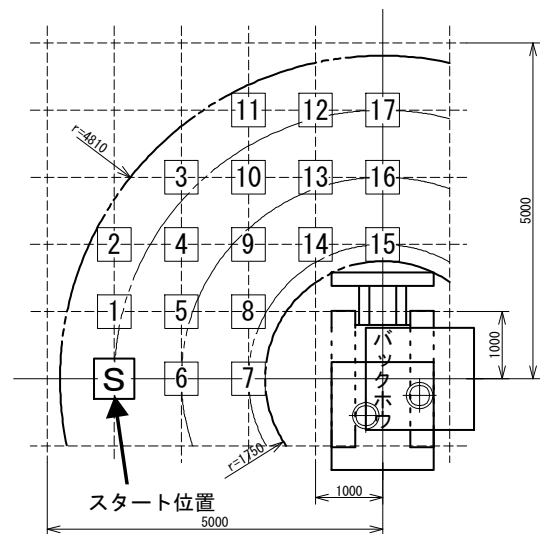


図-4.54 平面実験フィールドの目標点配置と実験機位置

実験種類は、操作方式・視認方法・反力呈示の有無・作のCG描画について分類した。各分類の種別は、操作方式については搭乗操作とリモコン操作、相似形入力装置操作の3種類、視認方法については直視とTVカメラ映像の2種類、反力呈示とCG描画については相似形入力装置を用いた場合に付加できるので、相似形入力装置使用時に反力呈示の有無と動作のCG描画の条件を付加した。図-4.55から図-4.57に各操作方式での操作状況を示す。



図-4.55 平面指示動作実験 搭乗操作状況



図-4.56 平面指示動作実験 無線リモコン操作状況



図-4.57 平面指示動作実験 相似形入力装置操作状況



図-4.58 全景TVカメラ設置位置と映像

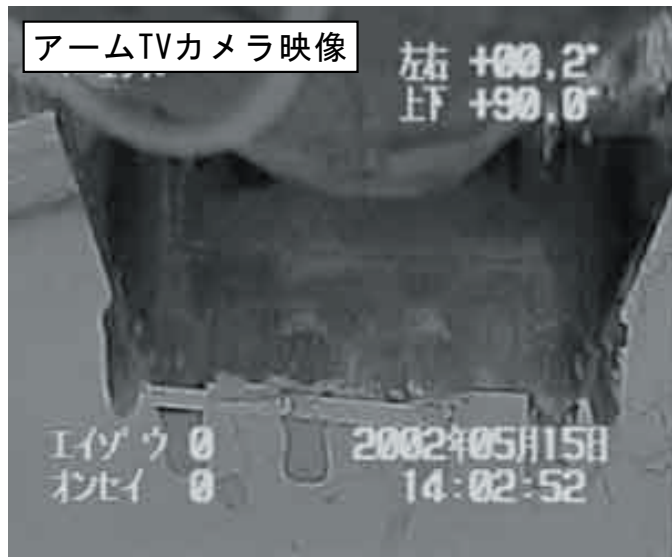
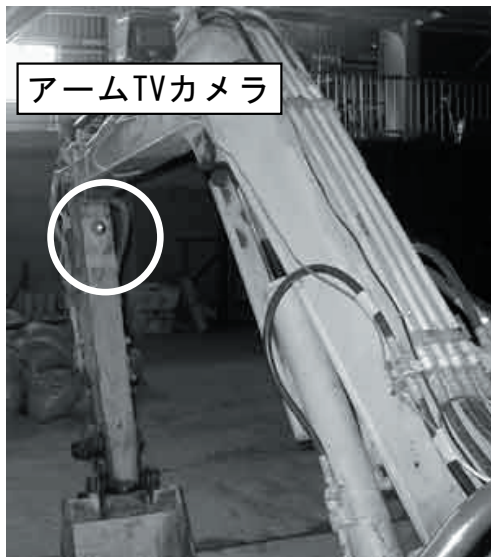


図-4.59 アームTVカメラ設置状況と映像



図-4.60 運転席TVカメラ設置状況と映像

遠隔操作時のTVカメラの配置は、全景を撮影するビデオカメラを実験機の前方の上方位置に、バケット部を撮影するTVカメラを運転席とアームに設置した。また、操作者の操作状況をビデオカメラで撮影した。図-4.58から図-4.60にTVカメラ設置位置と静止画像を示す。

それぞれの被験者から得られた実験結果のデータを、

実験項目別に指示時間と調整回数について目標点別平均値を算出した。また、全点合計から1点当たりの平均値と操作装置別の平均値を算出した。指示時間の平均値を算出した表を表-4.12に示し、調整回数の平均値を算出した表を表-4.13に示す。その結果をグラフ化したものを図-4.61に示す。

表-4.12 平面指示動作実験 指示時間の平均値表

操作方式	搭乗	無線リモコン		相似形入力装置	
		直視	TVカメラ	TVカメラ	
視認方法	直視	直視	TVカメラ	有	無
反力呈示	—	—	—	有	無
C G 描画	—	—	—	有	無
作業音	有	有	有	有	
1	12.67	17.41	38.03	14.88	20.69
2	16.64	18.83	26.06	19.44	19.06
3	15.72	22.21	34.73	15.43	18.43
4	17.53	17.63	31.90	19.01	13.67
5	14.78	18.08	24.66	15.87	19.23
6	13.49	17.56	23.22	13.54	13.88
7	18.83	14.55	34.84	14.05	13.15
8	14.68	20.92	32.98	16.10	16.37
9	17.53	20.41	29.67	12.35	16.32
10	14.88	17.72	28.32	15.60	18.86
11	14.81	15.53	34.57	12.95	12.11
12	14.80	20.73	17.66	14.21	22.50
13	14.10	13.27	20.19	19.14	17.38
14	15.32	18.89	23.01	12.50	13.34
15	14.63	21.28	25.88	16.73	15.02
16	13.95	18.68	28.36	13.78	12.14
17	13.02	14.52	20.04	14.34	11.45
合計	4:17.37	5:08.22	7:54.12	4:19.92	4:33.62
平均	15.14	18.13	27.89	15.29	16.10
操作別平均	15.1	18.1	27.9	15.7	

表-4.13 平面指示動作実験 調整回数の平均値

操作方式	搭乗	無線リモコン		相似形入力装置	
		直視	TVカメラ	TVカメラ	
視認方法	直視	直視	TVカメラ	有	無
反力呈示	—	—	—	有	無
C G 描画	—	—	—	有	無
作業音	有	有	有	有	
1	1.3	1.3	1.7	1.2	1.0
2	2.0	1.3	1.5	1.2	1.0
3	1.3	1.5	2.2	1.0	1.0
4	1.2	1.2	1.7	1.4	1.2
5	1.2	1.0	1.3	1.4	1.0
6	1.3	1.5	1.7	1.0	1.4
7	1.7	1.0	2.8	1.0	1.0
8	1.0	1.5	2.5	1.3	1.0
9	1.3	1.7	2.0	1.0	1.0
10	1.7	1.0	1.8	1.5	1.0
11	1.3	1.3	2.7	1.3	1.0
12	1.2	1.7	1.7	1.2	1.2
13	1.3	1.2	1.8	1.2	1.0
14	1.2	1.0	2.3	1.0	1.0
15	1.3	1.5	2.8	1.4	1.0
16	1.2	1.3	1.7	1.9	1.0
17	1.3	1.5	1.7	1.3	1.2
合計	22.8	22.5	33.7	21.1	17.9
平均	1.3	1.3	2.0	1.2	1.1
操作別平均	1.3	1.3	2.0	1.1	

結果として、搭乗操作と直視によるリモコン操作は、指示時間と調整回数に大きな違いはない。しかしTVカメラを用いたリモコン操作では、指示時間が増加し調整回数も多くなっている。

これは、両方とも操作装置が標準操作方式であることから、操作装置による操作効率の低下ではなく、視覚情報の劣化によるものと考えられる。

ここで、搭乗操作と相似形入力装置での操作は、ほぼ同じ指示時間・調整回数でポインティングできていることから、TVカメラで発生した視覚情報の劣化による操作効率の低下を相似形入力装置で補うことができたと考えられる。また、相似形入力装置での操作では、反力の呈示がある方が若干速く指示できている。

操作方法別で1点あたりに要した指示時間を比較すると、搭乗操作：15.1秒、直視によるリモコン操作：18.1秒、TVカメラを用いたリモコン操作：27.9秒、相似形入力装置操作：15.7秒となった。調整回数を比較すると、搭乗操作：1.3回、直視によるリモコン操作：1.3回、TVカメラを用いたリモコン操作：2.0回、相似形入力装置操作：1.1回となった。

このことから指示時間は、搭乗操作、相似形入力装置操作、直視によるリモコン操作の順に良い結果となり、調整回数は、相似形入力装置操作、搭乗操作、リモコン操作、TVカメラを用いたリモコン操作の順に良い結果となった。

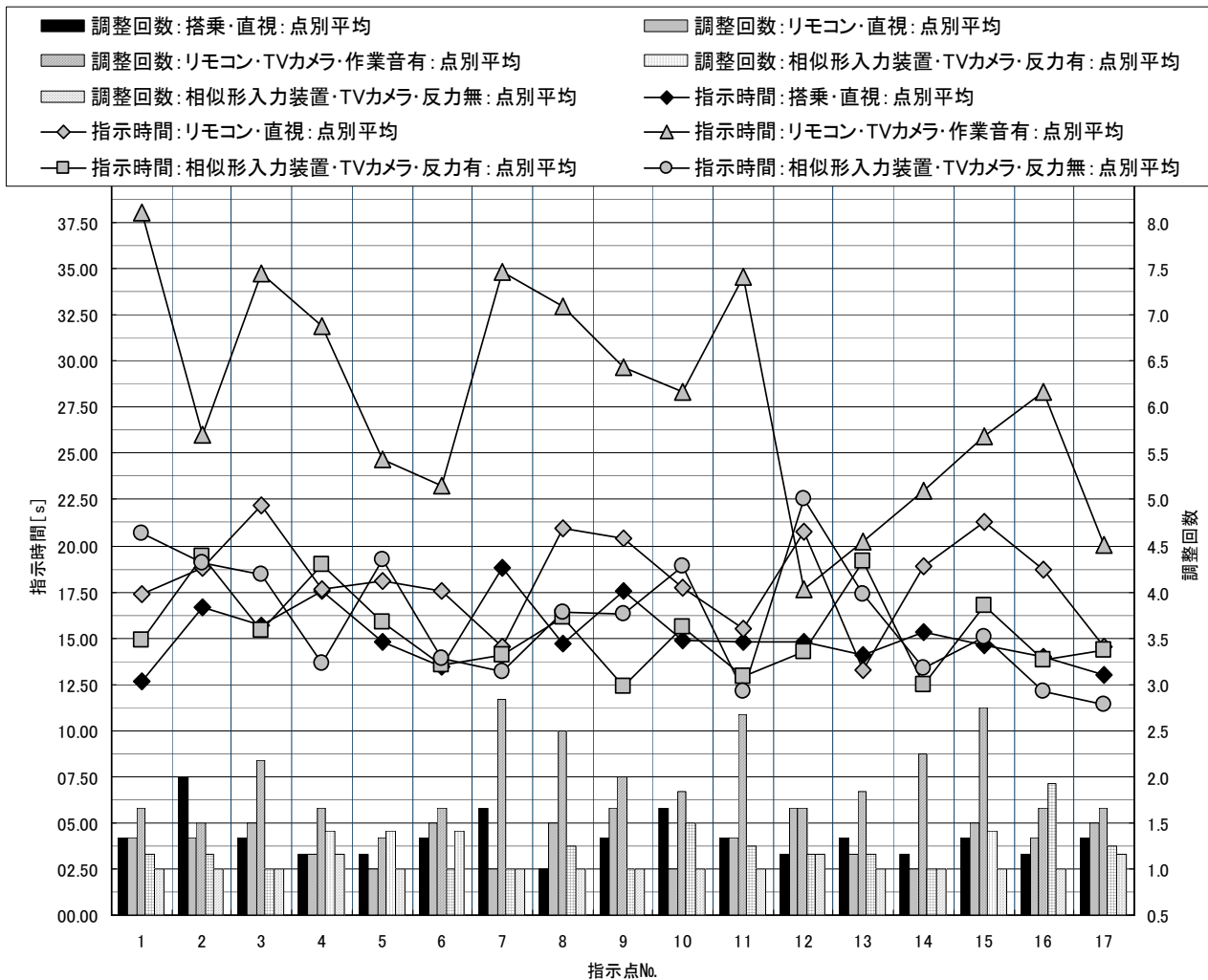


図-4.61 平面指示動作実験 実験結果グラフ

次に、直視によるリモコン装置での遠隔操作時に目標点をバケットで指示した時に、実験機の位置と向きに対してオペレータが操作を行っていた場所をプロットしたものを図-4.62に示す。

図-4.62の0度が機体側を示しており、プロット位置が0度に近いほど運転席に近いことを示している。凡例のAとBはオペレータの区別である。

オペレータはバケットの横方向から遠隔操作を行っており、主にバケットの左側やや後方に立って目標点を見て操作を行っていたことがわかる。

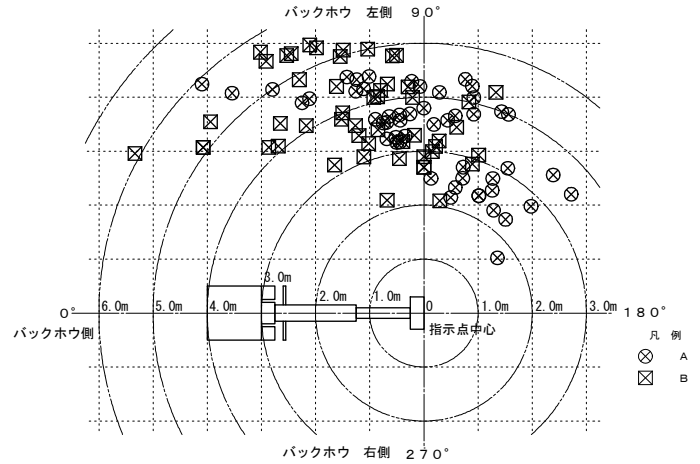


図-4.62 無線リモコン操作時オペレータ操作位置図

d) ポインティング操作実験 (立体)

立体実験フィールドの各平面に沿って格子状に目標点を1m間隔で11点配置して、ポインティングを行ったときに要した指示時間と調整回数を計測して操作効率を比較した。図-4.63に立体実験フィールドの目標点配置と実験機位置を示す。

ポインティングは番号順に行い、それぞれの目標点をポインティングするのに要した指示時間と調整回数は、全景を撮影録画していたビデオから計測した。

また本実験では、TVカメラを用いたリモコン操作時にオペレータを隔離して、作業音が聞こえない環境でポインティングを行う条件も追加した。この実験から、作業音の有無による操作効率への影響を調査した。

図-4.64から図-4.66に各操作方式での操作状況を示す。

TVカメラの配置は、全景を撮影するTVカメラを実験機左後方の位置に、バケット部を撮影するTVカメラを運転席・実験機側面の2箇所に設置した。図-4.67から図-4.69にTVカメラの設置位置と静止映像を示す。

平面の場合と同様の方法で算出した結果を表-4.14と表-4.15に示し、グラフ化したものを図-4.70に示す。

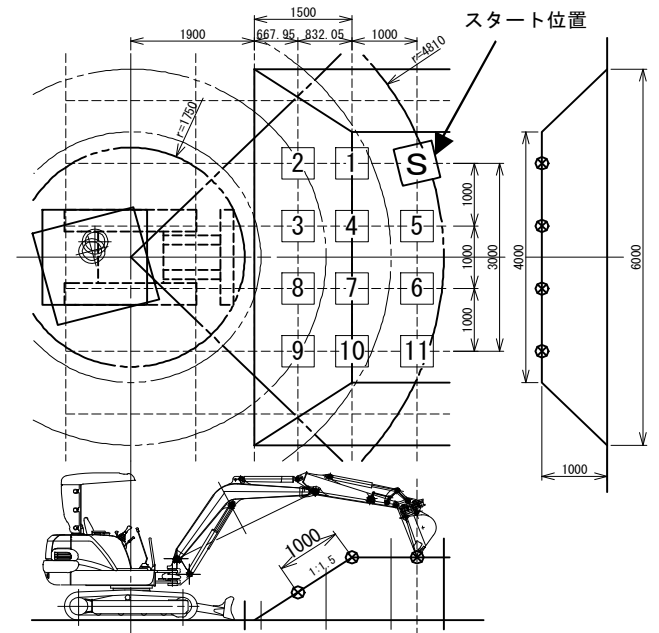


図-4.63 立体実験フィールドの目標点配置と実験機位置



図-4.64 立体指示動作実験および搭乗操作状況



図-4.65 立体指示動作実験 無線リモコン操作状況



図-4.66 立体指示動作実験 相似形入力装置操作状況



図-4.67 全景TVカメラ設置状況と映像



図-4.68 側面TVカメラ設置位置と映像



図-4.69 運転席TVカメラ設置状況と映像

表-4.14 立体指示動作実験 指示時間の平均値

操作方式	搭乗	無線リモコン		相似形入力装置		
		直視	TVカメラ	TVカメラ	TVカメラ	
反力呈示	—	—	—	有	無	
C G 描画	—	—	—	有	無	
作業音	有	有	有	無	有	
1	07.78	08.07	15.99	14.18	21.39	16.52
2	07.36	09.18	17.48	17.65	18.09	16.28
3	07.31	11.27	18.43	18.78	16.12	17.34
4	05.42	07.89	14.86	12.46	14.03	13.07
5	06.43	07.95	13.25	14.39	12.37	11.27
6	05.12	06.88	08.29	16.01	14.96	15.36
7	07.12	07.38	12.63	18.00	18.46	20.07
8	07.85	09.72	14.81	21.79	15.69	17.62
9	05.94	09.78	15.54	17.42	14.71	12.80
10	06.62	07.31	13.36	13.96	17.42	15.32
11	07.55	10.77	15.39	18.67	13.34	14.14
合計	1:14.50	1:36.20	2:40.05	3:03.31	2:56.58	2:49.79
平均	06.77	08.75	14.55	16.66	16.05	15.44
操作別平均	6.8	8.8	15.6	15.7		

表-4.15 立体指示動作実験 調整回数の平均値

操作方式	搭乗	無線リモコン			相似形入力装置	
	直視	直視	TVカメラ		TVカメラ	
反力呈示	—	—	—		有	無
C G 描画	—	—	—		有	無
作業音	有	有	有	無	有	
1	1.5	1.2	1.3	1.7	1.2	1.0
2	1.2	1.0	1.0	1.7	1.2	1.0
3	1.0	1.2	1.3	1.2	1.0	1.0
4	1.0	1.2	1.8	1.3	1.0	1.2
5	1.0	1.2	1.2	1.2	1.0	1.0
6	1.0	1.2	1.2	1.7	1.2	1.2
7	1.0	1.0	1.5	2.0	1.0	1.0
8	1.0	1.2	1.2	2.0	1.0	1.2
9	1.0	1.0	1.3	1.5	1.0	1.0
10	1.0	1.0	1.5	1.5	1.0	1.0
11	1.3	1.0	1.5	1.3	1.0	1.0
合計	12.0	12.0	14.8	17.0	11.5	11.5
平均	1.1	1.1	1.3	1.5	1.0	1.0
操作別平均	1.1	1.1	1.4		1.0	

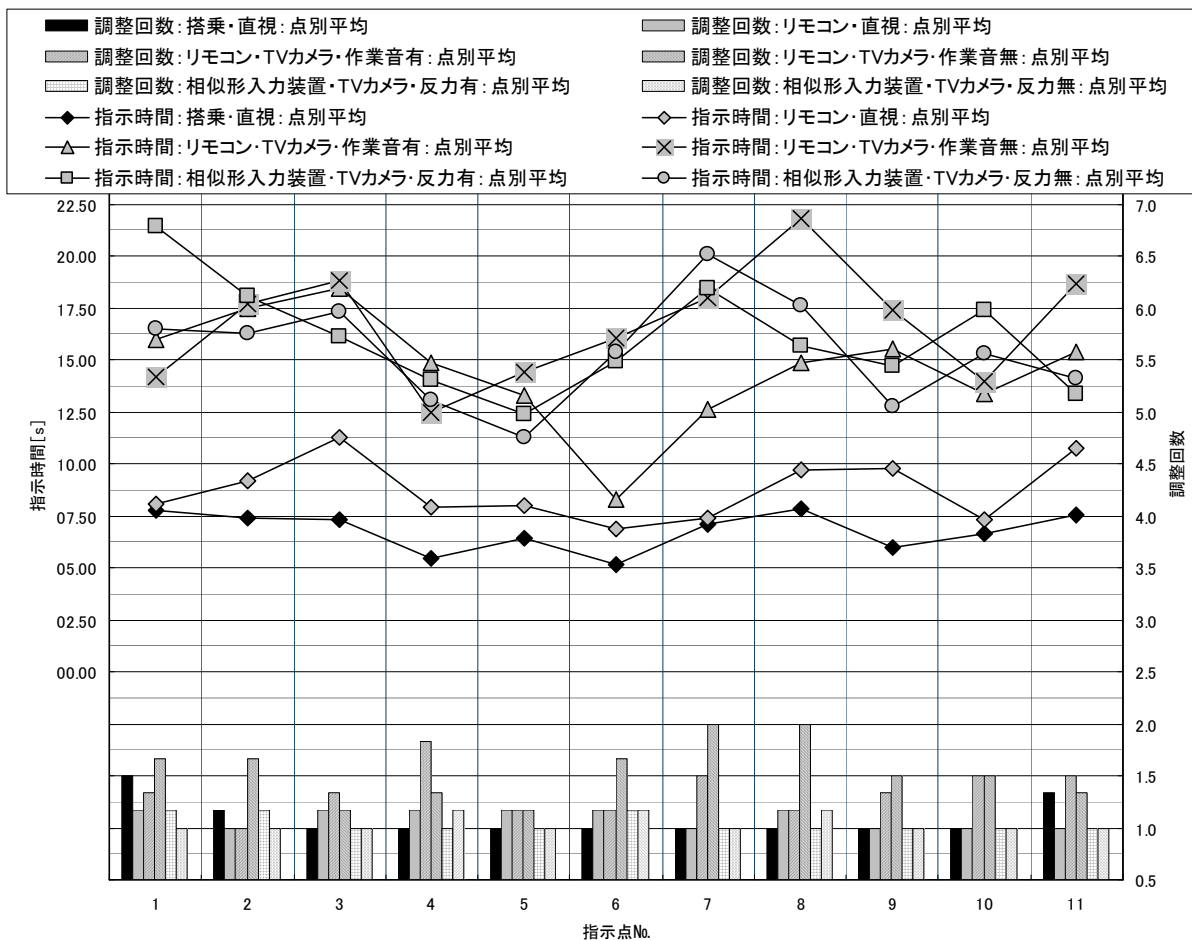


図-4.70 立体ポインティング実験結果まとめ

操作方式別で1点あたりに要した指示時間を比較すると、搭乗操作：6.8秒、直視によるリモコン操作：8.8秒、TVカメラを用いたリモコン操作：15.6秒、相似形入力装置操作：15.7秒となった。調整回数を比較すると、搭乗操作：1.1回、直視によるリモコン操作：1.1回、TVカメラを用いたリモコン操作：1.4回、相似形入力装置操作：1.0回となった。

このことから指示時間は搭乗操作、直視によるリモコン操作、TVカメラを用いたリモコン操作、相似形入力装置操作の順に良い結果となり、調整回数は相似形入力装置操作、搭乗操作、直視によるリモコン操作、TVカメラを用いたリモコン操作の順に良い結果となった。

点別に比較すると、どの操作形式でもグラフの山と谷の位置がほぼ一致していることから、同じ目標点では、同じような割合の時間がかかっていることがわかった。

平面指示動作実験では、視覚情報の劣化による操作効率の低下を相似形入力装置で改善できたが、立体指示動作実験では、指示時間はTVカメラを用いたリモコン操作と変わりなく、調整回数は搭乗操作と変わらなかった。

つまり、調整回数が少なくほぼ1回でポインティングできているにもかかわらず、指示時間が増加している。これは、位置を認識することに時間を要していると考えられる。

ここで、各目標点の高さが一定であるコンクリート盤の平面実験フィールドと違い、立体実験フィールドは割

り栗石を積み上げられ形成されていることから、各目標点に高低差が生じている。

目標点の高さが一定である平面実験フィールドにおけるポインティングは、全ての目標点の高さは最初のポインティングで認識することができるが、目標点の平面的な位置は、目標点ごとに認識する必要がある。このことから、高さのズレを認識するよりも、平面的なズレを認識することが重要であった。以上より、平面実験フィールドでポインティングを行うには、TVカメラの映像をさほど相互に見返す必要がなかった。しかし、目標点の高さが一定ではない立体実験フィールドにおけるポインティングは、平面的な位置のズレに加えて高さのズレを目標点ごとに認識する必要がある。このことから、立体的な位置を認識するためには、TVカメラの映像を何度も相互に見返してズレを認識するために、指示時間を多く要したと考えられる。そして、平面指示動作実験の結果から、相似形入力装置の操作効率で高い正確性を確認しているため、ポインティングには調整回数を要しなかったと考えられる。

e) ポインティング実験のまとめ

基本となる操作装置の操作性を搭乗操作と定め、搭乗操作の操作効率を示す要素である指示時間と調整回数の1点当たりの平均値を1.00として、これに対する各実験項目における指示時間と指示調整回数を算出した。表-4.16に各実験項目における操作効率比較を示す。

表-4.16 各実験項目における操作効率比較

操作方式	視認方法	反力呈示	CG描画	作業音	平面指示動作実験				立体指示動作実験			
					1点当たり平均指示時間比較		1点当たり平均調整回数比較		1点当たり平均指示時間比較		1点当たり平均調整回数比較	
					指示時間	対搭乗直視	調整回数	対搭乗直視	指示時間	対搭乗直視	調整回数	対搭乗直視
搭乗	直視	—	—	有	15.14	1.00	1.30	1.00	06.77	1.00	1.10	1.00
無線リモコン	直視	—	—	有	18.13	1.20	1.30	1.00	08.75	1.29	1.10	1.00
	TVカメラ	—	—	有	27.89	1.84	2.00	1.54	14.55	2.15	1.30	1.18
相似形入力装置	TVカメラ	有	有	有	15.29	1.01	1.20	0.92	16.05	2.37	1.00	0.91
	TVカメラ	無	無	有	16.10	1.06	1.10	0.85	15.44	2.28	1.00	0.91

操作装置と操作条件による操作効率の比較を、ポインティング実験の結果を参考として、以下に考察する。

・ 平面指示動作実験

平面指示動作実験結果から搭乗直視1.00に対して、リモコン操作にした場合の指示時間と調整回数はそれぞれ1.20, 1.00となり、視認方法を直視からTVカメラにすると1.84, 1.54となった。さらに操作装置を相似形入力装置にすると1.01, 0.92となった。このことから、TVカメラを用いた遠隔操作で、リモコン装置を相似形入力装置に変更することによって、指示時間は45%減少し、調整回数も40%減少したので、操作効率が改善されたことになる。これは、搭乗操作とほぼ同程度の操作効率であり、操作の正確性を示す調整回数では、搭乗操作を上回る能力が確認できた。

この結果は、相似形入力装置の有効性を示している。標準操作方式操作装置である搭乗操作とリモコン操作は、ブーム・アーム・バケットをそれぞれ独立して作動させるために、どの部材を動かせば良いのかを考えながらの操作になる。それに対して相似形入力装置での操作はペン先を目標とする位置に持っていきだけで、ブーム・アーム・バケットが連動して作動するため、フロント部の姿勢を把握しにくいTVカメラの場合においても、直感的な操作が可能であると考えられる。

・ 立体指示動作実験

立体指示動作実験の結果からは、操作方式を搭乗からリモコン操作にすると搭乗直視1.00に対して指示時間と調整回数は1.29, 1.00となり、視認方法を直視からTVカメラにすると2.15, 1.18となった。さらに操作装置を相似形入力装置にすると2.37, 0.91となった。このことからTVカメラを用いた遠隔操作でリモコン装置を相似形入力装置に変更することで、指示時間は10%増加し、調整回数は23%減少した。操作のスピードを示す指示時間では効率が低下したが、操作の正確性を示す調整回数では効率が向上した。平面指示動作実験で、相似形入力装置の操作効率の有効性が確認されていることから、目標点とバケット先端の立体的な位置のズレを早く認識することを、CGなどで補うことができれば、指示時間が短縮され操作効率が改善されると考えられる。

・ 作業音の影響

操作環境情報提示の比較として、作業音の有無による比較と反力提示の有無による比較を行った。作業音の有無による比較は平面指示動作実験のTVカメラを用いたリモコン操作で行い、反力提示の有無による比較は平面指示動作実験と立体指示動作実験のTVカメラによる相似形入力装置で行った。

作業音がある場合に対して作業音が無い場合は、指示時間と調整回数共に15%増加した。このことから作業音は有用と考えられる。

・ 反力提示の影響

反力提示がある場合に対して反力提示が無い場合は、平面指示動作実験において指示時間で5%の増加、調整回数で8%の減少、立体指示動作実験において指示時間で4%の減少、調整回数では増減なしであり、反力提示による操作効率に影響はない。

・ 改良点の抽出

相似形入力装置の現状での特性から、以下に説明する2点の改良点を抽出した。

- 本実験では、旋回を行う操作はイスを回転する動作で旋回を行った。しかし、旋回を停止させる中立範囲が狭く、被験者は旋回を停止しているつもりでも機体が旋回していたことが多く見受けられ、タイムロスが発生していた。また、この方法ではオペレータは足で床を踏ん張って体をひねる運動になり、操作するにはかえって疲れることがわかった。このことから、旋回操作方法を改善することにより、相似形入力装置での指示時間を短縮できることが考えられる。
- 標準操作方式の操作装置では、オペレータは手首の動作だけの操作であるので、疲労感をあまり感じずに操作することができたが、相似形入力装置では腕を持ち上げた状態で操作することと、現状では足の踏ん張りや体のひねりなど体全体での操作となり疲れやすく、長時間の操作に疲労度が大きいことがわかった。

また、相似形入力装置での遠隔操作における操作環境から、以下に説明する1点の改良点を抽出した。

- 立体指示動作実験において、指示時間で良好な結果が得られなかった、しかし問題点が立体的な位置のズレを早く認識することであることから、この問題を解決することにより、指示時間が短縮され、操作効率が改善されることが考えられる。

さらに相似形入力インタフェースのみに焦点を絞って問題点を調査した。

① モータ軸の強度不足

相似形インタフェースの3つのモータはモータの軸と

リンクが直結されており、両者はイモねじを使って固定している。しかし根元の2軸についてはモータの軸とイモねじの接触面積が小さいため大きなトルクを発生させると、そこに応力が集中しモータの軸が削れ、モータが空回りすることがあった。そこで、根元の2軸については軸とリンクを分離し、何らかの伝達機構を使って動力を伝達することとした。この候補としては歯車、チェーン、タイミングベルト、スチールベルトが挙げられる。

この中でもタイミングベルトは自由に可動範囲を設計できる。アイドラも小さく調整も容易である。長さもいろいろ選べ、減速比も選べる。

そこで、タイミングベルトを使って動力を伝達することとし、手元のスペースを確保するため、根元軸より200mm下にモータを配置することとした。モータは同一の物を使用するが、タイミングベルトの減速比を2分の1にすることでモータ軸に加わるトルクを軽減、タイミングベルトのプーリーはモータの軸に合わせてDカットの穴をあけ、イモねじでしっかり固定することとした。

② グリップにおける安全スイッチの押しづらさ

バックホウの誤作動を防ぐために確実にグリップを握っているときだけバックホウを動作させる必要がある。このためグリップにタッチスイッチが取り付けられていたが、スイッチ部分が小さいため押しにくく、またグリップを動かすとスイッチから手が離れてしまうため操作が困難であった。

そこで、グリップ部分を長軸方向に半分に分割し、ちょうつがいのように回転するようにした。片側にスイッチの土台を固定した。もう片側は真鍮のパイプを切って作製しスイッチの押下部分に接触するようにした。これによりグリップのどこの部分を把持してもスイッチが入るようにした。

③ 防水・防塵対策

実海域実験では、波しぶきや雨、埃などが装置にかかる可能性がある。この被害が想定されるのは、実験船への機材の搬入出時で、想定箇所はPC、コネクタ類、エンコーダの結線部分である。PCについては、ノートパソコンを用いることとし、搬入出時には、ケースにしまうことで対処する。また、コネクタ類は防水コネクタを使用し、ケーブルについてもロボット用の柔軟でノイズや耐熱耐油性のケーブルを用いることとした。また、ユーザの手元位置のスペースを多くするため、モータの取り付け位置を変更することとした。これによりエンコーダカバーも取り付けが可能となった。

④ 可動範囲

現在の装置は、使用しているバックホウ（日立Ex-30）

の可動範囲と同一であった。しかしながらバックホウ本体のリンクにおけるガタの影響や、相似形インタフェースと本体のリンクの角度差によるPD制御を用いているため、可動範囲の両端までバックホウのリンクを動かすことが出来なかった。そこで各リンクが実際の可動範囲より若干多めに回ることが出来るように可動範囲を設定する。また、インタフェースの縮尺を10分の1としていたが、実海域実験で用いる水中バックホウの10分の1スケールは操作範囲が人間の動作範囲に比べて大きくなるため、スケールを20分の1とした。

⑤ リンク強度

各リンクの強度として、使用時よりも未使用時に通行人の体にあたるなど、リンクの横方向からの力に対する強度が弱い可能性があるとの指摘があった。そこで、リンクの厚みを現在の10mmから15mmに変更した。

⑥ 可搬性

現在のシステムは相似形インタフェースが椅子に取り付けられており、遭遇型インタフェースやディスプレイ、クローラ制御用のジョイスティックも取り付けられている。このため、実海域実験等での持ち運びが容易に出来る必要がある。

以上の問題点を考慮して、相似形インタフェースのみを製作し、モータドライバや電源などはボックスを用意してその中に取り付け、ボックスの上に相似形インタフェースを搭載することとした。また、搬送時にリンクが周囲の物体と衝突することを避けるために、カバーを付けることとした。遭遇型インタフェースは反力を相似形入力装置のモータで出力することで省力した。

図-4.71に改良型相似形入力インタフェースを示す。

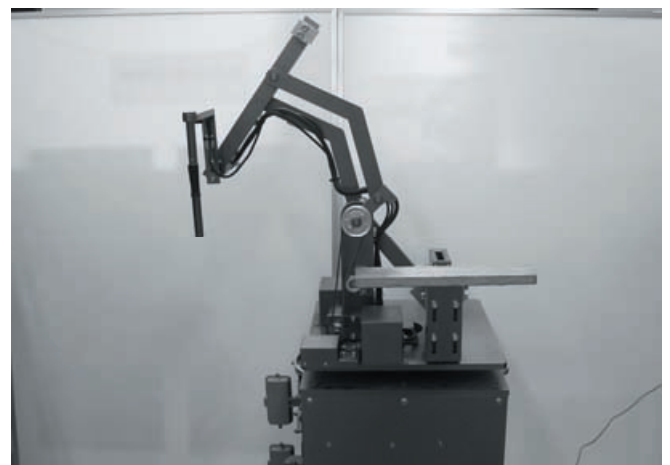


図-4.71 改良型相似形インタフェース

・ TVカメラアングルの利用

平面指示動作実験における直視によるリモコン操作で行ったオペレータの操作位置の調査では、オペレータの位置の変化は遠隔操作を行いやすいアングルが存在することを示しており、TVカメラの映像やCG映像など、どのようなモニタ画面においても、遠隔操作を行いやすいアングルが存在すると考えられる。この実験結果は、水中施工のAR用仮想映像の設計に反映できると考えられる。

f) ポインティング実験結論

操作効率を評価し比較できる手法であるポインティング実験を考案し、その実験から視認方法の違いと操作装置の違いによる操作効率を比較した。得られた実験結果を考察することで、以下の結論が得られた。

- ① 操作効率を比較する操作装置を選定した。
- ② バックホウの操作効率を評価するポインティング実験を考案した。
- ③ 平面指示動作実験において、視覚情報が劣化した環境での遠隔操作で、相似形入力装置による操作効率の改善を確認した。
- ④ 現状の相似形入力装置では長時間の操作には疲労度が大きい。
- ⑤ 相似形入力装置による操作で、反力呈示の有無による操作効率への影響はほとんどなかった。
- ⑥ 作業音は操作効率向上に有効である。
- ⑦ 相似形入力装置の旋回指令方法を改良する必要がある。

立体指示動作実験においては、立体的な位置認識力が低かったが、CGなどで補うことができれば、操作効率を改善できると考えられる。

以上より、視覚情報が劣化した環境において、遠隔操作型バックホウの操作効率改善には、相似形入力装置が有効であることを確認できた。また、改良すべき点が明らかになった。

(2) 力覚呈示による地形呈示（高さ判別）

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。

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250mm, 200mm, 150mm, 100mm, 50mm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-4.72に実験状況を、図-4.73に判別実験の正当率を示す。



図-4.72 地形認識基礎実験状況

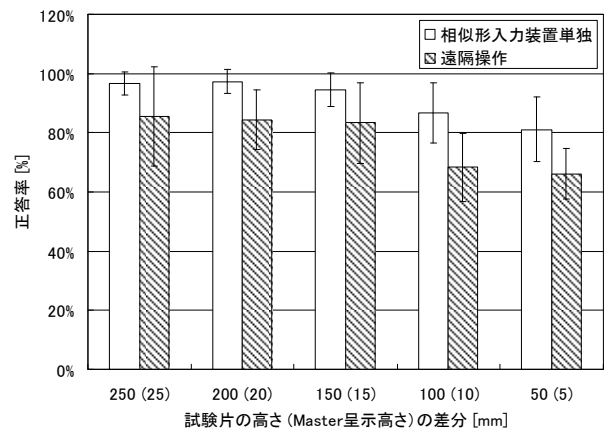


図-4.73 判別実験の正答確率

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150mm以上で8割以上、100mm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0.3秒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で表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呈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。

(3)直線軌跡精度（水平引き動作）

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、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と考えたためである。

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。

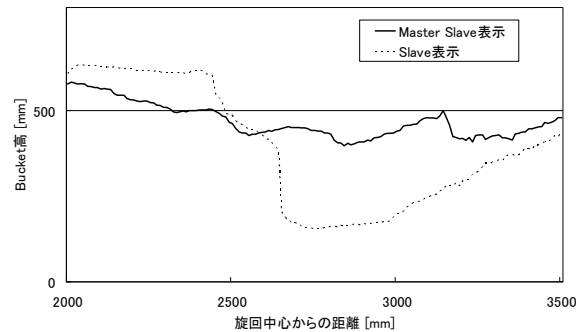


図-4.74 水平引きの軌跡（被験者D, 3回目）

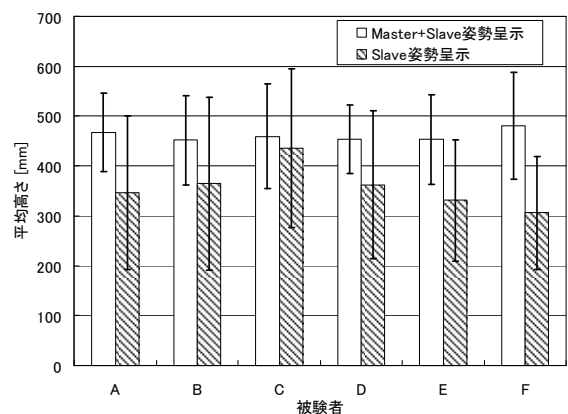


図-4.75 水平引き動作の精度

図-4.74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-4.75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関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。

(4)直線均し実験

開発した実験装置を用いて、対象物を見ることなく所定の精度で作業が可能か検証する実験を行った。バックホウの基本動作を考えると、旋回などで方位を決めてから均し動作を行うため、触像による均し作業の基本性能を計測するため直線のみでの均しとした。10cm間隔での均し精度を評価対象とし、施工後に実際の地形形状を計測したデータと比較する。

地形形状計測はトータルステーションを用いた。対象物として粒径150mmの割栗石を用いた。図-4.76に実験対象となる石山を示す。

オペレータは制御室において遠隔操作を行った。この制御室は窓が覆われており、オペレータが得ることができる情報はComputer Graphicによるバックホウ姿勢と、相似形入力装置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。

本実験の目的はシステムの有効性の確認であるため、作業時間は評価対象として使用せず、地形が施工目標とほぼ一致したとオペレータが判断した時点で実験を終了することとした。図-4.77に制御室全景を示す。

作業を開始するにあたりオペレータが最初に行ったのは触覚による形状認識であった。これは対象となる石山の形状を認識する必要があるためであり、この認識によって石材の効率的な移動が可能となる。形状を把握した後には均し作業を開始した。Computer Graphicには60cmの高さに施工目標ラインを表示しており、オペレータはこのラインを目標に均し作業を行った。

この均し作業時には触像データをバックホウの動作にリンクして適宜更新している。

図-4.78に均し作業後のモニタ画像を示す。なお、この時の地形データはファイルとして出力される。測量的様子を図-4.79に示す。

遠隔操作による慣らし作業の結果を図-4.80に示す。本図はバックホウ側面側から見たときの地形高さを示しており、「触像地形」は施工後の触像の最終形状、「作業前」

および「作業後」は施工作業前後にトータルステーションで計測した実際の地形形状を表している。また、その時の施工精度を表-4.17に示す。

この結果、触像の最終形状と実際の地形の差は、平均-32mm、標準偏差28mm、最小-72mm、最大52mmであり、荒均しの管理基準である ± 300 mmを満たしていることが確認された。



図-4.76 実験対象石山



図-4.77 遠隔操作制御室

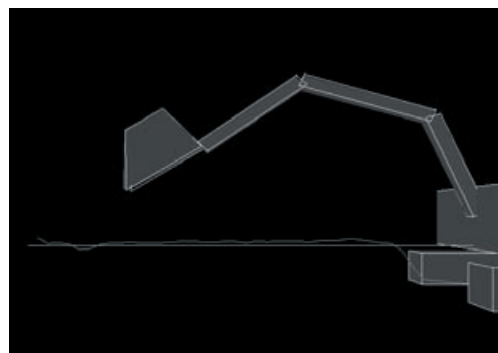


図-4.78 施工後の触像 CG



図-4.79 マウンド測量の様子

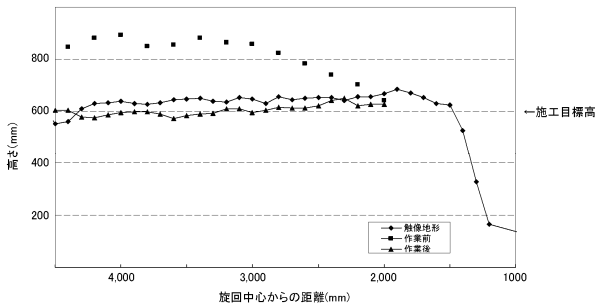


図-4.80 マウンド測量結果

表-4.17 施工精度 (mm)

	平均	最小	最大
触像 - 目標	36±26	-49	67
実地形 - 目標	5±19	-31	50
実地形 - 触像	-32±28	-72	52

図-4.80では、トータルステーションによる実測地形と触診による地形データに5cm程度の差がみられた。ほぼ全域で地形データより実測値のほうが低く、この原因としてはブーム軸にガタが存在しているためと考えられる。

いままでの調整等はすべてコンクリートの地面を対象に行っており、その場合、地面に接触するとガタが上に寄って、そのあとにセンサの閾値を超えて接触を判断するので特に問題となる値は出なかった。しかし実際に作業を行うと、前後やバケットのピッチング動作によって、ガタが上に寄る前にセンサの閾値を超えてしまい接触と判断してしまっただけではないかと考えられる。このように関節のガタによるものはその誤差の値が作業内容によって変化するため、ソフト的に補正することは難しい。より精度を高めるにはセンサを改良するなどの工夫が必要である。

もう一つの原因は、接触したときの更新手法によるものである。現在のアルゴリズムは接触した最初の高さを

記録しており、同じ接触ポイントでバケット先端が石山に突き刺さっても高さの更新はされない。そのため、触像による地形が高めになったものと考えられる。

これは常に更新すると、接触したまま止まっても前後の高さまでもが補正されてしまうためである。ただし一度接触判定がなくなるか、または接触したまま前後に動いて別の場所に移動したときには更新される。

接触検出用の力センサは、バケット先端が地面と接触した場合だけでなく、バケットに土砂が入っている場合やバケット背面による転圧時にも反応する。つまり接触点がバケット先端なのか、バケット背面なのかを判別することができない。

現在の触像変形アルゴリズムでは、接触点はバケット先端位置としているため、本来とは異なる位置に地面があるとになってしまう場合がある。バケットの姿勢に応じた更新手法、たとえばバケット背面がバケット先端よりも下にある時は背面の形状に沿って変形する、さらにはバケット内の土砂の有無を推定するなどの開発や、バケットとは別に触診専用のセンサ機構が必要となる可能性もある。

以上のように、触像生成アルゴリズムは求められる精度に応じて今後も改良が必要である。

(5) 扇面均し作業

前項において引き込み押し込み動作における均し作業精度が確認できた。本項では前項の実験に旋回動作を加え、扇面上の均し作業実験を行う。

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-4.81に実験範囲を、実験場の様子を図-4.82に示す。

地形が施工目標とほぼ一致したと被験者が判断した時点で実験を終了することとした。

被験者は窓が覆われた制御室において遠隔操作を行った。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、相似形入力装置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。図-4.83に制御室内での操作状況を示す。

作業を開始するにあたり被験者が最初に行ったのは触覚による形状認識であった。これは対象となる石山の形状を認識する必要があるためであり、この認識によって石材の効率的な移動が可能となる。形状を把握した後に

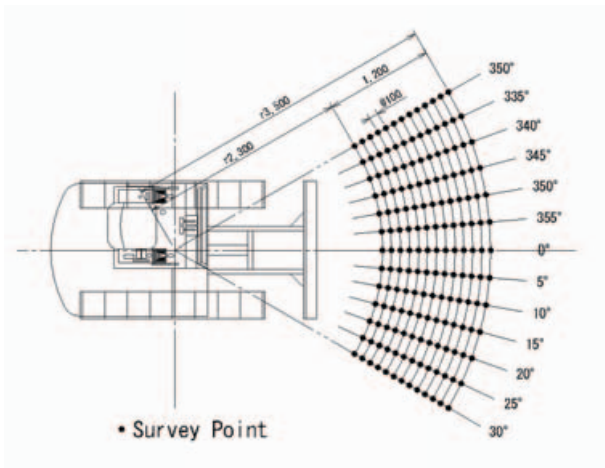


図-4.81 実験評価範囲



図-4.82 無視覚遠隔操作実験状況



図-4.83 制御の状況

均し作業を開始した。CGには300mmの高さに施工目標ラインを表示しており、オペレータ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。

a) 施工精度結果

作業は搭乗操作及び触像を用いた遠隔操作を行い、作業前と作業後に評価点の高さを測量した。作業はそれぞれ6回行ったが、遠隔操作の一回目において作業終了直前に接触による再測量を行わなかったため、引き込みライン間に山が残ってしまった。遠隔操作ではそのケースを除いた5回分のデータを、搭乗操作では標準偏差が最も大きかった3回目のデータを除いた集計結果を表-4.18と表-4.19に示す。本表はそれぞれの操作法における評価点169点の5回分、計845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。

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。

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たと言える。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考えられる。図-4.84に作業前の石山の形状を、図-4.85に遠隔操作による均し作業後の様子を示す。

表-4.18 搭乗操作による均し精度 (mm)

	AVERAGE	STANDARD DEVIATION	MAX	MIN
INITIAL FORM	572	106	808	288
WORK RESULT	306	19	391	243

表-4.19 接触情報を用いた遠隔操作による均し精度 (mm)

	AVERAGE	STANDARD DEVIATION	MAX	MIN
INITIAL FORM	559	98	839	246
WORK RESULT	280	23	384	194



図-4.84 作業開始前のマウンド形状



図-4.85 遠隔操作作業後のマウンド形状

b) 施工時間

前述の実験において各作業時間の計測を行い、搭乗操作との比較を行った。この施工時間に関する結果も遠隔操作1回目、搭乗操作3回目のデータを除いた計5回のデータを集計することとした。時間計測は遠隔操作の場合、コンピュータの動作時間を記録したものを利用し、搭乗操作では撮影したビデオ映像から計測した。計測結果を表-4.20に示す。

今回の実験では丁張りとして水糸を目標高さより+50cmの高さに張っており、搭乗操作ではその水糸を目印に行った。この水糸からの高さ確認のため作業中において3~4回中断しているが、この中断時間は作業において必要な工程であると判断し、作業時間に含めている。

遠隔操作時の平均作業面積は約4.0㎡/hであり、搭乗操作と比較して約60%程度の施工能力であった。これは作業後に作業面全面について接触による測量を行ったためである。これは目で見て不陸が判断できる搭乗施工と異なり、引き込み動作に発生した山をCGだけでは認識できなかったため、ほぼ全点について再確認を行ったことが原

因である。この確認時間の影響が大きく施工能力に大きく影響した結果となった。

なお、最後に均し結果を再確認しなかった1回目の場合を考えると施工能力は6.2㎡/hであった。このことから最終的な確認時間を短縮させるには、バケットの幅を広げる、引き込み動作のラインをラップさせる、1ラインを完成させてから次のラインに移動するのではなく広い面積を少しずつ均していく等といった操作法の改良を行うことで解決できると考えられる。

また、搭乗操作では作業前の丁張り作業が必要であり、また作業後の測量は別途行う必要があることを考慮すると、終了後の測量を省略することで搭乗操作と同等以上の施工能力を有していると言える。

表-4.20 作業時間と単位時間あたりの作業面積

		1	2	3	4	5	6
搭乗操作	作業時間	0:38:47	0:32:44	0:41:45	0:31:50	0:42:09	0:33:15
	㎡/h	6.0	7.1	5.6	7.3	5.5	7.0
遠隔操作	作業時間	0:37:41	0:55:04	1:01:52	0:56:46	0:57:00	1:00:42
	㎡/h	6.2	4.2	3.8	4.1	4.1	3.8

c) 本システムのもつ測量誤差の検討

本システムでは施工と同時に測量を行うことが特徴であるが、その接触による測量がもつ誤差について検討する。作業終了後にトータルステーションにより測量したデータと本システムで計測された地形データから、両者にどれだけの差があるか比較した。両データを比較したものを表-4.21に示す。

その結果、実際の地形より平均26.8mm下回った値となった。この原因としてバケットのツメによる溝が考えられるが、今回利用した対象物が150mmの碎石であり、目標とする作業を±300mmの荒均しであることを考慮すると、誤差の範囲内であると言える。

しかし、本システムではバケットの幅より狭い範囲の不陸は認識できない。例えば一箇所だけ突出している石があった場合は、その周辺がすべて同じ高さとして認識してしまう。逆に、一箇所だけ穴があった場合は穴を認識できないという欠点がある。この欠点はバケットを触診端として利用している限り解決する手段は無く、±50mmの本均しに対応させるには解像度の細かいセンサを別途用いる必要があると考える。

表-4.21 測量値と触像データの差分 (mm)

	1	2	3	4	5	6
差分	-42	-19	-35	-37	-19	-23
標準偏差	39	30	19	19	30	23

(6) 触像を用いた遠隔操作システムの適応結果

油圧を動力源とする実験機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ディレイが存在していたが、位置対称型と力逆送型を組み合わせた制御手法を用いることで安定した制御を行っており、さらに作業反力の提示によりディレイに影響されない施工状況の認識が可能であった。さらに直線均し、扇面均し実験により、実際に均し作業を行った結果、施工基準に十分な精度を持つことが確認された。

このような結果から、本遠隔操作システムで用いた要素技術が油圧を動力源とする作業機械に適応することができたとと言える。割石の大きさや出力の違いなどの条件は異なるが、制御手法や周辺機器等の基本となる部分は水中実機と同じであり、本遠隔操作システムが実機レベルでも適応可能であると考えられる。

4.6 実海域作業実験

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の姿勢を重量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。

なお実海域作業実験における被験者は潜水士作業従事者免許を所有し、水中バックホウに搭乗しての作業経験を持つ潜水士により行う。

(1) 実海域実験装置の開発

a) ベースマシン

実海域実験機は、当研究所と共同研究を行っている佐伯建設工業（株）所有の水中バックホウビッククラブ3号（以下BC3）をベースマシンとした。BC3は過去に水中遠隔操作を考慮した改造を施しており、比例電磁バルブ等基本的な装備が備わっている。水中バックホウBC3の全景を図-4.86に示す。



図-4.86 水中バックホウ全景

b) 主な改造内容

今回の改造では油圧動力実験機と同等のセンサを取り付け、搭載PCおよびセンサアンプ等を入れた制御用密閉容器を設置した。制御用密閉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ている。内部には制御機器類のほか、無停電電源装置を設置しており、断線や停電などに備えた。さらにバックホウセンサの生データを台船上から監視するため、モニタ、キーボード、マウスを遠隔地で利用できるコンソール延長器を設置しており、これを利用して搭載PCのリポートやプログラム修正が可能である。

角度センサは防水対策から機械的に回転部分のあるポテンショメータをやめ、直動磁歪センサを油圧シリンダ側面に設置し、跳石をガードするフレームを取り付けている。また実海域実験用に追加したセンサとして、水中でのバックホウ位置を測定するためのSBLトランスポンダと水圧計を設置した。水圧計のデータによりバックホウの水深を計測するため、20mの測定レンジにおいて誤差0.15%の高精度な水圧計を利用している。

水圧計を利用した際に発生する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する。磁気方位センサ、FOGは油圧動力実験機のを流用しており、磁気方位センサはポリウレタン樹脂による密閉を、FOGは制御用密閉容器内に設置している。

反力センサはバックホウ出力に合わせて±200kNのロードセルに変更したものを新たに製作した。この反力センサは衝撃荷重を考慮し、皿バネを介し力感知する機構に変更している。設置したセンサに関する情報を図-4.87から図-4.89に、水密容器内に設置した機器とその系統図を図-4.90、図-4.91に示す。使用した機器の一覧を表-4.22に示す。

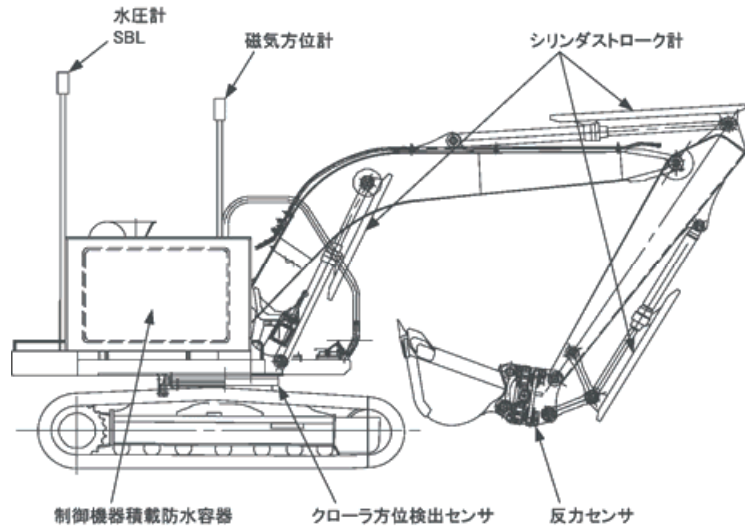


図-4.87 センサ配置図

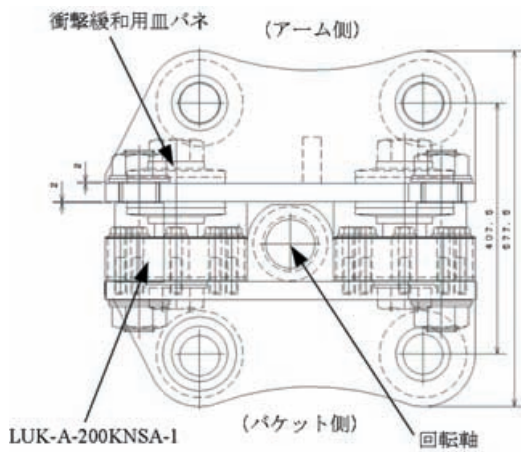


図-4.88 水中用反力センサアタッチメント

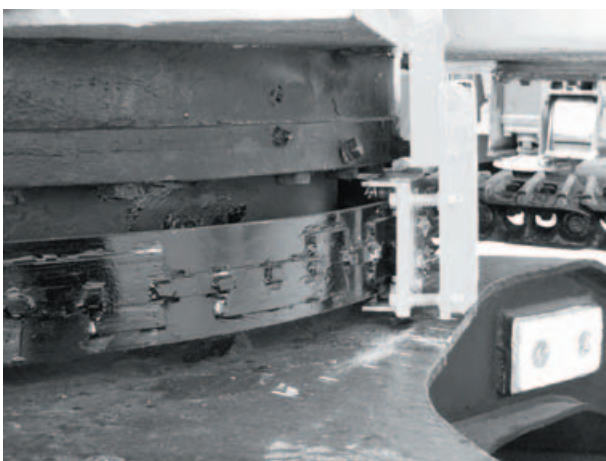


図-4.89 クローラ方位センサ

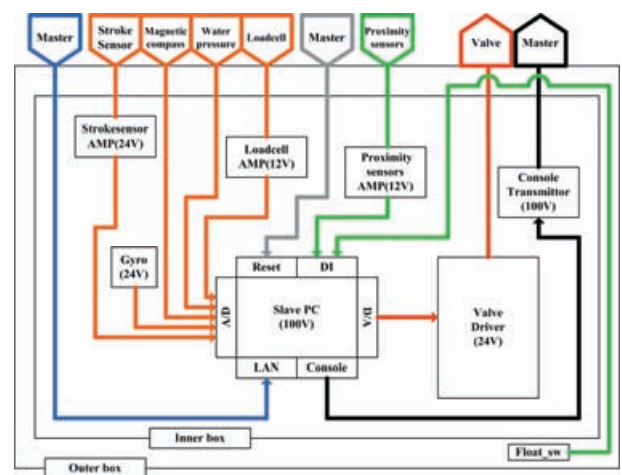


図-4.90 防水容器内部の配線

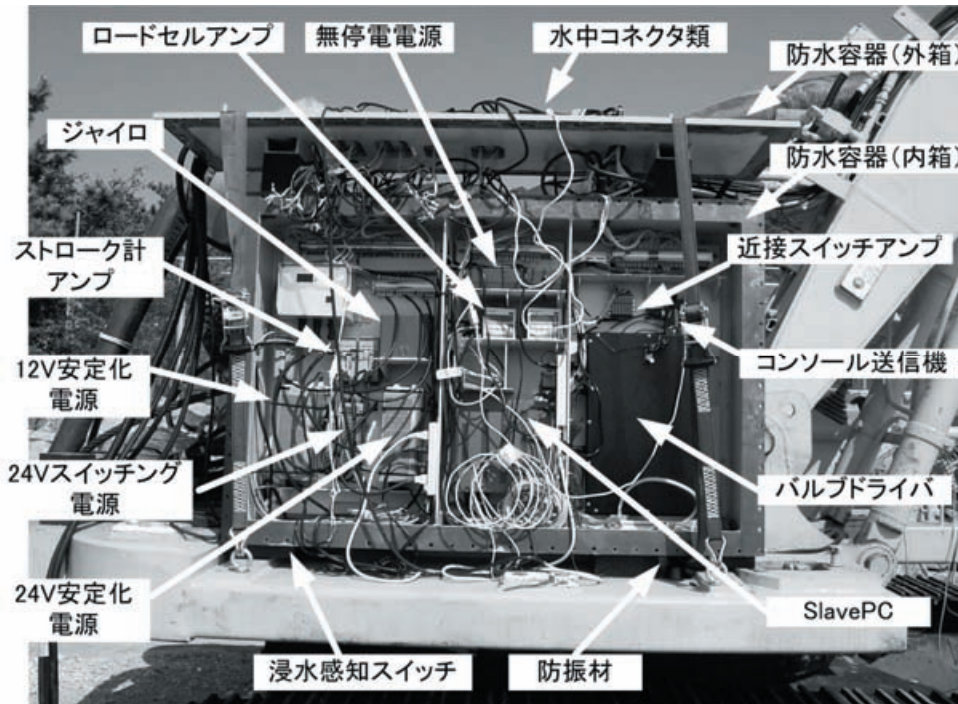


図-4.91 防水容器内部

表-4.22 水中バックホウ搭載機器

名称	型番	精度	備考	追加・変更
SlavePC	IPC-BX/M630-PCI		CONTEC	
A/D変換器	PCI-3168C	12bit	Interface	
D/A変換器	PCI-3341A	12bit	Interface	
バルブドライバ	PD3-100-G-10		TOKIMEC	
ストローク計	GYeRP-1500	0.05%FS	Santest	○
プローブコントローラ	GYFC-R9		Santest	○
近接センサヘッド	EH-114	0~5mm	KEYENCE	
近接センサアンプ	ES-M1		KEYENCE	
ロードセル	LUK-A-200KNSA1	0.1%RO	KYOWA	○
水圧計	BWL-20MET	0.15%RO	KYOWA	○
計装用コンディショナ	WGA-670B		KYOWA	
ジャイロ	JCS-7401A	1%	航空電子	
磁気方位計	MODEL-32500	±2°	R.M.YOUNG	
磁気方位計	TruePoint	±0.5°	Point Research	○
SBL	KSB-150		日本海洋	○
UPS	B X25T X	15min	OMRON	

c) その他の使用機器および使用船舶

バックホウ投入に使用するため、支援台船には100tのクローラクレーンを設置しているものを利用した。

支援台船上には水中のバックホウに油圧を供給するための動力のほか、45kVA発電機、遠隔操作室、潜水士休憩室、SBLを設置している。また台船舷側には海底面をス

キャンするための超音波測量装置Echo Scopeを取り付けている。使用したバックホウ支援台船を図-4.92に、各使用機器の配置図を図-4.93に示す。また、本実験では比較として有人搭乗施工を行うため、潜水士船や警戒船などを借り上げている。使用した船舶を表-4.23に示す。

d) 水中ケーブル

PC間の通信は一般のカテゴリ5LANケーブルを利用しており、水中バックホウに搭載されているPCへの通信もポリウレタンシースで保護した複合ケーブルを作成し利用している。複合ケーブルには通信用のLANケーブルのほか、SlavePCの状況を把握するためのケーブル、搭載機器にAC100Vを供給するための電源ケーブル、SlavePCを再起動するための信号ケーブル、UPS停止用の信号ケーブルを纏めたものとした。この通信ケーブルはバックホウの油圧供給ホースに這わせて括りつけられており、バックホウの移動時に絡まることのないよう配慮している。また投入時には約5m間隔でブイを取り付け、バックホウからほぼ垂直に立ち上がるようにしている。製作した複合ケーブルの断面図を図-4.94に示す。

生した場合や作業員が危険を認識した場合は実験責任者と現場管理者に同時に伝えることとした。このように伝達システムを明確化することで実験中の混乱を避ける。天候等の理由によって実験の実施あるいは中止の判断が必要な際は、現場の海象条件や事務所の判断等を参考に安全の確保を最優先に考えて決定することとした。表-4.25は実験現場海域における作業中止基準であり、本実験でも

この基準を参考とした。

本遠隔操作においてオペレータはTVカメラなどの映像を利用しないが、安全対策上水中バックホウの挙動を常に監視することが望ましい。そのため遠隔操作時には吊り下げ式水中カメラによる監視を安全監視員が行うこととした。図-4.96に吊り下げ式水中TVカメラを示す。

項 目		9/29(水)	9/30(木)	10/1(金)	10/2(土)	10/3(日)	10/4(月)	10/5(火)	10/6(水)	10/7(木)	10/8(金)	10/9(土)	10/10(日)	10/11(月)	10/12(火)	備 考
		AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	
水中バックホウ 輸送	台船係留地															水中バックホウ3台機
使用機器 輸送	作業所 台船係留地															PC, SBL, エコスコープなど 使用機器(宅急便関係)
捨石マウンド水準測量	天端: 11×21=231点															事前測量: 均し前地形測量 事後測量: 均し後地形測量
人員 移動日	研究所 ~ 現場															①現地入り ②帰路
構築・動作確認	台船係留地															2班に分かれて現場入り・出 構築・動作確認
オペレータの教育・ 試運転	現場海域															操作方法などの教育と試運転
エコスコープ 海底地形測量	現場海域															リアルタイム三次元水中音響装置 による海底地形測量
台船位置測量	現場測量員															台船の位置をトータルステー ションで測量
CG遠隔操作 (10m×10m)	天端 荒均し															15時間もしくは100㎡で終了
潜水士搭乗操作 (10m×10m)	天端 荒均し															従来操作方法による 荒均し作業
水中ビデオ・水中写真 撮影	台船吊り下げ式・ BH固定式・潜水士															作業状況・出来形・石咬合せ 撮影
水中バックホウ位置測定	港空研式 超音波位置測定装置															港空研式超音波位置測定装置 測量結果とSBLとの比較
構築解除・後片付け	台船係留地															水中バックホウと台船の構築解 除と輸送準備、後片付け

図-4.95 実海域実験計画

表-4.24 実験日の時間計画

時刻	現場作業員作業項目	実験参加者作業項目
8:00	実験準備・現航	実験機動作確認・機器セッティング
8:30	アンカー固定	トータルステーションによる台船位置測量
9:00	投入	安全場所待機
9:30	水中TVカメラ設置	エコスコープ・SBL設置
10:00		
10:30	実験開始	実験開始
11:00		
11:30		
12:00	昼休み	
12:30		
13:00	実験開始	実験開始
13:30		
14:00		
14:30		
15:00		
15:30	水中カメラ撤収	エコスコープ・SBL撤収
16:00	水中バックホウ揚収・水洗い	データ整理・保存
16:30	曳航・撤収	点検・整備

表-4.25 作業中止基準

項目	一般標準	作業現場基準
風速	8.0~10.8 m/s	10m/s以上
波高	1m以上	0.5m以上
雨量	10~20 mm/H	10mm/H以上
視界		500m以下
地震	震度3以上	震度4以上
雷	雷鳴が近い場合	雷鳴が近い場合
透視度		1m以下
流速		2ノット以上

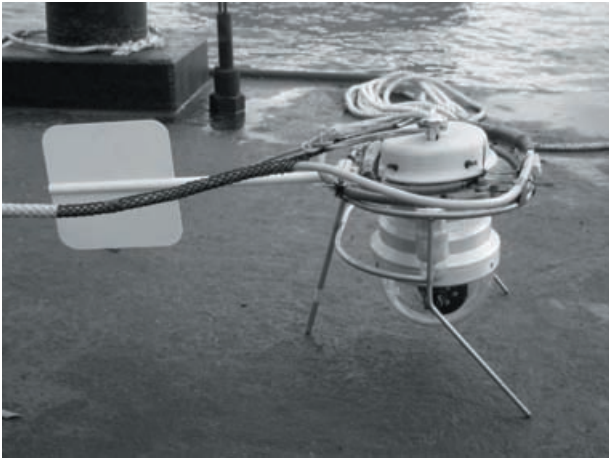


図-4.96 吊り下げ式水中 TV カメラ

(3) 実海域実験海域

実験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。海象条件は休止日を除いて波高50cm以下、透視度5m、潮流0~0.3 ノットの非常に穏やかな条件であった。

捨石の大きさは5~100kg/個、評価範囲は10m×10m とし、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。

実施工での均し高さは-16.0mであるが、本実験では実施工に影響が無いよう、捨石を多めに投入し、-15.5mの高さに均す作業を行うこととした。

図-4.97に実海域実験場を、図-4.98に実験評価範囲を示す。

実験を行う前の週に不陸の計測を水準測量器を用いて行った。不陸計測は評価範囲の100m²を1m毎に計測した。前述の通り全体的に多めに捨石投入されており、目標高さを下回った部分は存在しなかった。また投入時の安全のため、バックホウ転倒のおそれのある箇所を潜水士の目視により確認し、投入場所を定めている。図-4.99に作業前のマウンド面の状況を示す。事前測量の結果、約+80cm 程度の不陸が存在していた。

作業台船を実験海域まで曳航後、台船の位置や方位を計測するためトータルステーションにより測量を行った。基準点を既設No13ケーソン上に落とし、定められた台船の測量点の距離から位置と方位を算出した。これは台船に設けられたSBLでバックホウの位置を計測するため、台船の位置をグローバル座標で把握する必要があるためである。この台船を測量する作業は台船を移動させる度に行う。

台船の位置を測量した後、評価範囲の初期形状を認識

するため超音波測量装置による地形測量を行った。これは接触による測量では非常に時間がかかるために行っており、作業中は超音波測量装置を利用せず接触情報により地形を更新する。このデータをデータベースに入力し地形を描画した画面により、オペレータは当日の作業計画を決定した。

バックホウ投入時には、動力油圧ホースに搭載PCへ電源供給および通信用の制御ケーブルを這わせ、ブイのケーブルで結束しながら投入を行った。

なお、バックホウ着底後のワイヤ玉外し作業及び揚取時の玉掛け作業は潜水士により行った。図-4.100にバックホウ投入状況を示す。

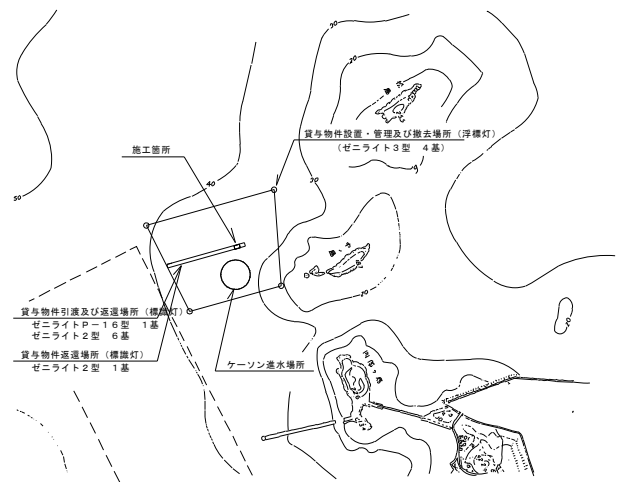


図-4.97 実海域実験現場海域

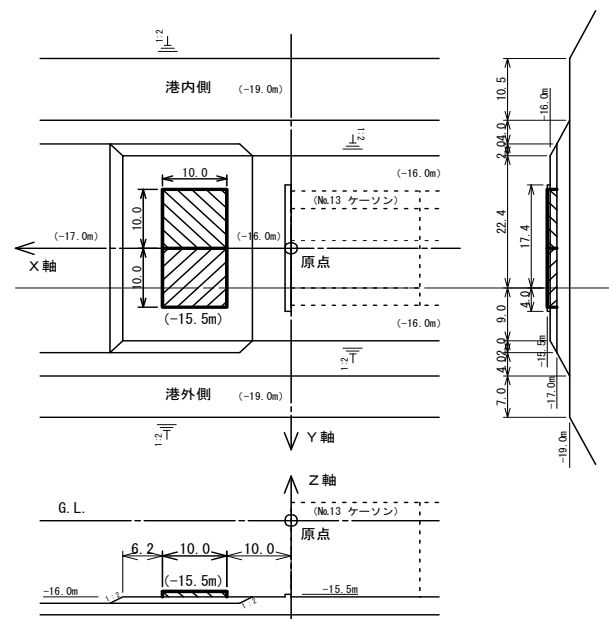


図-4.98 実海域実験評価範囲



図-4.99 作業前マウンド状況



図-4.101 遠隔操作状況



図-4.100 水中バックホウ投入状況

(4) 実海域実験の結果

a) 遠隔操作による均し作業の実施

水中での動作確認を行った後、無視覚状況下における均し作業実験を行った。今回の実験では水中バックホウの特性を熟知している水中バックホウ作業経験者をオペレータとした。オペレータはTVカメラを用いず、前述のCGのみの情報で作業を行う。

基本的な動作として、必要な高さまで掘削し作業範囲外に捨てる作業を繰り返すこととした。バックホウの平面座標はSBLによる超音波測位を行ったが、鉛直座標はバックホウに取り付けられた水圧計のデータにより取得している。この座標に傾斜角、ブーム/アーム/バケット角度情報を加えることで絶対座標系としてのバケット先端座標を算出する。オペレータはデータベースに入力されている絶対座標系を持つ設計高さ座標と比較することで、丁張りに頼らずに作業を行った。図-4.101に遠隔操作の様子を示す。

b) 実験機器の故障と対応

今回利用した実験機において発生した故障及び問題点は表-4.26に示すように多数発生した。搭載センサに発生した故障は、事前に準備していたバックアップシステムへ移行することで復旧することができたが、その移行に伴うプログラム修正でかなりの時間を要し、当初に計画していた均し作業の時間を確保できず、最終日に32m²を作業するにとどまっている。この均し作業も旋回モータの故障に悩まされながらの作業であり、この不具合がなければさらに施工効率は向上したと考えられる。

表-4.26 故障及び問題点

発生日	故障箇所	内容
9月30日	ベース旋回角度計	旋回体のガタにより近接センサが不安定
9月30日	反力センサ①	コネクタ接触不良により作動せず
10月1日	水中水準測量装置	事前測量中に故障
10月1日	Echoscope①	電源故障
10月2日	走行レバー①	右走行レバーが中立に戻らない
10月2日	Echoscope②	アクチュエータ動作不良
10月2日	Echoscope③	光ファイバに亀裂発生
10月2日	旋回モータ	旋回しない、ブレーキが利かない
10月4日	ダイヤモンドバルブ	ダイヤフラム破損によるエア漏れ
10月4日	走行レバー②	機体内部からのエア漏れ
10月4日	反力センサ②	コネクタ内で断線の可能性
10月4日	ストロークセンサ	センサ内部に浸水の可能性
10月4日	Masterプログラム①	軌跡が短い
10月4日	磁気方位計①	センサ内部に浸水の可能性
10月6日	Slaveプログラム	磁気方位計の交換により、0-360度をまたぐ旋回をした場合に値が乱れる
10月6日	SBL①	データが不安定(エア漏れ)
10月6日	磁気方位計②	方位角の誤差が蓄積される
10月7日	発電機故障	燃料ポンプ詰まりで発電機が停止
10月7日	磁気方位計③	予備品取り付け位置が低く機体の影響を受ける
10月7日	SBL②	データが不安定(乱反射)
10月8日	Masterプログラム②	2本レバーによる動作テストで機体表示がされない
10月8日	SBL③	浸水による故障

c) 相似形入力に関する問題点

運用面において連続作業時間がオペレータの疲労によ

り制限されるという問題があった。これは相似形入力装置のペンを握るように把持するという操作姿勢に原因があると考えられる。疲労に関しては陸上実験段階から認識しており、本実験に利用した入力装置にはアームレストを設置している。しかし肘から先は常に持ち上げていなければならない、この点が疲労する原因となった。また、本遠隔操作システムでは安全対策としてオペレータが意識的に操作したことを認識するためのセーフティボタンを把持グリップ部に設置しており、操作するにはこのセーフティボタンを常に押している必要がある。このためオペレータに対するヒアリングでは特に指先の疲労が蓄積されるようであった。

通常の操作レバーでは手のひらをレバー先端に乗せており、実用化に対して疲労を軽減するパームレストのようなものを考慮する必要がある。本実験で用いた相似形入力装置ではMaster-Slave間で位置-位置制御を行っているが、これを位置-速度制御とし、位相に対して反力をフィードバックすることで、これらの問題を解決できると考えられる。

(5) 遠隔操作システムの有効性に関する考察

作業後に超音波で測量したマウンド面のCGを

図-4.102に示す。均し面積は時間的な余裕から 32 m^2 となっており目標である 100 m^2 には達してはいないが、均し作業を行った部分についてはほぼ平面に均すことができている。作業後に撮影したマウンドの状況を図-4.103に示す。作業前の状況では約80cm程度の不陸が存在していたが、奥行き方向に約5mに伸ばしたスタブが置かれている状況から、ほぼ平面に均すことができていることがわかる。

また、作業後に水中水準器による測量を行っており、その測量結果を図-4.104、及び図-4.105に示す。この結果は潜水士搭乗操作及び遠隔操作によって施工された範囲を1m毎に計測したものであり、数値は目標高さとの差である。

潜水士搭乗操作によって施工された範囲の測量点全点を平均すると $+270\text{mm}$ であり、その標準偏差は $\pm 81\text{mm}$ であった。結果を見ると施工管理基準より高かった点が多数存在している。しかし目標高さを下回った点は存在せず、また、標準偏差も $\pm 81\text{mm}$ であり、全体的に高めではあるが平坦に均せている。潜水士搭乗操作では丁張りをしながらの作業が可能であるため、潜水士が目測を誤ったか丁張りの張り方が甘かった可能性がある。

遠隔操作によって施工された範囲の測量点全点を平均すると $+170\text{mm}$ であり、その標準偏差は $\pm 81\text{mm}$ であった。また施工管理基準 $\pm 300\text{mm}$ を超えた点が2箇所あったが、

目標高さより下回った点は1箇所であった。半数以上の測量点において $+100\text{mm}\sim+200\text{mm}$ の間に入っている。

遠隔操作においても全体的にプラス傾向であるが、その原因としてCG画面の表示方法に問題があったと考えられる。本実験において多くの部分が目標より高く捨石投入されており、掘削作業が中心であった。また一気に掘削すると負荷が大きくなりすぎるため少しずつ削っていくような動作により均しているため、目標値にある程度近づいた段階で均し作業を終了してしまったものと考えられる。特に断面地形を表示する画面では目標範囲を示す $\pm 300\text{mm}$ のラインも表示しており、掘削作業中に $+300\text{mm}$ のラインを切った段階でオペレータが均し作業を完了したと判断した場合、目標よりも高い位置で作業を終了したことになってしまう。また広域地形を表示する画面においても、目標高さに半透明の緑の面を表示させており、この半透明の面より下回った部分については地形が多少見難くなっている。このためオペレータは目標高さより高い位置であえて作業を終了している可能性がある。

ただし、平坦に均すという作業自体は標準偏差から示されるように十分な性能を有していると言える。

次に単位時間当たりの施工能力について考察を行う。本実験では遠隔操作での作業時間の計測を行っており、 32 m^2 を作業するのに75分の作業時間を必要としていた。これは単位時間あたりに換算すると $25.6\text{ m}^2/\text{h}$ となる。

ここで2.6技術課題の整理で定めた施工能力の目標は $26.4\text{ m}^2/\text{h}$ であり、ほぼ目標を達成することができた。さらに本遠隔操作システムは透明度により作業効率に変化しないため、透明度の低い海域での利用について考えると本システムは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。

次に、本システムの接触情報により記録した地形データと水準測量器による測量結果との比較を行った。その結果、水準測量による実際の高さより本システムの記録した地形データのほうが平均で 40mm 上を示しており、その差分の標準偏差は $\pm 140\text{mm}$ という結果となった。このばらつきの原因として、本システムではバケットを触診端として利用しており接触時の幅が広いいため、接触による測量座標と水中水準器の測量座標が一致していない可能性があることが考えられる。但し平均すると差は 40mm であり、本実験で用いた割石が $100\text{kg}/\text{個}$ であることを考慮すると、荒均し作業を対象とした場合十分な測量精度をもつものと考えられる。

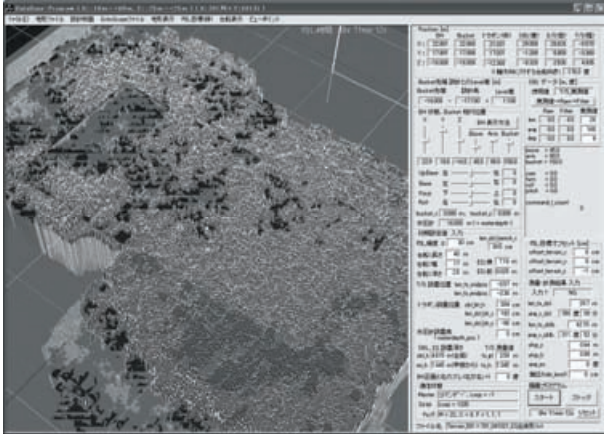


図-4.102 作業後の状況



図-4.103 作業後のマウンド状況

4.7 まとめと考察

本章では、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、作業機械から得られる接触情報（接触時に作用する反力、接触点の位置等）をバイラテラル操作系によってオペレータにフィードバックする手法を提案し、その有用性に関して、水中バックホウによる捨石均し作業を研究の対象事例として、部分模型による室内実験、油圧実験機による陸上及び実海域における実験を通じて検証した。本研究により明らかになった主な事項は次のとおりである。

- 操作端（Master）と水中バックホウ（Slave）が相似形で作動し、これと同時にバケットに作用する反力が操作端にフィードバックされる入力インターフェースは、バケット操作の手応えやバックホウ各部の姿勢をオペレータが直感的に認識でき、無視界でも遠隔操作ができる手法として有効である。また、これを実現する制御機構として、バイラテラル制御系は有効である。

港内側

No.1	0.20	0.21	0.29	0.24	0.25
No.2	0.33	0.26	0.12	0.24	0.35
No.3	0.07	0.22	0.33	0.29	0.32
No.4	0.16	0.29	0.35	0.35	0.23
No.5	0.40	0.35	0.35	0.35	0.25
No.6					
No.7					
No.8					
No.9					
No.10					
	①	②	③	④	⑤

港外側

図-4.104 マウンド測量結果（潜水士搭乘操作）

港内側

No.11				
No.12				
No.13	0.16	0.08	0.19	0.16
No.14	0.15	0.21	0.19	0.21
No.15	0.02	0.18	0.24	0.07
No.16	0.33	0.14	0.34	0.10
No.17	0.26	0.16	0.11	0.06
No.18	0.20	0.12	-0.03	0.19
No.19	0.18	0.14	0.17	0.16
No.20	0.29	0.09	0.20	0.22
	①	②	③	④

港外側

図-4.105 マウンド測量結果（遠隔操作）

- 上述した操作の手応えとあわせて、フィードバックされた接触情報をもとに均し作業に伴う地形変化などをCG化することにより、オペレータの認識力が高まる。
- この遠隔操作システムを用いた水中バックホウによる捨石均し作業の実海域実験を長崎港で行った結果、施工精度は平均+170mm（標準偏差±81mm）、施工能力は25.6m³/hであった。これは、潜水士がバックホウに搭乘して目視によって作業を行う現在の方法と同等の作業性である。
- 2.5技術課題の整理において提示された点は、実用化への容易さ、汎用性、外界認識、均し作業における作業効率である。

本研究で利用した油圧弁、ドライバ、センサはすべて市販のものを利用しており、特に油圧回路関係は陸上で

の遠隔操作に利用されているものであることから、高い耐久性・安定性を持つものと考えられる。さらに実海域実験において利用した機体は実際に施工会社が所有しているものであり、これにセンサ類の設置や制御用電子機器の搭載などの改造を加えたのみで大掛かりな改造を行っておらず、実用化への容易さ及び汎用性について示すことができたと言える。

外界認識については、濁度の高い港湾域で水中バックホウによる施工を実現するため、触像を利用した遠隔操作インタフェースを提案し、陸上実験、実海域実験において映像情報に依存しない遠隔操作均し作業を実現した。このことから濁りが発生する水中作業における外界認識に触覚情報が有効であることを示した。

実海域実験では、本研究により開発された遠隔操作システムによる作業と搭乗型水中バックホウとの比較実験を行った。その結果、施工精度は搭乗操作と同等の能力を有しており、水中でのマウンド荒均し作業（基準±300mm以内⁴²⁾）に利用できることを示した。さらにその施工効率についてコスト的な面から検証し、26.4m³/hを目標能力とした。実海域実験では目標値と同水準の能力を有することが明らかとなり、本システムの有効性を確認した。

さらに遠隔操作であることから潜水士の搭乗を必要とせず、高気圧作業安全衛生規則第八条第九条で一日の潜水時間が3時間以下に制限される-28m以深での施工において、潜水士作業の代替工法としての利用が期待できる。さらに本システムでは映像を利用しないため、濁度の影響を受けず、全国の港湾工事への展開が可能となるだけでなく、河川やダムなどの定常的に濁度の高い場所での施工も期待できる。

本研究により、水中バックホウの遠隔操作システムは実用化の途が拓かれたと考える。

5 水中マニピュレータへの発展

5.1 潜水士作業の機械化

(1) 汎用作業機械としての水中バックホウ

前章では現在の水中作業であるマウンド均し作業について、作業中の濁りによる視覚情報の劣化を問題点とし、触像を用いることでその解決を図ったものである。しかし、マウンド均し以外にも多くの工種を潜水士の手作業に依存している。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。

陸上作業における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^{43,44)}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。そこでミニショベルに把持アタッチメントを取り付けた実験装置を製作し、水中での部材運搬などの作業を想定したハンドリング実験により操作精度を比較する。

(2) 操作インタフェース

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±50mm、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操作方式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^{45,46)}。

また、自然物を対象とした作業では掘削や均しなど作業力を必要とする場合が多く、効率的な作業にはバックホウ関節と作業負荷の直感的な認識が重要である。このような場合、同構造マスタスレイブは有効であることが4章において示された。しかし、マニピュレータとしての作業を考えた場合、把持対象物の重量を呈示しても把持・運搬作業に有効な情報とはならない。また正確な把持や運搬にはバックホウの関節姿勢の認識よりエンドエフェクタの直線的な入力の方が有効となると考えられる。

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、マニピュレーション操作性を向上させるため、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。そこで触像の代わ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。

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。

バックホウの形状を考えたとき、図-5.1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平面状に制限する。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、レバーを捻ることでJ4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ことが想定される。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。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、レバー入力量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。

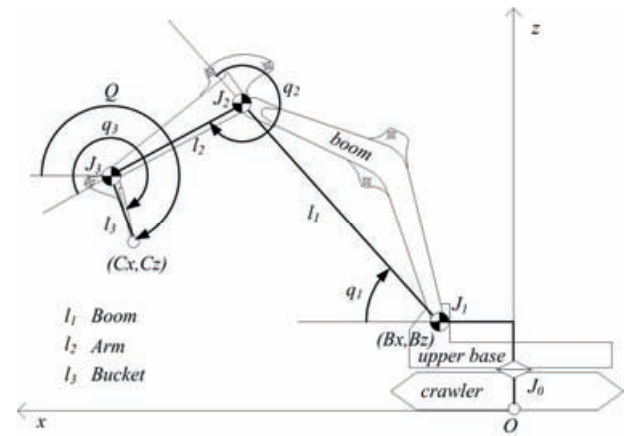


図-5.1 バックホウモデル

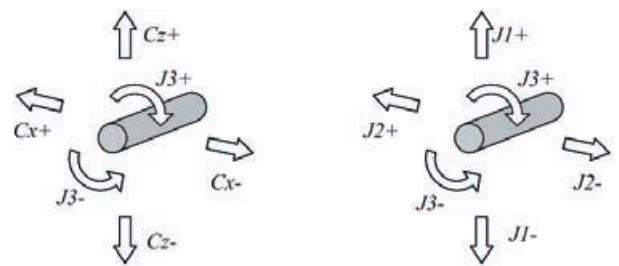


図-5.2 座標指示方式と関節角度入力方式

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-5.2に提案する操作入力方式を示す。

(3) ポインティング動作による操作性の評価

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。

a) 実験用バックホウ

基本実験では相似形入力操作装置でも利用した陸上実験機（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-5.3 実験用バックホウ（陸上用）

b) 操作入力装置

・ 無線リモコン

リモコン装置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。図-5.4に無線リモコンを示す。

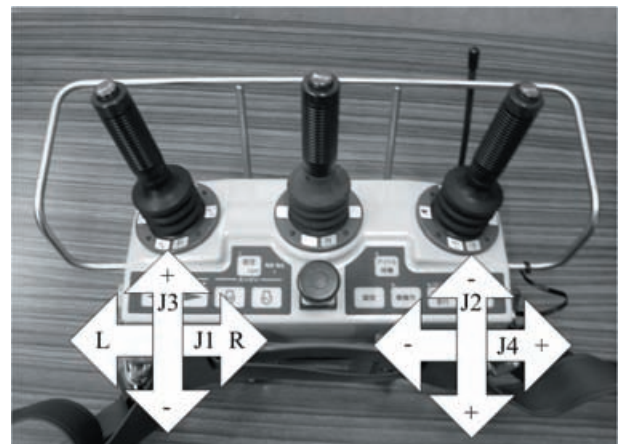


図-5.4 無線リモコン

・ 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-5.5に提案するジョイスティック方式を示す。



図-5.5 ジョイスティック

・ 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利用した。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。

c) 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-5.6に示す。



図-5.6 TV モニタによる遠隔操作画面

d) 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1m間隔で配置し、数字の若い順序にポインティングする。図-5.7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。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。

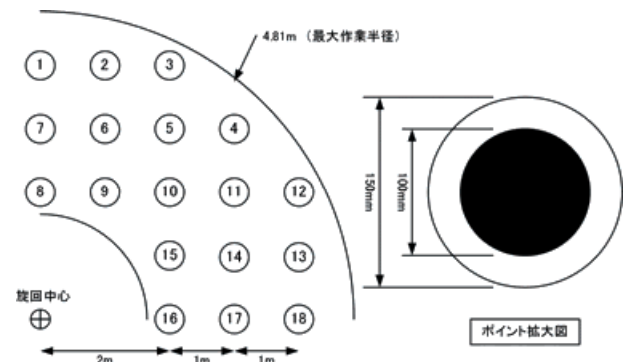


図-5.7 ポインティング順序

e) ポインティング実験結果

指示時間の平均値を図-5.8に、また誤動作回数の平均値を図-5.9に示す。

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-5.1に示す評価基準で順位を付けてもらった。表-5.2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-5.3には疲労度に対するヒアリング意見を、表-5.4には操作性に対するヒアリング意見を載せる。

f) 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

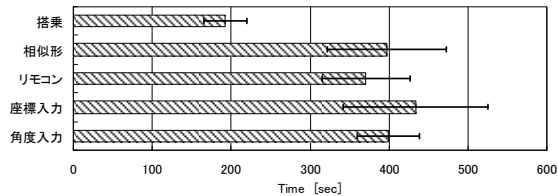


図-5.8 指示時間平均値 [秒]

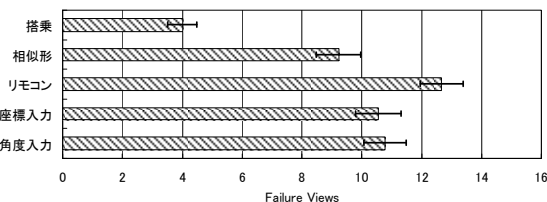


図-5.9 誤動作回数平均値 [回]

表-5.1 ヒアリング評価点数

	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-5.2 疲労度と操作性のヒアリング結果

	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-5.3 疲労に対するヒアリング意見

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-5.4 操作性に対するヒアリング意見

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。

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) 汎用バックホウの油圧制御の改善

過年度の研究では位置-位置制御である相似形インタフェースを用いたため、油圧シリンダの制御に追従性の悪いP制御を用いても特に問題となることは無かった。しかし、マニピュレータとして活用するにはエンドエフェクタ座標を直線的に移動させる場面があると予想される。追従性低下の大きな要因として挙げられるのは、ブームシリンダ延長時と短縮時にその特性が大きく異なるためだと考えられる。つまり延長方向にはバックホウフロント部の重量が負荷として加えられ、短縮時には摩擦抵抗をキャンセルする働きとなるため、絶対的な差分だけでバルブ開度を決定するP制御では特に中立付近の微少な制御は困難となる。またフロント部の重量は不変であるが、アームの角度によって重心位置が変化するため延長時の負荷も変化すると考えられる。

そこで、フロント部重心位置をパラメータとした動作開始電圧値を補償マップとして持つ重力補償をブームシリンダの制御に適応する。

a) 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-5.10)を実験機として用いる。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。

b)先端座標の直線運動実験

今回用いた重力補償は、ブームシリンダが動作を開始するときの指令電圧、および、シリンダが動作状態から停止する瞬間の最低指令電圧値をあらかじめ補償マップとして持たせたルックアップテーブル方式とした。図-5.11に可動範囲と重心位置の範囲、補償マップを示す。

この重力補償によりバケット先端座標を水平移動させ軌跡を計測する。

図-5.12は重力補償に上記の条件を加味したときの先端座標の軌跡を示す。図より可動範囲全域において直線的な軌跡であることがわかる。

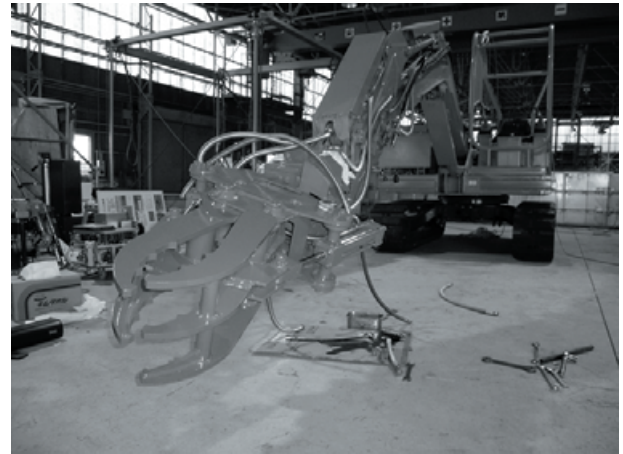


図-5.10 実験用バックホウ（水中用）

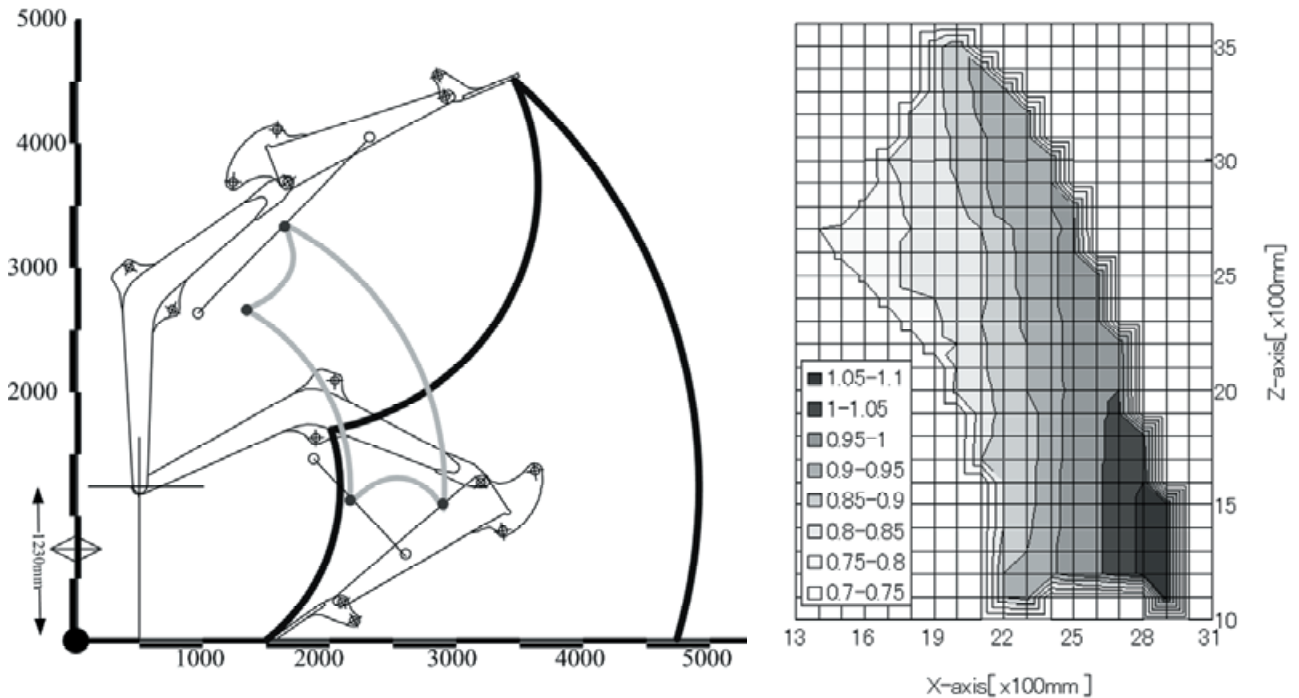


図-5.11 バックホウ可動範囲及び補償マップ

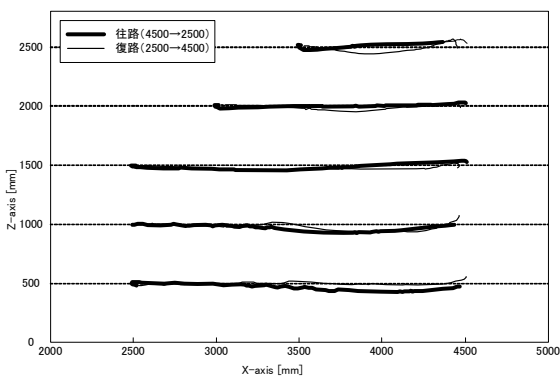


図-5.12 先端座標の直線動作時の軌跡

(5)先端座標の操作性実験

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。

a) 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/秒とした。なお本実験では先端座標の軌跡に注目するため、J3（バケット角）は180度固定としている。

b) 移動目標追従実験結果

図-5.13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。

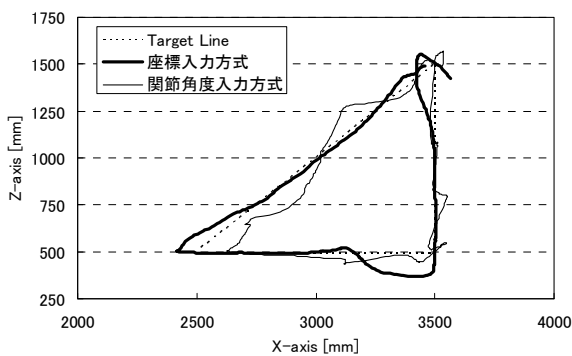


図-5.13 先端座標軌跡

また図-5.14、図-5.15はインタフェースのレバー入力量である。横軸の0～13秒が垂直動作、13～27秒が水平動作、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な動作を行っており、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。

c) 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

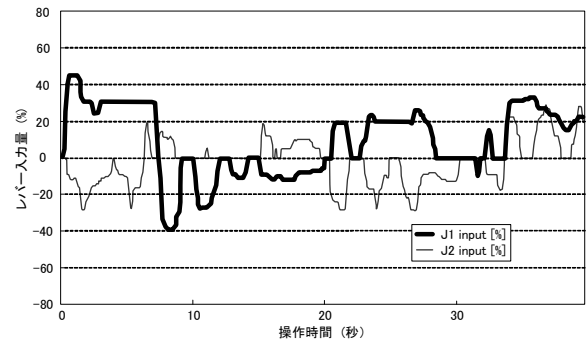


図-5.14 座標入力方式における操作量

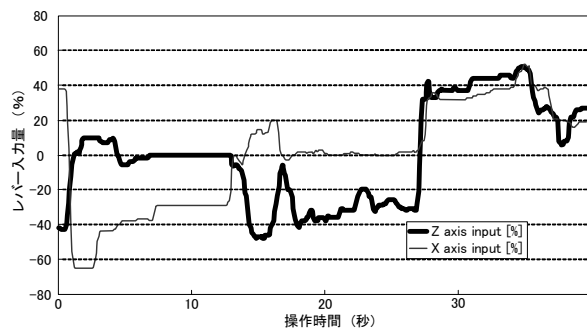


図-5.15 関節角度入力方式における操作量

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-5.15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った動作を、Z軸に対してはJ1を、X軸に対してはJ2の入力で繰り返し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-5.14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。

d) 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で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=4,000mm, Z=1,000mm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=2,800mm, Z=0mm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-5.16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。

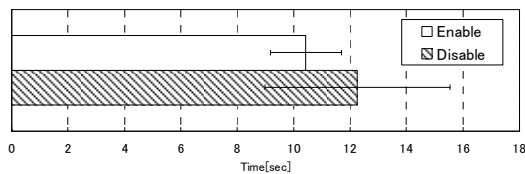


図-5.16 操作時間

(6) 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ブ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、バックホウ回転中心を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。回転を考慮しなければ、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 (Cx, Cz) 及びカメラの向きQ は式(5-1)、式(5-2)によって表すことができる。

$$Cx = l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3) + Bx \quad (5-1)$$

$$Cz = l_1 \sin q_1 + l_2 \sin(q_1 + q_2) + l_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3) + Bz \quad (5-2)$$

$$Q = q_1 + q_2 + q_3 \quad (5-3)$$

この式からカメラ視線は式(5-4)の一次直線として表すことができる

$$z = (\sin Q / \cos Q)x - (\sin Q / \cos Q)Cx + Cz \quad (5-4)$$

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arGetTransMat()関数により対象物と視点との位置関係が把握でき、式(5-3)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。

なお、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。

本研究ではマーカ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⁴⁷⁾⁴⁸⁾。

5.2 ハンドリングマニピュレータ実験

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。

(1) 水中マニピュレータ基本動作試験

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-5.17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。

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-5.18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=4200mm、Z=500mm、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-5.17のCGモニタのみでの遠隔操作となる。さらに、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。

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-5.19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。

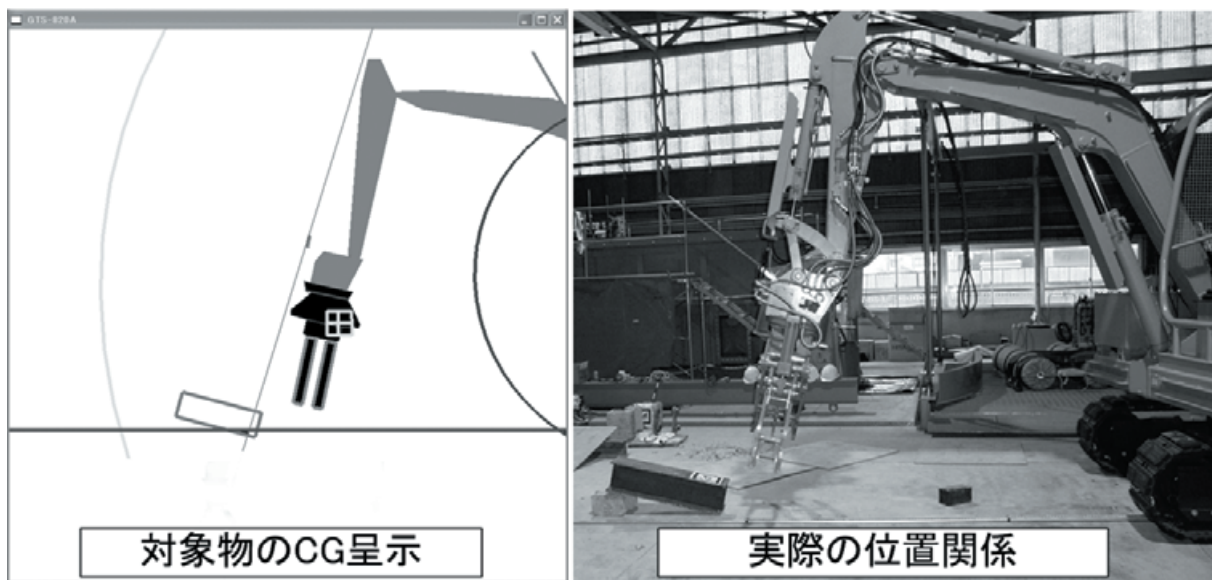


図-5.17 CGによる対象物の呈示

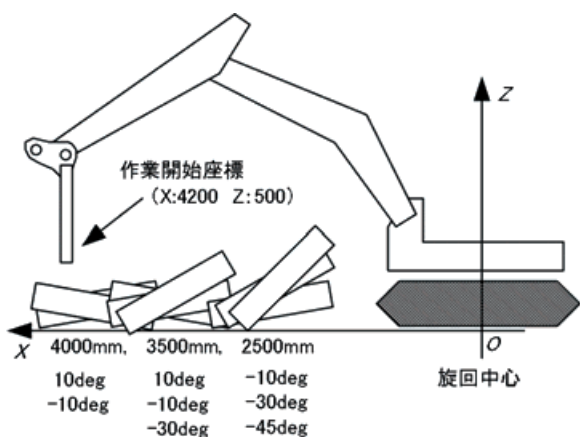


図-5.18 実験時のH鋼設置位置

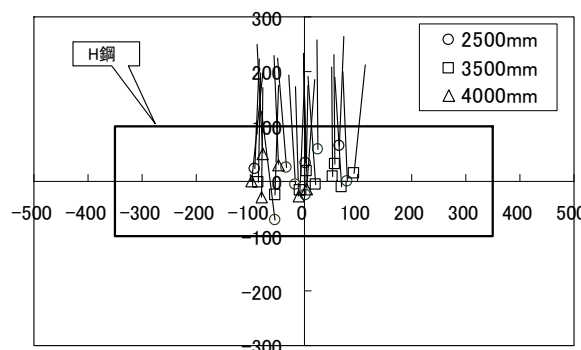


図-5.19 フォーク先端座標及び角度

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。

(2) H鋼を対象とした把持作業実験

実験はフォークグラフ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2,700mm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4,200mm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-5.20）。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フの座標・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。

H鋼には180×180mmのマーカを貼付しており、ARToolKitを用いてマーカ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-5.17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フの先端座標・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。

図-5.21は横軸を時間とした場合のH鋼の角度変化、図-5.22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0.5秒毎に記録している。

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±50mm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。

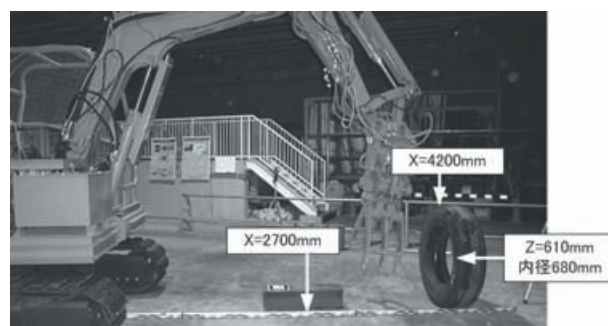


図-5.20 把持作業実験状況

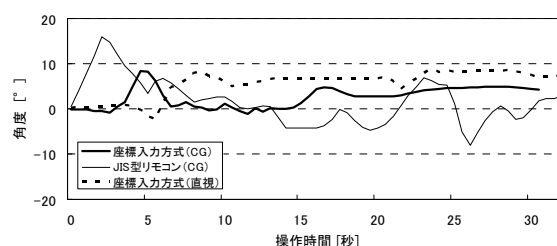


図-5.21 H鋼の角度の変化

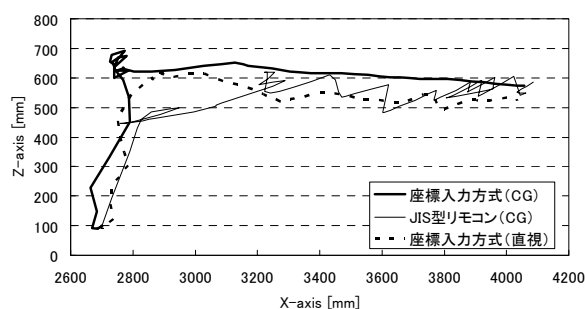


図-5.22 H鋼中心座標の軌跡

(3) ハンドリング作業実験考察

長尺物の部材を移設することを目的に、フォークグラフ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18°に対して、座標入力方式の角度誤差は8°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8°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-5.22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、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。

5.3 まとめと考察

本章では将来的に必要となると考えられる人工構造物の把持作業について、横置きレバーによる疲労度の改善、及び、貼付されたマーカによる対象物の座標認識を提案した。疲労度及び操作性に関してはポインティング実験を、マーカによる対象物の認識に関してはH鋼の把持作業実験を行い、以下の項目について明らかとなった。

- ・ 相似形インタフェースと比較して提案する横置きレバー方式では長時間連続運転での疲労が改善できた。
- ・ 操作性に関しては、提案する横置きレバー方式がJIS型操作方式よりも操作精度が向上した。
- ・ ARToolKitにより把持対象物の座標を認識し、CGにより位置関係を呈示することで、目視に依存しない遠隔操作での把持を行うことができ、その把持精度は±100mm以内、角度誤差は±7°であった。
- ・ 提案する横置きレバー方式はブーム、アーム、バケ

ット関節を連携して操作することができ、把持対象物を任意の角度を保持しつつ移動することができた。その精度は±8degであった。

「2.6技術課題の整理」において提示された点は、実用化への容易さ、汎用性、外界認識、把持作業における操作精度である。

本章からは実験設備の拡充により製作した新規の遠隔操作実験用バックホウを実験機体として用いているが、この機体に搭載した油圧弁、ドライバ、センサは4章と同様にすべて市販のものを利用している。また把持作業に対応するためのエンドエフェクタとしてフォークグラブを取り付けているが、このフォークグラブについても陸上機用の市販品を改造したものである。

対象物との接触が制限される把持作業において作業反力の呈示は重要な情報とはならないため、入力装置については市販のUSBジョイスティックを用いており、JIS規格ジョイスティックと比較しても入手が容易となり、実用化への容易さ及び汎用性について示すことができたと言える。

対象物との接触が制限される人工構造物では接触情報による外界認識が利用できない。ここで把持作業の条件として、均し作業と比較して巻き上げる濁りが少なく、港湾域においては一般に2m程度の視界が得られることから、対象物に最も近接するエンドエフェクタに設置した水中カメラの映像を利用した。しかし取得した映像情報のみでは対象物との位置関係が不明瞭であるため、既知形状のマーカとカメラの位置から対象物の位置姿勢を算出し、CGによりバックホウと対象物との位置関係を明確に呈示することとした。この手法により傾斜した対象物に対しても把持作業を行うことができ、高所カメラによる鳥瞰視点映像や移動カメラ車などによる複数の視点からの映像情報が得られない水中における外界認識の一つの手法として有効であることを示した。

把持対象を人工構造物とした場合、接触により破損する可能性があり把持作業中の姿勢の制御は重要である。一般のJIS規格ジョイスティックによる操作では各関節を個別に制御するため、シリアルリンクであるバックホウのエンドエフェクタの姿勢を一定に保つことは困難である。本システムではレバーの傾斜入力がエンドエフェクタの位置を、レバーの回転がエンドエフェクタの関節を制御するため、連携した操作が容易となる。対象物を水平に保持し移動させる実験では角度誤差が±5degであり、JIS規格ジョイスティックと比較して操作精度が向上した。

陸上作業においてフォークグラブによる把持の対象は

スクラップ材などであり、設置時の精度は重要視されていない。設置精度の高い作業はクレーンが用いられ、吊荷を介錯ロープなどで作業員が位置決めを行っている。ここで水中作業の場合を考えると、クレーンが船上に設置されており波浪により荷が振れるため、精度の高い設置作業は困難であった。本システムのシリンダ制御で微少な位置制御を実現することができれば、水中での高精度な重量物設置作業が可能となり、今後の海洋開発に役立てられるものと考えられる。

6. まとめと展望

6.1 まとめ

本研究では港湾工事における安全で効率的な水中作業の実現を目指し、近年実用化されてきた水中バックホウをベースに遠隔操作による作業を行うための研究を行った。ここで水中での作業対象を自然物、人工構造物と分類し、それらを対象とする作業として、現在潜水土搭乗操作により行われている捨石マウンドの荒均し作業と、クレーン作業の代替となる重量物の把持運搬作業とした。

3章では、外界認識エンジン、操作インタフェース、建設機械制御の三要件を本研究における水中遠隔操作のためのシステム要件として提起し、これら三要件を対象や作業条件に合わせて満足させることで水中での遠隔操作が実現できると考えられる。

マウンド割石など自然物を対象とした場合、作業中に濁りが発生し視覚情報が得られない問題があり、その問題解決のため接触情報を活用することを提案した。触像によるマウンド形状認識、反力呈示による作業状況認識、同構造マスタスレイブによる機体姿勢の認識を、遠隔操作システムとして構築し、要素実験、陸上実験機による統合実験を行い、実海域実験において提案手法の有効性を確認した。

自然物を対象とした場合の技術仕様は、触像のCG化による地形呈示、同構造マスタスレイブ、可変ゲイン型バイラテラル制御であり、これらは外界認識エンジン、操作インタフェース、建設機械制御のシステム要件を満たしている。

建設部材など人工構造物を対象とした場合、破損や崩壊の危険性があるため不意の接触は避ける必要がある。ここで人工構造物の特徴を考えると、自然物を対象とした場合と異なり発生する濁りが少なく、対象物にマーカー等を貼付することが容易である。本研究では対象物に近接できるエンドエフェクタからの映像情報を利用して、対象物との位置関係を明確に提示することを提案した。

実験ではマーカーを貼付したH鋼を対象とし、傾斜した状態での対象物を遠隔操作で把持する作業を行い、ほぼ中心を把持することができた。さらにH鋼の姿勢について水平を保持したまま移動させる実験を行った結果、JIS型レバー方式と比較して少ない誤差で移動させることができた。また入力操作装置を横置きレバー方式とし、疲労の低減を実現した。

人工構造物を対象とした場合の技術仕様は、マーカーによる対象認識、横置きレバー操作によるエンドエフェクタの制御、重力補償によるエンドエフェクタの精度向上であり、これらは外界認識エンジン、操作インタフェース、建設機械制御のシステム要件を満たしている。

4章および5章において、対象の異なる二つの作業事例について実験を行った結果、それぞれ満足した結果を得た。提起したシステム要件を満たすことで水中での遠隔操作を実現することが可能であると考えられ、本研究の成果により、濁水中での均し作業、及び、水中での高精度な重量物把持作業の実現が期待できる。

6.2 水中作業における本研究成果の展望

港湾域における主な作業は防波堤築造のためのマウンド面の整備であるが、1981年から1992年までの11年間に延長された全国の防波堤は253,792mで、平均すると毎年約23,072mの工事量があった。2003年度末において海岸保全区域要指定延長が全国で1,637kmあり、今後も防波堤は継続的に延長するものと考えられる。

また陸上作業におけるバックホウは汎用油圧作業機械として広く普及されており、掘削積み込み作業以外にも解体、破砕、把持など様々な作業をアタッチメントを変更することにより実現している。このような作業は現状の水中工事には存在しないが、今後、港湾施設の維持補修の必要性が高まることが考えられ、コンクリート構造物の解体や破砕などを潜水土の手作業で行うのは困難である。また水中の重量物運搬は、一般にクレーン付き台船を用いており海上からの荷役になるため、波浪の影響を受けやすい。さらに荷役には玉掛作業が必要であり、動揺する重量物の近傍に潜水土が存在することになるが、船上のクレーンオペレータから潜水土の位置を目視で確認することが出来ないため安全確保が難しい。このような問題に対し、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きた。

現在では油圧制御の改良による操作性の向上とARToolKitによる対象物の位置姿勢呈示により、傾斜したH鋼を把持し一定の姿勢で移動させる作業を実現した。こ

のような動作は台船上から部材を海底面に投入し、散乱した部材を組み立てるような動作を想定したものである。

本研究は水中での苦渋作業の機械化を目的に、建設機械の持つ巨大な作業力に対し、作業効率と精度を向上させるための操作インタフェースについて研究を行ってきた。本研究をさらに発展させれば、土工作业だけでなく海底での建設作業といった高度な水中施工が実現できるものと期待できる。

しかし本研究の成果が実作業現場に適応するためには以下の課題が残されている。

- (A) 高精度なマウンド形状の認識
- (B) 負荷に対応した油圧制御
- (C) 自然物を把持する場合の外界認識
- (D) 信頼性の向上
- (E) 遠隔操作システムの設置におけるセンサ・コネクタ類の規格化
- (F) 遠隔操作による積算・施工基準の策定

(A)については、本研究における触像により平面的な形状認識が可能であることが示されたが、接触端であるバケットが大きいこと、その分解能は低いと言える。実海域実験では100kgの割石を対象としており、その粒径が60cm程度とバケット幅と同等であるため問題とはならなかったが、現場条件によっては50kgの場合もあり、その場合認識の分解能を向上させる必要がある。また200kgなど粒径が大きくなった場合、噛み合わせによっては間隙が発生する。この問題に対しては、複数の圧力センサまたは超音波距離計を並べたものを認識用の部位としてバケット背面に取り付けるなどにより解決できるものと考えられる。

(B)については把持対象の重量が変わる場合にその操作性が変化してしまう問題が残っている。触像に用いたアタッチメント型反力センサや油圧系統に圧力計を設置するなど、負荷を検知することでパラメータを変化させることができれば、把持対象物の重量が変わった場合でも先端座標の誤差が減少するものと考えられる。

(C)は把持対象物にマーカを設置できない場合における問題である。本来画像解析による対象物認識はステレオカメラなどを用いることが一般的であるが、水中作業においては左右のカメラ付近の濁度が異なる場合があり、色情報や明度情報ではうまくマッチングがとれない可能性がある。この問題に対してはオペレータによる操作が介在した運動視差を用い、同じ対象物を別方向から捕らえた時のカメラ視線により、対象物の座標が認識で

きる方法が考えられる。座標取得後の対象物の輪郭からある程度の形状や大きさが予測でき、自然物を把持する場合の情報に役立つものと考えられる。

(D)は機械的な問題である。建設機械は故障による休止が許されないため、信頼性は重要な項目である。ベースとなる建設機械は十分な信頼性があるが、搭載するセンサ類は振動や水圧、海水による腐食など、一般に利用される条件と比べて過酷である。メーカーとの協力によるセンサ開発、バックアップや容易な交換を考慮した設置方法など様々な対策が必要である。

(E)については他社の保有する水中バックホウを利用する場合を想定した項目である。陸上機と比較して稼働台数が少ないため、工事現場にバックホウを輸送する必要があるが、離島などに海上輸送する場合、運搬するコストや時間が無駄となる。水中バックホウの遠隔操作仕様を規格化すれば、他社の保有するバックホウを利用できるため、利便性が向上できるものと考えられる。また、各社において独自の技術開発を行った場合でも、その制御装置を容易に設置できる。

(F)は行政からの支援が必要な項目である。新たな技術開発を行い、安全性が向上したとしてもコスト的に見合わなければ普及されない問題がある。本研究では実海域実験において搭乗操作と同等な施工能力を有していることを示したが、透明度が高い場合や作業水深が浅い場合、従来施工方法がコスト的に安価となる。また±50mmの基準である本均しには適応できない。機械均しでの積算基準や施工基準の緩和が実現できれば、水中でのバックホウ作業が普及されるものと考えられ、そのためには本研究の成果での施工実績を積み重ねていく必要がある。

また、本研究の成果の応用として以下の作業に適応できる可能性がある。

- (a) 捨石マウンド本均し作業（基準±50mm）
- (b) 自然ダムの撤去など災害復旧作業
- (c) 海底鉱物の掘削作業
- (d) 被服石の設置
- (e) ダム取水口における堆積物除去
- (f) 既設港湾施設の点検診断作業
- (g) 既設港湾施設の維持補修作業
- (h) 沈船からの油除去
- (i) 大水深でのマニピュレーション

(a)～(c)までは自然物を対象とした場合の応用、(e)～(i)までは人工構造物を対象とした場合の応用となる。

(a) (d)では先端座標の高精度な位置決めが必要となり、

油圧弁をサーボ弁などに変更できない場合、高分解能なストロークセンサ、各シリンダへ流れる油量や圧力を監視するセンサを新たに設置する必要があると考えられる。また微少な動きを実現する油圧制御に関しても研究を行う余地があると考えられる。

(b) (c) (h) (i)は水中バックホウの近傍に作業台船が近づけないため、通信や動力源について考案する必要がある。

(c) (e)については、掘削物除去物の水面への搬送が課題となる。これはクレーンフックの水中での位置情報を取得し連携動作を行うことで解決できると考えられる。

(f) (g) (h) (i)は先端のエンドエフェクタを新たに開発し、センサや工具などとの連携操作が必要となる。

上記の作業は本研究の成果をベースとし、対象とする作業に特化した研究と言える。本研究の成果が今後の海洋開発に役立てられることが期待できる。

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必要がある。また今後の水中作業の展望を考えると、重量物を把持・移設するだけでなく、把持・固定したまま水中溶断・溶接などの複雑な協調作業が予想される。

本研究の成果を基に、フォークグラブアタッチメントに精密作業用の電動アームを設置し双腕化することで、水中施工技術の発展、および安全性の向上が期待できる。

このような技術開発の成果を現場に普及させるためには、利用者やメーカーの意見を開発段階から取り入れることが重要だと考えている。また、ダムや河川、災害復旧など港湾建設以外の工種にも適応できる可能性もあり、そのためには海洋土木会社以外の協力も不可欠である。陸上施工において同じく建設機械の遠隔操作に関する研究を行っている独立行政法人土木研究所などと共同研究協定を締結するなど連携を密に取り、様々な分野への応用も視野に入れる必要があると認識している。

さらに遠隔操作型バックホウの統一規格化などを提唱していきたいと考えている。例えばコネクタのピンアサインや搭載センサ出力を定めることで、各施工会社が得意な工種に特化した制御系や操作インタフェースの開発が可能となり、遠隔操作による様々な作業が実現することが期待できる。さらに災害時にも現場に近いバックホウを利用することができるため、迅速な対応も期待できる。

2007年7月に施行された海洋基本法では海洋資源開発

や海洋の安全確保が基本施策として述べられており、将来本研究の成果がそのような場で活用されるよう、精力的に研究を進めていく所存である。

(2010年8月13日受付)

謝辞

本稿は筑波大学大学院における著者の博士論文を、港湾空港技術研究所資料として発表するものである。

本研究への取り組みを始めて以来、筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻岩田博夫教授、矢野博明准教授には、終始、研究の進めかたや理論的なアプローチ手法など、多くの点において的確な御指導、御助言をいただくとともに、折にふれて暖かい励ましのお言葉をいただきました。本研究が所定の目標を達成し得たのも、ひとえに先生方のお力添えによるものと心から感謝しております。さらに、筑波大学大学院システム情報工学研究科坪内孝司教授、葛岡英明教授ならびに川村洋平講師には、本研究についての的確で貴重なご指摘、ご意見をいただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

本研究の遂行にあたり、佐伯建設工業株式会社（現あおみ建設株式会社）の関係各位には多大なる協力を頂きました。建設機械を対象とした本研究の特性上、現場経験者である山本恭氏の協力や助言は何事にも代えがたいものであり、特に実海域実験は山本氏を通じての現場作業員への的確な指示や事前準備、安全管理が無くては実現できなかったものと考えています。また水槽用実験機の製作では、安田博之氏から水中バックホウビッククラブの技術について助言を頂き完成したもので、研究活動の資産として今後も活用させていただきたいと考えております。さらに建設機械という巨大な実験装置を用い屋外での実験が多い本研究において実験の補助としての協力もいただいております。改めて両名に感謝したいと思います。

システム構築、制御プログラム作成では港湾空港技術研究所の田中敏成氏、内海真氏（現アークデバイス）に多大な協力を頂きました。製作したシステムには内海氏製作のサブルーチンを多数利用させていただいており、制御関係では田中氏から多くの点についてご教示いただきました。また本研究を進めるにあたり、格別なご配慮をいただきました港湾空港技術研究所の方々に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 中田誠：ダイビングの事故・法的責任と問題，株式会社杏林書院，2001.
- 2) 国立社会保障・人口問題研究所：人口統計資料集，<http://www.ipss.go.jp/>
- 3) 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.
- 4) 金山裕幸：上川口港防波堤工事での水中バックホウ・ビッグクラブによる施工例，建設の機械化，2000年3月号，2000，pp.44-49.
- 5) 大宮敬治，加藤政徳：平良港防波堤工事における水中バックホウによる施工，建設の機械化，1996年7月号，1996，pp.17-22.
- 6) 山内定義：水中作業機械の現状と展望，月刊建設機械，2000年2月号，2000，pp.24-28.
- 7) 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，2001
- 8) 藤井：雲仙普賢岳における無人建設機械の操作実感，建設機械，2000，pp.40-43.
- 9) 内海光博：建設機械の遠隔運転，月刊建設機械，2000年6月号，2000，pp.14-19.
- 10) 久武経夫：情報化施工と電波利用，月刊建設機械2000年6月号，2000，pp.20-25.
- 11) 森利夫，瀧谷誠：リモコンハイバックの開発と現場への適用，月刊建設機械，2000年6月号，2000，pp.26-31.
- 12) 大津良司：総合デジタル無線コントロール・システム，月刊建設機械，2000年1月号，2000，pp.52-54.
- 13) 久武経夫，広瀬晋也：大規模土工現場における施工の統合管理，月刊建設の機械化，2000年5月号，2000，pp.38-44.
- 14) 堀川，高野，江藤：大規模アスファルトフェーシングダム工事への情報化施工の適用，月刊建設の機械化，2002年8月号，2002，pp.3-8.
- 15) 竹之内，西ヶ谷，上石：現場ニーズに応えるロボット技術，月刊建設の施工企画，2005年2月号，2005，pp.10-15.
- 16) 吉田 正：建設施工におけるロボット技術の活用，建設の施工企画，2005年1月号，2005.
- 17) 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，2005，pp.145-148.
- 18) 山元 弘，邵 輝，茂木 正晴，大槻 崇：油圧ショベルによるIT施工システムに関する研究，建設施工と建設機械シンポジウム論文集，2008，pp.5-10.
- 19) 邵，山元，境田，山口，柳沢，野末：Automatic Excavation Planning of Hydraulic Excavator, Intelligent Robotics and Applications, 2008.
- 20) 柳沢 雄二，山元 弘，邵 輝，野末，山口：作業機械の遠隔操作におけるマンマシンインターフェースに関する研究，建設施工と建設機械シンポジウム論文集，2007，pp.77-82.
- 21) 山元 弘：今後の無人化施工を含む技術開発の展望，第24回建設用ロボットに関する技術講習会，2007，pp.24-29.
- 22) 中川大：無人有索型水中バックホウの開発，作業船協会誌第256号，2001，pp.18-23.
- 23) 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，1999，pp.717-722.
- 24) 高橋 義明，高橋 英俊，秋園，加藤，中道，剣持，齋藤，朝妻，石田，町田：水中レーザー視認装置の開発，海洋開発論文集，第11巻，1995，pp.277-282.
- 25) 吉江宗生，白井一洋，田中敏成，平林丈嗣：港湾工事等へのロボット技術の導入，第8回建設ロボットシンポジウム予稿集，2000，pp.29-36.
- 26) 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，2004，pp.241-248.
- 27) 伊藤直幸：油圧ショベルのイージーオペレーション化のための操作装置と支援システム，第10回建設用ロボットシンポジウム論文集，2004，pp.353-362.
- 28) 中野栄二，久武経夫：油圧ショベルのイージーオペレーションのための操作装置，建設の施工企画，2005年2月号，2005，pp.16-22.
- 29) 田中敏成，秋園純一，平林丈嗣：干潟における環境モニタリング技術のロボット化の提案，Techno Ocean2000,Proceedings, Vol.2, 2000, pp.405-410.
- 30) 舘：ロボットから人間を読み解く，日本放送出版協会バーチャルリアリティと現実空間，2000，pp.166-179.
- 31) 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，2000，pp.140-147.
- 32) 加藤，山田，武藤：遠隔操作建設ロボットシステムのマスタ・スレーブ制御，日本フルードパワーシステム学会論文集，第34巻第2号，2003.

- 33) ARToolKit Home Page :
<http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>
- 34) 一柳建：電子油圧制御，日刊工業新聞社，1993.
- 35) 川村：ロボット制御入門，オーム社，1995.
- 36) 計測自動制御学会編：ロボット制御の実際，コロナ社，1997.
- 37) 平林，吉江，内海：水中施工ロボットにおけるARを用いたM-Mインターフェイスの構築，TECHNOOCEAN2000，2000，pp.411-414.
- 38) 内海真，藤本健幸，秋園純一，吉江宗生，白井一洋，田中敏成，平林丈嗣，佐藤栄治：反力情報を用いた遠隔操作型水中施工ロボットの提案，TechnoOcean2000,Proceedings, vol.2, 2000, pp.399-404.
- 39) 岩崎正揮，平林丈嗣，矢野博明，岩田洋夫：水中バックホウ用相似形操作インタフェイスの開発，日本機械学会 Robomec2003，2003.
- 40) 平林丈嗣：水中における遠隔操作システム，雑誌作業船，No. 260，2001.
- 41) 平林丈嗣，山本恭，酒井浩，秋園純一，矢野博明：水中作業機械遠隔操作における接触情報の有効性に関する研究，日本ロボット学会，ロボティクスシンポジウム，2004.
- 42) 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，1996，pp.286-291.
- 43) 内海真，平林丈嗣，吉江宗生：ARを用いた遠隔操作型水中把持システムに関する研究，第19回日本ロボット学会学術講演会，2001，pp.25-28.
- 44) UTSUMI, HIRABAYASHI, YOSHIE : Development for Teleoperation Underwater Grasping System in Unclear Environment, Proc. of Symposium on Underwater Technology2002, 2002.
- 45) Hirabayashi, Yasuta, Yano, Iwata :Evaluation of Operativeness Concerning Interface of Remote Controlled Backhoe, International Symposium on Automation and Robotics in Construction(ISARC2006), 2006, pp.52-55.
- 46) 平林丈嗣，安田博之，白石哲也：遠隔操作型バックホウの入力装置に関する操作性評価，港湾空港技術研究所資料，No.1126，2006.
- 47) 平林丈嗣，矢野博明，岩田洋夫：ARを用いた濁水中における物体認識，第12回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，2007，pp.15-18.
- 48) 平林丈嗣，矢野博明，岩田洋夫：ARToolKitを用いた水中建設機械による遠隔操作把持作業に関する

研究，第13回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，2008，pp.288-291.

港湾空港技術研究所資料 No.1222

2010.12

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所

横須賀市長瀬3丁目1番1号

TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 シーケン

Copyright © (2010) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています