

独立行政法人港湾空港技術研究所

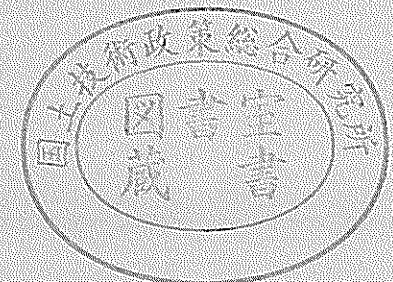
港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.42 NO.3 September 2003

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE



港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 42 卷 第 3 号 (Vol. 42, No. 3), 2003 年 9 月 (September 2003)

目 次 (CONTENTS)

1. コンクリートの局所的圧縮破壊現象とその評価手法
.....岩波 光保・渡辺 健・横田 弘・二羽 淳一郎 1
(Localized Compressive Failure of Concrete and Its Evaluation Methods
..... Mitsuyasu IWANAMI, Ken WATANABE, Hiroshi YOKOTA, Junichiro NIWA)
2. 触像を用いた油圧汎用施工機械の遠隔操作に関する研究
.....平林 丈嗣・山本 恭・酒井 浩・秋園 純一・内海 真 33
(Research on Tele-operation with Haptic Image for hydraulic powerd construction machine
..... Taketsugu HIRABAYASHI, Takashi YAMAMOTO, Hiroshi SAKAI, Junnichi AKIZONO, Makoto UTSUMI)
3. 強潮流海域における水中観測システムの研究
(第 1 報 ; システムの基本構成と基礎運動シミュレーション)
..... 酒井 浩・田中 敏成 57
(Study of the Underwater Observation System in Fast Water Current
(1st Report;The basic System and Results of the Motion Simulation)
..... Hiroshi SAKAI, Toshinari TANAKA)
4. 台風による内湾の波浪・高潮の双方向結合推算モデルの構築
..... 河合 弘泰・川口 浩二・橋本 典明 85
(Development of a Storm Surge Model Coupled with a Wave Model for Typhoon-caused Wave and Current in a Closed Bay
..... Hiroyasu KAWAI, Koji KAWAGUCHI, Noriaki HASHIMOTO)
5. 模型実験による臨海都市部の津波氾濫のリスク評価
..... 安田 誠宏・平石 哲也 111
(Experimental Risk Assessment of Tsunami Inundation in Coastal Urban Area
..... Tomohiro YASUDA, Tetsuya HIRAISHI)

触像を用いた油圧汎用施工機械の遠隔操作に関する研究

平林 丈嗣*・山本 恭**・酒井 浩***・秋園 純一****・内海 真*****

要 旨

大水深岸壁，廃棄物埋立護岸，海上空港等の海域の利用は，今後ますますその要請が高まる．それに伴い港湾構造物を中心とした大水深構造物の建設・維持管理は，安全にかつ効率的に実施することが求められている．その解決手段の一つとして機械化施工が挙げられるが，海中では工事中に発生する濁水により視界が遮られてしまい操作が困難となっている．現在，水中バックホウを対象とした遠隔操作に Bi-lateral 制御及び触覚情報のフィードバックを取り入れることによる，濁水中での操作に対応した遠隔制御システムについて研究を行っている．

実験として遠隔操作型に改造した陸上実験機を用いて未知の石山を任意の高さに均す作業を行った．オペレータは操作室に隔離されており石山の形状やバックホウの姿勢を直視することが不可能な状況であったが，触覚情報の三次元表示により施工状況を認識することが可能であった．

実験結果として均し精度が±50mm 以内の誤差に収まっており，視覚情報を得にくい濁水中での作業に本制御システムの概念が有効であることが実証できた．

キーワード：Bi-lateral 制御，水中バックホウ，遠隔制御

* 制御技術研究室

** 制御技術研究室 研修生

*** 制御技術研究室長

**** 新技術研究官

***** 制御技術研究室 特別研究員

〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：046-844-5062 Fax：046-844-0575 e-mail：hirabayashi@pari.go.jp

Research on Tele-operation with Haptic Image for hydraulic powered construction machine

Taketsugu HIRABAYASHI*

Takashi YAMAMOTO**

Hiroshi SAKAI***

Jun-ichi AKIZONO****

Makoto UTSUMI*****

Synopsis

The demand for utilization of ocean space such as quay wall in deeper sea area, embankment of reclaimed land for waste, reclaimed airport is increasing. To cope with this situation, safe and effective construction and maintenance of facilities in deeper sea area mainly port facilities are expected. One solution is mechanization of execution. However, the main problem is the lack of the vision by turbid water caused by construction work in the sea.

We are making a research on the advanced remote control system for underwater backhoe by introducing bilateral control and haptic image to make the operation in unclear condition possible.

Experiment was carried out by leveling unknown gravel terrain to a certain height by a land-use remote-control backhoe reconstructed for experiment.

The operator was separated in the operator room from where the shape of gravel terrain and the posture of backhoe are invisible. However, the operator recognized the situation of operation by 3-D expression of haptic information and the feedback of reaction force.

Experimental result is that error of leveling is within ± 50 mm. It is proved that the concept of proposed system is effective for the operation in turbid water in which the vision is hard to get.

Keyword : Bi-lateral control, underwater backhoe, remote control

* Researcher of Control System Division

** Trainee of Control System Division

*** Head of Control System Division

**** Research Coordinator for Advanced Technology

***** Specific researcher of Control System Division

3-1-1, NAGASE, YOKOSUKA, 239-0826, JAPAN

Phone : +81-46-844-5038 Fax : +81-46-844-0575 e-mail : hirabayashi@pari.go.jp

目 次

要 旨	3
1. まえがき	5
2. 水中油圧汎用機械の突状	6
2.1 水中バックホウの施工例	6
2.2 水中バックホウ仕様	6
2.3 水中バックホウ問題点	7
3. 遠隔操作化のための要素技術	7
3.1 オーグメンテッドリアリティ技術	7
3.2 相似形インタフェース	7
3.3 Bi-lateral 制御技術	8
3.4 触覚情報の視覚化	8
3.5 バックホウ遠隔操作への適用	9
4. 模型によるシステム検証	9
4.1 実験模型システムの構築	9
4.2 反力センサの検討	10
4.3 触覚情報の視覚化プログラム	10
4.4 動作検証試験	10
4.5 システム検証結果	12
5. 陸上実験装置	13
5.1 陸上実験用小型バックホウ	13
5.2 相似形入力操作装置	13
5.3 Bi-lateral 制御による制御フロー	14
5.4 可変ゲイン位置対称型 Bi-lateral 制御	17
5.5 触覚情報の視覚化アルゴリズム	19
5.6 実験	19
5.7 結果	20
5.8 誤差原因の検討	20
6. 結論	22
7. あとがき	22
謝辞	22
参考文献	22
記号表	22

1. まえがき

大水深岸壁、廃棄物埋立護岸、海上空港等の海域の利用は、今後ますますその要請が高まるものと考えられる。それに伴い港湾構造物を中心とした大水深構造物の建設・維持管理を、安全にかつ効率的に実施することが求められている。しかし水中での工事は、工事規模が必ずしも大きくなく、水の中という特殊な環境である理由から技術開発は進んでおらず、未だ人力施工に依存せざるを得ない部分が残されている。このように潜水士による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だけでなく、危険の察知や回避の困難性からの安全性も低い。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など、その労働条件は陸上に比べて劣悪である¹⁾。

例えばレジャー等のファンダイビングにおいて平成元年から平成11年の間に274名もの死者が発生している事実²⁾は水中が極限状態であることを物語っているものである。加えて港湾工事での潜水士作業は作業船近傍、作業中の海面下、防波堤造成前の海域等における作業が多く、ここでの事故は生命の危険に直接関わるものとなる。

旧運輸省の直轄工事では昭和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。また死亡事故に至らなくても減圧時の脊椎梗塞や潜水病等、多くの潜水士が生命に関わる事故に遭遇している。

事故の種類としては送気異常や潜水器具の故障といった事故が最も多い。被災者の潜水士経験年数に幅があることから、経験や注意によって回避できるような事故ではないと言える。激突やはさまれによる事故が多いのは、視界の悪さや潮流などの海象条件によって海中では迅速な危険の察知や回避が困難であることが原因だと考えられる。表-1に旧運輸省の直轄工事における重大な潜水事故を示す。

ところで陸上工事における無人化施工技術は既に実用化段階に入っており、作業員の安全が確保できない災害復旧等といった現場においてその効果を発揮している。具体的な方法としては作業区域全体が見渡せる高所カメラや作業個所を詳細に視認するための複数のTVカメラを駆使し作業状況に応じて視点を切り替えることにより作業をモニタリングし、機器を操作するシステムであるが、遠隔操作することによる施工効率の低下は避けられず、陸上遠隔操作施工の効率は有人の0.6が標準とされている³⁾。工事事例報告によるとこのような作業効率低下の理由は立体感の欠落、視野角の狭さ、機体位置・作業姿勢の状況把握の困難性といった人間の認識に関する

表-1 過去の潜水事故

経緯	被災部位	被災性質	休業日数	原因	作業	
47	胸部	その他	死亡	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	胸部	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	頭部等	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	スクリー	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

マン-マシンインタフェースの問題⁴⁾だと考えられており、現在も遠隔作業支援システムの開発が進められている。

一方、水中工事については、施工現場として見たときに水中は陸上と異なり、空気が無い、水圧がある、潮流や波は風に比べて外力として大きいという事象に加えて視界が不良な場合が一般的である。このため陸上遠隔操作では簡単な作業項目でも困難となる場合が多い。

これまで水中作業を自動化するための作業機械が考えられてきたが、水中では電波が通らないこと、光学式カメラでは濁りで視界が確保できないこと、陸上の測量機器は光学機械であり、水中では超音波を前提とした機器となり精度に限界があること、動力源として内燃機関は基本的に水中に持ち込めないなどといった技術上の難点が多く、陸上で常識のいるいわゆる建設機械類による簡単な機械化や合理化が行うことができずに今日に至っている。

このため、遠隔操作を基本としたシステムを構築することにより、こうした機器類を水中で稼働させ、合理的

かつ安全な水中の施工現場の実現を目指して、近年発展の著しいヴァーチャリアリティの技術の中で特にオーグメンテッドリアリティ (Augmented Reality) と呼ばれる手法を導入し、Bi-lateral 操作系を用いた遠隔操作によってオペレータの能力をできるだけ引き出すことによる有機的なシステムを開発した。

2. 水中油圧汎用機械の実状

2.1 水中バックホウの施工例

近年における水中施工の機械化の事例として水中バックホウの実用化が挙げられる。水中バックホウ⁵⁾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。対象としている工種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⁶⁾では、管理基準±30cmの捨石荒均しでの施工能力が35.4 m³/hであった。同様の条件下での作業において潜水士船1隻あたりの標準均し能力は4.3 m³/hであるため、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。図-1に平成7年に平良港パイロット事業における施工場所を、表-2に水中バックホウによる施工実績を示す。図-2に荒均し出来形を示す。

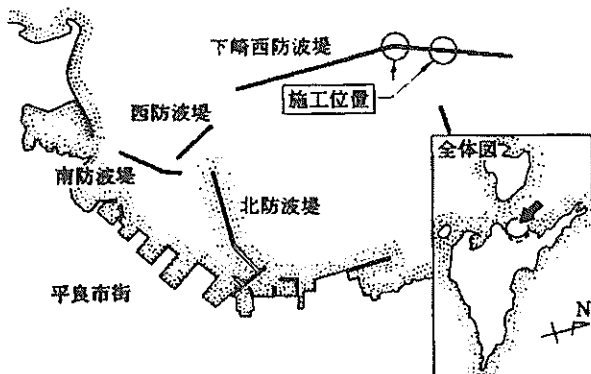


図-1 パイロット事業施工位置図

表-2 パイロット事業施工実績

	捨石荒均し	本均し補助	被覆石均し
作業数量 (m ³)	5,497	1,848	2,515
施工水深 (m)	-11.0 ~ -5.2	-6.2 ~ -4.9	-10.0 ~ -4.4
石材規格 (kg/個)	5 ~ 200	5 ~ 200	1,000
管理基準 (cm)	±30 ±50	±30	±30 ±50
均し能力 m ³ /H m ³ /日	35.4 137.4	35.0 142.8	12.2 46.6

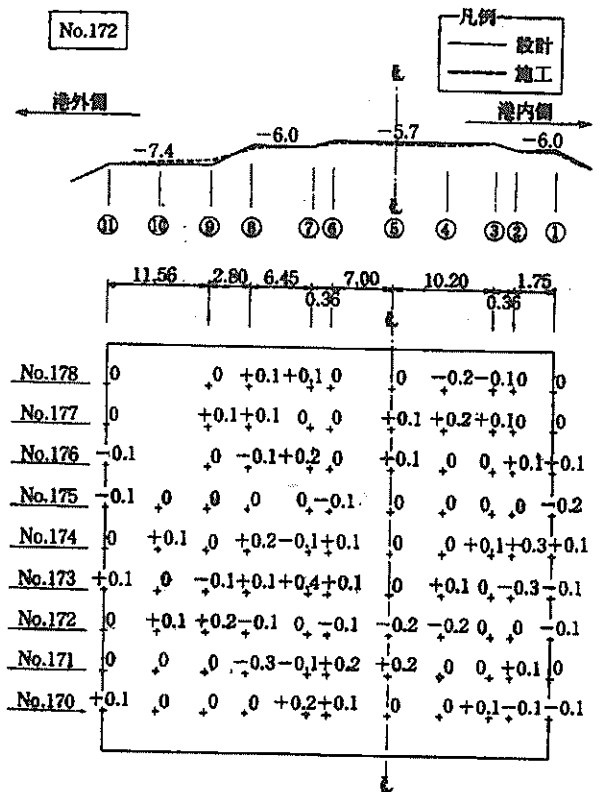


図-2 荒均し出来形 (単位: m)

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整形にも有効であると言える。

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。

2.2 水中バックホウ仕様

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-3に示す。この水中バックホウは平成7年に実施され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。主な特徴は動力源を支援船上に設置している点であり、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

ブを機体に搭載し動力として電圧を供給するE-H(ELECTRO-HYDRAULIC)方式も出現している。

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。

表-3 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 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

2.3 水中バックホウの問題点

しかしながら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。遠隔操作するためには前述の陸上工事のように作業区域全体を把握するための視点と、作業箇所を視認するための視覚情報等をTVカメラによって取得し遠隔地へその情報を伝達することが必要となるが、水中においては濁りの影響でその情報が得られないからである。また有人水中バックホウも同様の視覚に関する問題から沖縄等の水中透明度の高い地域での利用にとどまっている。

本研究においては、このように水中施工機械としてはもっとも進んだ開発活用がなされ、汎用性も高い水中バックホウの遠隔操作化を目標とした。

3. 遠隔操作化のための要素技術

3.1 オーグメンテッドリアリティ技術

これまで水中での遠隔操作化については視界情報のみが重要視されてきた。しかしバックホウに搭乗し運転している状況を考えてみると、オペレータはバケットの接

触音や車体に伝わる振動、油圧安全弁のかすかな音の変化を感じることによって、バックホウの対象物への接触状況や負荷の程度を認識している。このようにオペレータは操縦に際して視覚情報の他に振動、加速度、音等の情報も補助的に利用しているのにも関わらず、遠隔操作化においてこれらの情報の活用を考えることはこれまでなかった。

このような考え方はVirtual Realityの分野において提唱されており、人間の持つ優れた認識能力を利用することを前提に、必要な情報だけを選択し理解しやすい形に加工して呈示する技術を特にオーグメンテッドリアリティ(以下AR)技術と呼ばれている⁷⁾。

今までの水中遠隔操作では視覚情報をいかに確保するかについて技術開発が進められてきた。これに対して本研究ではオペレータが遠隔地にいても実際にバックホウに搭乗しているかのように感じるTele-Existance(遠隔臨場感)⁸⁾を高めることによって操作性を向上させるため、視覚情報の不足を触覚や聴覚で補うというAR技術を応用することによって水中遠隔操作の実現にアプローチすることとした。

本研究では遠隔操作化のための要素技術として相似形インタフェースによる操作システム、Bi-lateral制御による力覚認識システム、触覚情報の視覚化による地形認識システムを開発することとした。

3.2 相似形インタフェース

水中バックホウでの遠隔操作は過去に試験的に行われた事例があるが、操作装置は基本的にバックホウの操作卓の形状をそのまま小型化しリモートコントロールするものであったため必ずしも効率的な作業が行えなかった。このように水中バックホウの遠隔操作効率を向上するには操作が簡単でオペレータの直感に近い形で操作できる操作システムを開発する必要がある。

バックホウのフロント部はブーム・アーム・バケットの3つの部分で構成されており、オペレータがバックホウの姿勢を把握し必要な関節を必要な角度になるまで対応するレバーを用いて駆動させ、複雑な動作を実現させている。これは複数の関節を持つマニピュレータを対応する複数のレバーによりそれぞれ独立に操作しているロボットと考えることができる。これは操縦型ロボットへの指令方式の最も基本的な形である。

しかしロボットアームの関節が多くなった場合には操作が非常に複雑になるため、操作にはMaster-Slave方式⁹⁾が用いられる。これはSlave(操作される側のロボット)と同じ形をしたものを1つ用意し、これをMaster(操作

する側)として用いるものである。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へ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。また、その指令値にロボットが追従した後は、その時の操作用ロボットの姿勢が作業用ロボットの姿勢となり、姿勢の認識が容易となる。このような操作系をもつ入力システムを一般に相似形インタフェースと呼ぶ。

本研究ではこのような Master-Slave 方式をバックホウに適応するために相似形インタフェースによる操作システムを開発することとした。

3.3 Bi-lateral 制御技術

遠隔操作型ロボットハンドが作業を行うにあたり、対象物を掴んだ事をオペレータが認識するのに力情報の呈示は有効な手段である。これは視覚情報が得られない場合のバックホウ遠隔操作においても同様であり、バケットが対象物に接触したときの力情報は作業を行う上で非常に重要であると考えられる。このような力情報を呈示する方式として Bi-lateral 制御方式がある。

Bi-lateral 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 間で位置および力どうし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。「Bi-lateral」とは、「双方向」という意味である。これまでの遠隔操作に多く用いられてきた Master-Slave 位置制御型の系を「Uni-lateral」と呼ぶのに対して、位置制御に力覚制御を付加して Master と Slave 双方を制御する系を「Bi-lateral」と呼んでいる。現在、対称型、力逆送型などの方式が提案されている。

最も一般的な対称型 Bi-lateral 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。Slave に負荷がかかり停止した場合でも、その変位はマスタに拘束力としてフィードバックする。この方式は力を検出して制御系の位置制御にフィードバックしないので、制御が単純で安定性も高い。しかし Master に帰ってくる力情報は Slave にかかる負荷に比例しないため、荷重が与えられても変位しにくい機構には適していない。つまり油圧作業機械のような外力を加えても直ちにその力に応じた変位が得られない場合では適用できない。¹⁰⁾

力逆送型 Bi-lateral 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。構造的には Slave 側にセンサが必要となる等、対称型より多少複雑になる。図-3 に対称型のブロック図を、図-4 に力逆送型のブロック図を示す。以上のことから本研究では視覚情報を補完する第二の手段として Bi-lateral 制御技術を適用した力覚認識技術を開発することにした。

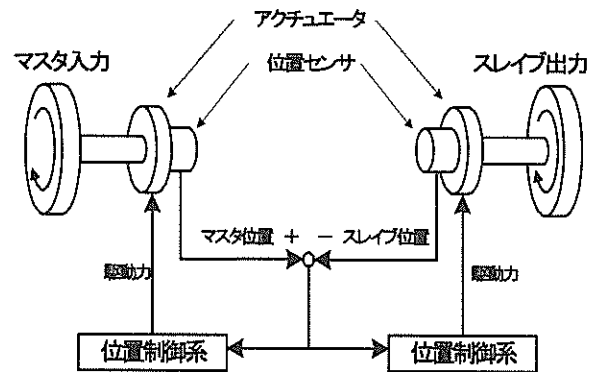


図-3 対称型 Bi-lateral 制御

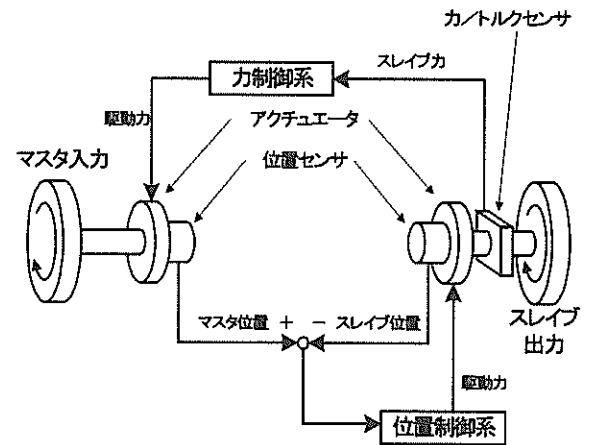


図-4 力逆送型 Bi-lateral 制御

3.4 触覚情報の視覚化

本研究では視覚情報を補完する第三の手法として、対象物に関する触覚情報を視覚化する技術を開発することとした。図-5 に触覚情報の視覚化に関する概念図を示す。これはコンピュータ上の空間を自由にポイントした場合、接触点の座標を蓄積し視覚情報として描画していくと、その形状が認識できるというものである。

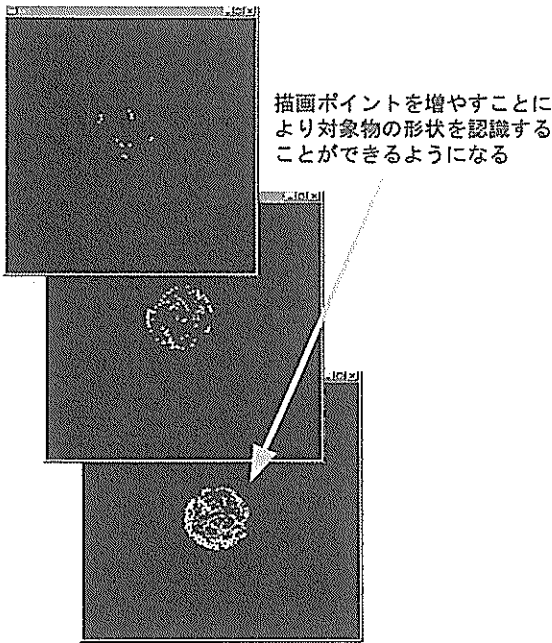


図-5 触像視覚化の概念図

3.5 バックホウ遠隔操作への適用

相似形インタフェースの開発については、現状の二本レバー形状を見直しバックホウのブーム・アーム・バケットと相似型の操作装置を開発することとした。さらにBi-lateral制御による力覚のフィードバックが可能なものとする。Bi-lateral制御についてはバックホウに適した具体的な制御システムを設計するとともに制御に必要なセンサや駆動システムを開発することとした。

Computer Graphicsによる地形描画については、触覚情報を視覚化するプログラムをアルゴリズムから開発するほか、バックホウの姿勢情報等を重畳表示できるプログラムを開発する。

図-6にこれら技術を組み合わせたバックホウ遠隔操作概念図を示す。

また、開発の手順としては制御システムの基本的な部分を検討するための、電動式の模型による室内実験を行い、その結果を受けてより実機に近い油圧式の実験機を開発し陸上実験を行うこととした。

4. 室内模型実験によるシステムの検証

4.1 実験模型システムの構築

一般に建設機械の遠隔操作では機体からの情報フィードバックを考慮しておらず、操作情報のみを送信するオープンループ制御を行っている。しかしAR技術を遠隔操作型バックホウの制御に応用するためには、操作情報

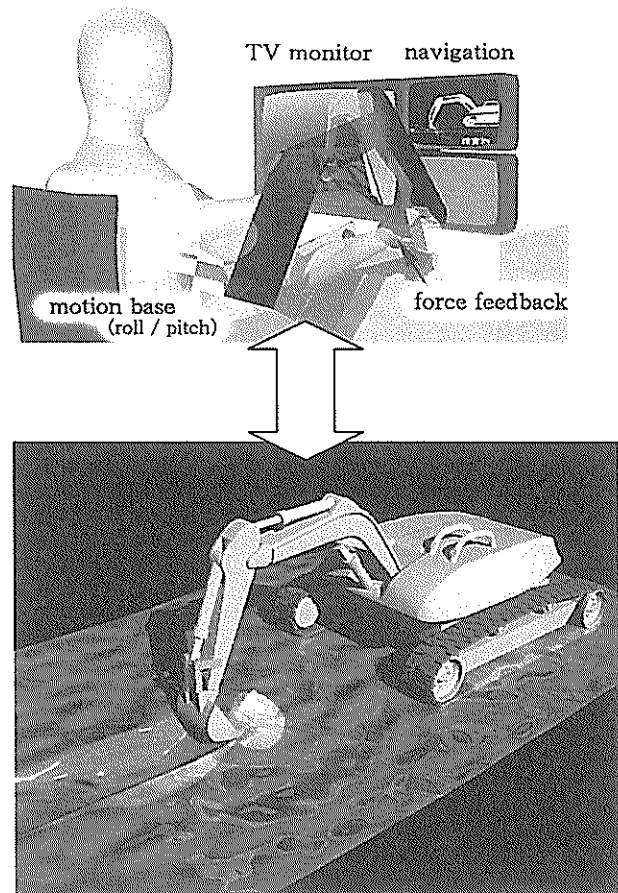


図-6 遠隔操作概念図

以外に機体からのフィードバック情報を必要とする。そのため制御対象となる機体情報の決定や対応する変数名、それらの値域等をすべて決定しておく必要がある。そこで実験模型を製作し、操作の検証を行うことでこれらの仕様を決定した。

実験模型はバックホウのフロント部を模した動作部と、三次元の座標入力による操作が可能な入力装置に分けられる。この入力装置はX軸Y軸Z軸の座標入力のほか、各軸まわりの回転角も入力することが可能となっている。また、それぞれに力を出力することができ、Force Feedback Displayとしての利用も可能となっている。形状はバックホウと相似形ではないが、その機能はバケット座標の入力、バケット角度の入力、力の呈示を行うことが可能であるため、模型実験においては本入力装置を用いることとした。今後の遠隔操作化を考慮し、装置の制御はそれぞれに設置されたPCによって行うようにしており、PC間はTCP/IP準拠のLocal Area Networkにより通信できるようにした。

入力機器により入力された座標及びピッチングの角度

は、それぞれ模型におけるバケットの先端座標とバケット角度と関連付けられており、y軸方向の入力で旋回を制御する。図-7に実験模型システム図を示す。

4.2 反力センサの検討

AR 技術を適用する場合、最も重要な情報は機体が受ける反力である。ロボットの遠隔操作に用いられる反力センサには、XYZ軸方向だけでなく各軸回りに受けるピッチ・ロール・ヨーのトルクをセンシングできる六軸センサがある。しかし、バックホウ実機の制御を考慮した場合、掘削力に耐えられる必要があるが、そのような六軸センサは存在しない。そのため本研究では高負荷に耐えられるロードセルの利用を想定した反力センサの機構を考案した。これはバケットが受ける力を掘削力、すなわちピッチング方向にかかるバケット軸トルクに限定し、引張圧縮型ロードセルにより計測するものである。また、反力情報をどこまで簡素なものにできるか確認するため、スイッチ式のセンサ機構を製作した。この二種類のセンサに対して、ロボットアーム用の六軸センサを利用したものと比較実験を行い、操作に必要な精度と反力情報を特定する。これらのセンサは実機へ取り付ける場合の改造を少なくするため、バケットとアームの間に取り付けるアタッチメント方式とした。図-8から図-10に反力センサ図を示す。写真-1に各反力センサの写真を示す。

4.3 触覚情報の視覚化プログラム

反力センサからの情報をもとに、前述の触覚情報を視覚化するプログラムを製作した。バックホウ機体の前面に未知の形状の対象物が存在した場合、それと接触した情報を反力センサで感知し、そのときの空間座標を Computer Graphic 上でポイントとして描画するものとした。また、このような対象物とバックホウ機体の位置関係を明確にするため、バケットの先端座標から各関節角度を計算してバックホウの姿勢として描画したものをこの画像に加えた。この Computer Graphic は三次元の情報をもっており、視点を自由に移動させることが可能となっている。

図-11 及び図-12 に反力情報を視覚化した時の映像を示す。

4.4 動作検証試験

(1) 反力呈示手法の検証

製作した実験模型により、反力呈示手法に関する検証を行った。入力装置にフィードバックする反力にはバケ

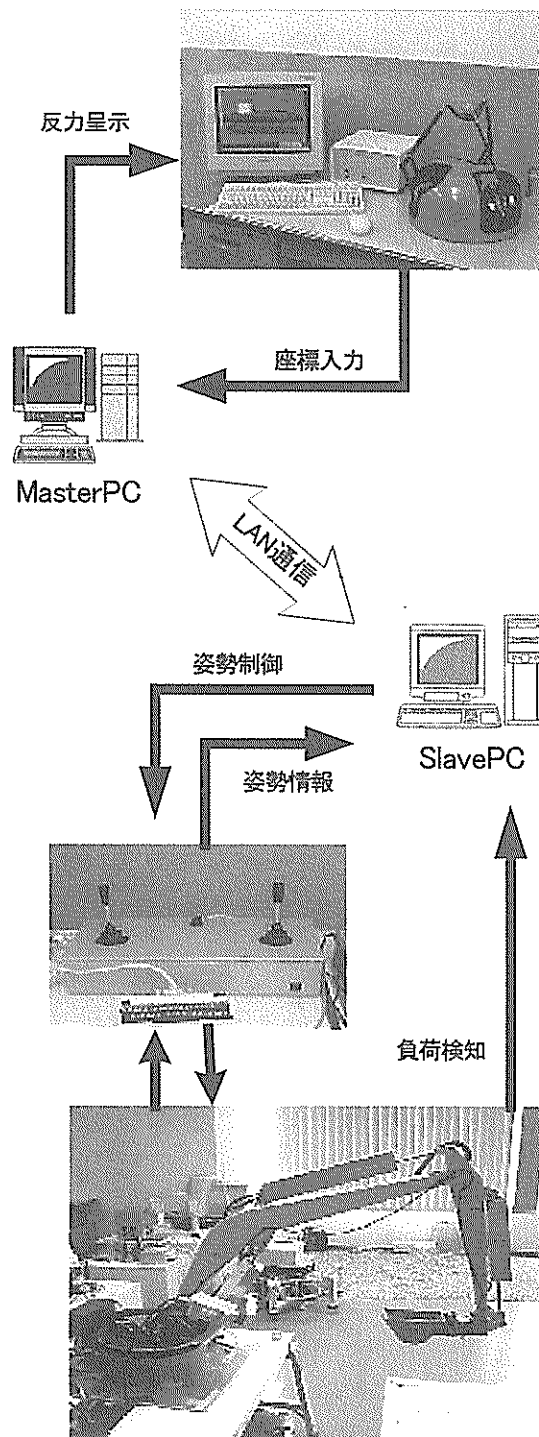


図-7 実験模型システム図

ットの受けるピッチングトルクのほかに、位置の差分を抑制するための出力を加えた。これは模型動作が遅く入力に追いつかない場合が多かったためである。例えば入力座標が先行している状態でバケットが対象物と接触した場合、力のフィードバックがかかったときの入力装置の座標が実機と異なるため、フィードバック情報の効果的な活用とならない。

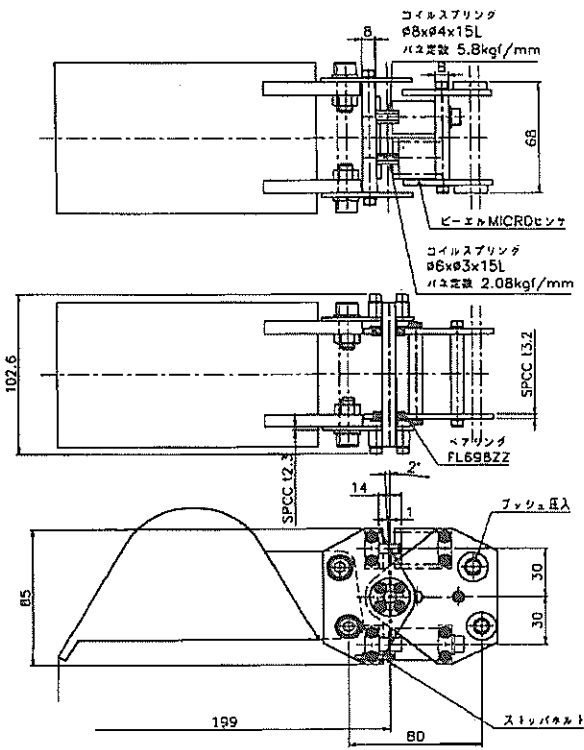


図-8 反力センサ (ロードセル型)

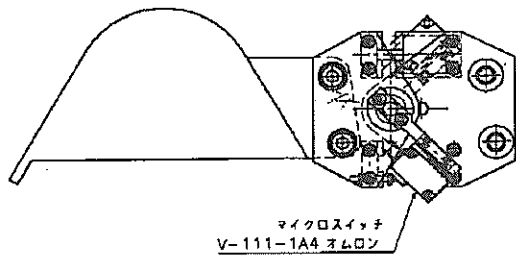


図-9 反力センサ (スイッチ型)

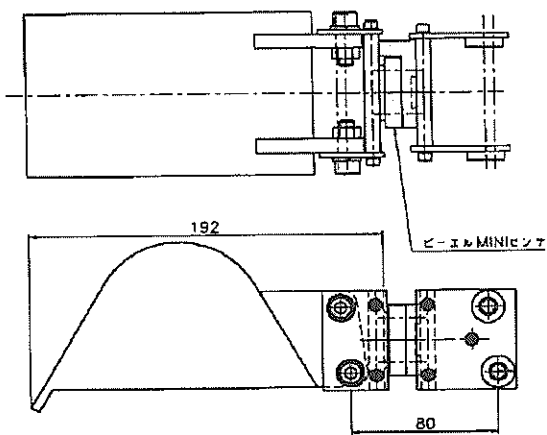


図-10 反力センサ (六軸センサ型)

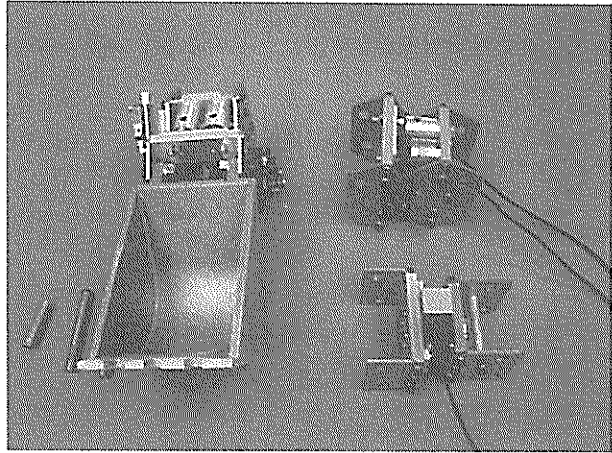


写真-1 反力センサ

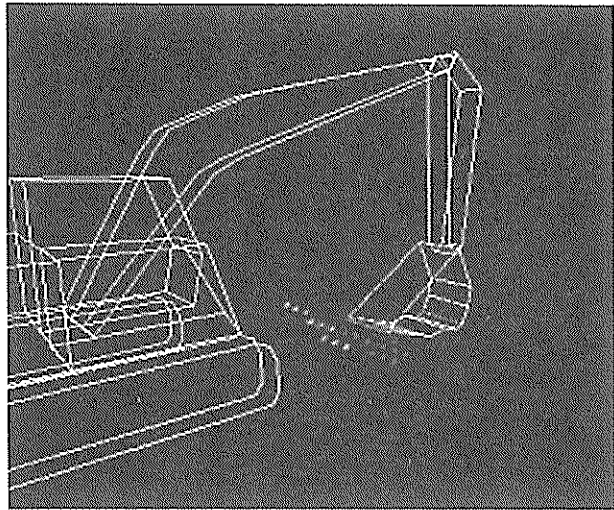


図-11 反力情報の視覚化 (自由視点)

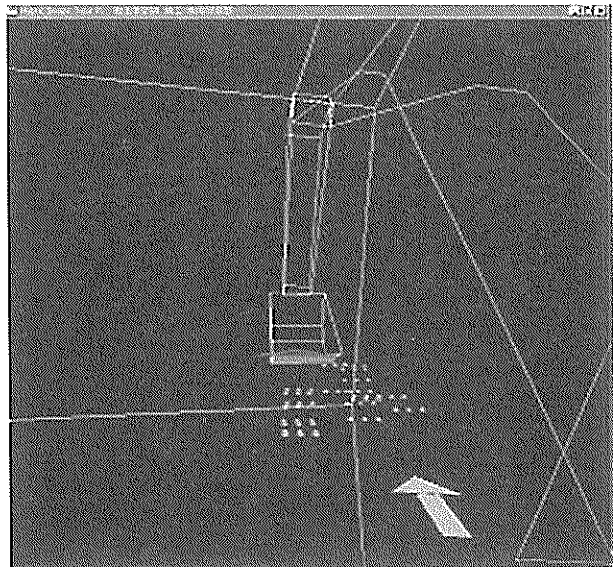


図-12 反力情報の視覚化 (運転席視点)

また、目標位置への誘導制御において模型が目標座標を示した瞬間に入力装置を固定しても、両者の座標が異なっているために模型は停止せず入力装置が示す座標までオーバーシュートしてしまう。

このような理由からバックホウ動作部と入力装置の位置の差分を抑える必要があった。この姿勢を抑制するための出力は、バックホウ動作部との角度の差分を計測し、その差分に比例した大きさの出力を逆方向に呈示するようにした。この方式により入力装置とバックホウ動作の位置を一定以内に抑えるようにした。

バケットが受ける負荷に関しては、ピッチング方向の接触情報のみを感知するスイッチ型、力の大きさまでを感知するロードセル型、XYZ 軸方向の力及び各軸回りのトルクを測定できる六軸センサ型の三種類のセンサを比較することでオペレータが最も操作しやすいと感じる入力方法を検討した。六軸センサで取得した場合、入力装置においてピッチングトルクと鉛直方向の力を呈示するようにした。ただしロードセル型とスイッチ型に関してはセンサ機構の関係上、ピッチング方向にのみ力の呈示を行った。

その結果、スイッチ型、ロードセル型の両者において接触の認識は十分可能であった。また六軸センサ型における、鉛直方向のフィードバック情報は、既に位置の差分を抑制する力が出力されているため重要な情報ではなかった。このため、バケットの接触情報はピッチング方向のトルクを検出する機構で十分であることが明らかになった。しかしスイッチ型の場合、力の大きさが感知できないため、カフィードバックが急激に立ち上がってしまい、その力によって入力装置が意図しない方向へ動いてしまうといった操作への悪影響が発生する場合があった。また接触感知の閾値の調整がソフトウェア上で不可能であるといったシステム開発上の不具合も発見したため、実験機の反力センサはロードセル型のものとした。

(2) バケット制御の検討

バケット制御手法としてはバケット速度を入力する速度制御とバケット姿勢を入力する位置制御が考えられる。バケット角は関節可動範囲が非常に大きいため入力装置の機構やオペレータの握り方に工夫が必要ではないかと考えていたが、実験から必ずしも可動範囲をすべて使う必要が無いことがわかった。これに対して速度を制御する方法ではバケットの角度が入力装置の姿勢と同一にならないため、姿勢の把握が困難であった。このためバケット操作入力方法は位置を制御する方法とした。

(3) 旋回操作方法の検討

旋回操作の入力方法において位置を制御する方法とするためには、入力装置を 360 度回して入力できる機構とする必要がある。

この入力方法の場合、ケーブル接続やモニタの設置のことを考えるとあまり現実的とは言えず、また速度制御としたときの問題点も特に無かったため、旋回操作に関してのみ相似形とせず y 軸への入力で旋回速度を制御する手法とした。

4.5 システム検証結果

模型による動作システム検証を行った結果、バックホウ制御対象を表-4 のとおり定めた。

実験模型の操作入力において、無負荷時には対称型 Bi-lateral 制御とし、センサで負荷を取得した場合に力逆送型 Bi-lateral 制御に移行する方法が有効であった。これはバックホウの動作が Master の操作に比べて非常に遅く Master-Slave 間での差分が大きくなりすぎるためであり、対称型 Bi-lateral 制御により一定以上の変位にならないよう拘束力を与えることとした。ただし負荷を取得した場合には、拘束力を大幅に上げた上にセンサで得たピッチングトルクを返し、オペレータに接触を認識させることとした。また、センサ機構は操作への影響とソフトウェアによる閾値の調整が可能なことを考慮してロードセル型とした。

動作確認では相似形入力、Bi-lateral 制御、触覚情報の視覚化をバックホウの遠隔操作に取り入れたシステムが正常に動作し、操作性についても従来方式と比べて操作が容易となるなど、そのシステムの妥当性が実証された。ただし、対象物を石にした場合の検証や油圧シリン

表-4 模型制御対象

	項目
模型制御	バケット座標 (X)
	バケット座標 (Z)
	バケット角度
	旋回速度
模型機体情報	バケット指示座標 (X)
	バケット指示座標 (Y)
	バケット指示座標 (Z)
	バケット角度
	旋回角
	バケットトルク
入力情報	入力座標 (X, Y, Z)
	バケット角度
入力装置制御	カフィードバック(姿勢差分抑制)
	カフィードバック(ピッチングトルク)

ダを制御することによる影響などについては本模型実験では確認することができないため、陸上実機において検証することとした。

5. 陸上実験によるシステムの検証

5.1 陸上実験用小型バックホウ

陸上実験機のベースマシンとしてバケット容量0.1m³クラスのミニショベルを用いた。写真-2に陸上実験機を示す。ベースマシンの側面図を図-13に、仕様を表-5に示す。

主な改造点はブーム・アーム・バケット角度取得用ポテンショメータの設置、比例電磁バルブの設置、比例電磁バルブ制御ボードの設置である。また、安全面に関してバルブ制御強制停止とエンジン強制停止の2系統の非常停止スイッチを設置した。

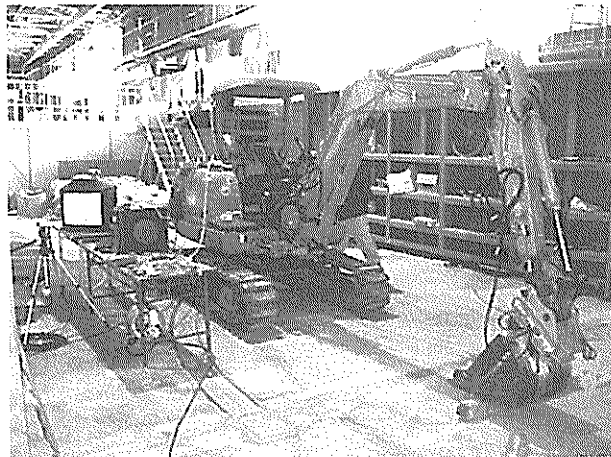


写真-2 ベースマシン

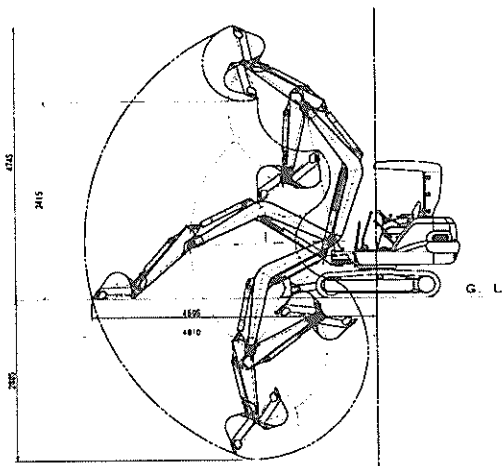


図-13 ベースマシン側面図

操作入力は搭乗による操作、PCからの指令による操作、リモコンによる操作が可能で、これらは運転席にあるスイッチで切り替えることが可能である。

陸上実験機の遠隔制御システムは実験模型によって検証された制御法に基づいている。制御対象も実験模型と同様にバケット先端座標とバケット角度を指令値として与え、その時のバケット先端座標とバケット角度、バケットにかかるトルクをフィードバックするものである。詳細については港空研資料「バイラテラル制御に対応した遠隔操作型バックホウの開発」¹⁾に示す。

5.2 相似形入力操作装置

Bi-lateral制御を行うためのバックホウ用相似形入力装置を図-14及び写真-3に示す。これは今回実験に用いる実験装置のフロント部分と相似の関係を持っており、さらに各関節独立に姿勢拘束力及び力覚フィードバックを出力するアクチュエータを持つ。

入力装置の制御に関しても、実験模型によって検証された制御法に基づいて設計製作されており、関節角度から先端座標を演算し指令値として出力する。また、バックホウから送られてきたフィードバック情報によってオペレータに力覚を提示する。

操作の容易さとバケットの可動範囲を考慮し、グリップ部分はペン型とした。グリップ部分には把持センサを内蔵しておりオペレータが手を離した場合、その瞬間の

表-5 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(m ³)	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)
備考	<ul style="list-style-type: none"> ・角度取得ポテンショメータ取付 ・遠隔操作受信機 ・比例電磁バルブ ・比例電磁バルブ制御ボード ・非常停止スイッチ(2系統)

姿勢を保持する。さらに姿勢情報や接触点を表示するタッチパネルディスプレイが取り付けられている。

5.3 Bi-lateral 制御による制御フロー

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PCを用いている。以下、入力装置を制御するPCをMasterPC、陸上実験用バックホウを制御するPCをSlavePC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SlavePCに持たせている。これにより通信ケーブル等の異常によりネットワーク切断された場合でも、SlavePCがスタンドアロンで動作し安全を確保するものとした。

SlavePCは常に起動しており、MasterPC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 フェイズに移行する。このフェイズでは、MasterPC、SlavePC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フェイズへ移行し、バックホウ機体姿勢をMasterPCに送信する。その姿勢はMasterPCにおいて描画され、オペレータは陸上実験用バックホウの姿勢と相似形入力装置の姿勢が重畳表示されているモニターを見ながらMaster-Slaveの姿勢を同調させる。両者の姿勢が同調するとMasterPCからSYNCコマンドを送信し、SlavePCが受信した時点で遠隔操作が開始される。このSYNCROフェイ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MasterPC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SlavePCに渡す。指令値を受け取ったSlavePC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角度センサによって計測されておりMasterPCへ機体姿勢情報として送信される。また計測されたバケットにかかるピッチングトルクは、機体情報と共にMasterPC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、MasterPCにおいてデータを監視し、一定以上の力が同じ方向に0.3sec以上継続した場合、接触として判断している。

SlavePC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。これは断線やMasterの不具合で通信が断絶した場合に

スピーカ

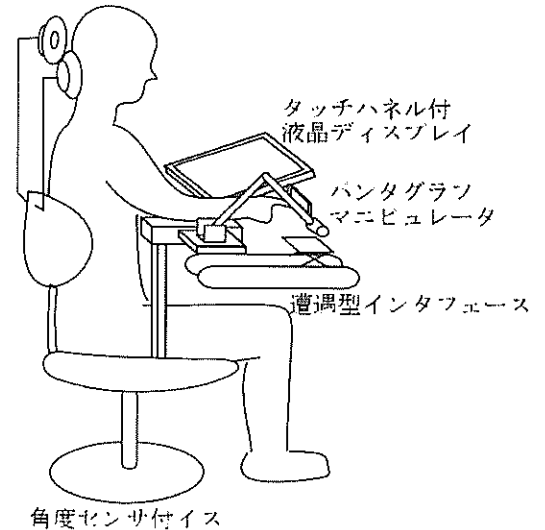


図-14 バックホウ用相似形入力装置概要

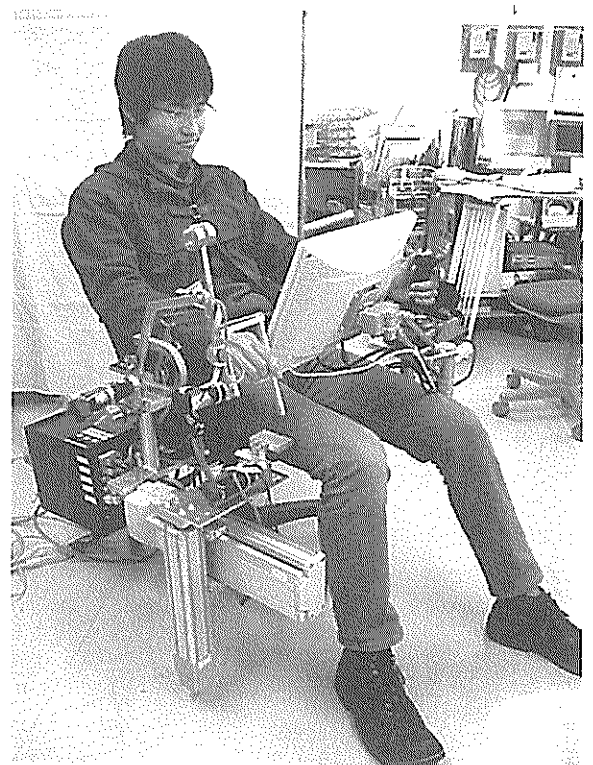
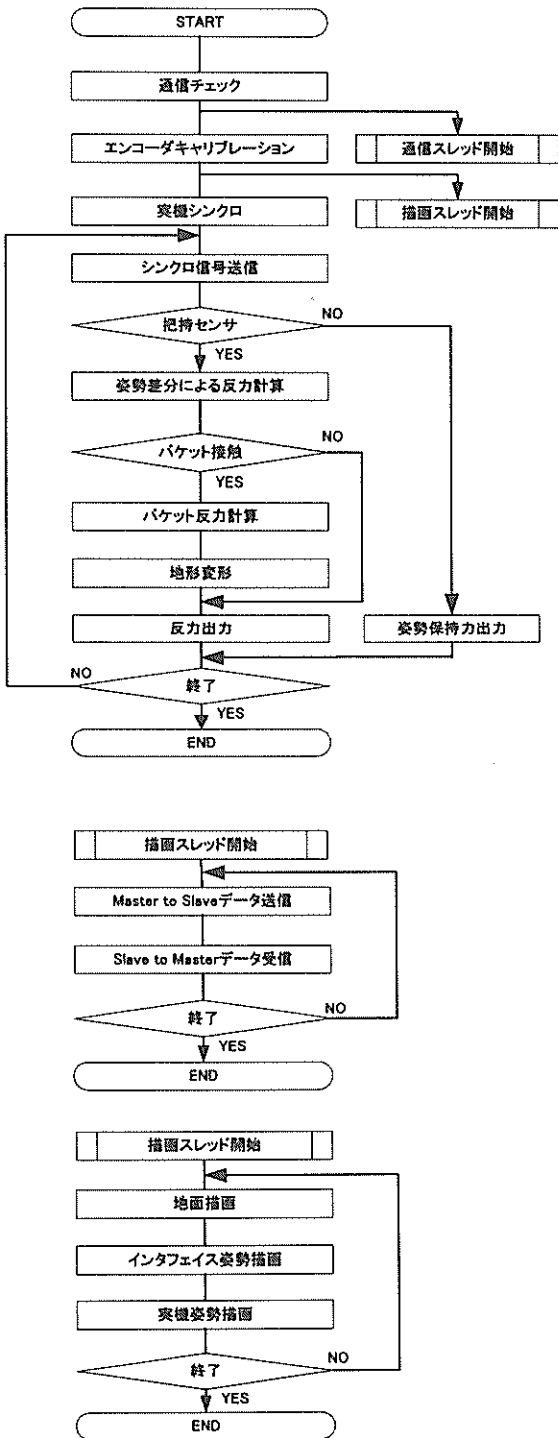


写真-3 バックホウ用相似形入力装置全体

備えたもので、0.3sec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MasterPCに送信する。図-15に制御フローチャートを示す。図-16にシステム概要図を示す。

MasterPC制御フロー



SlavePC制御フロー

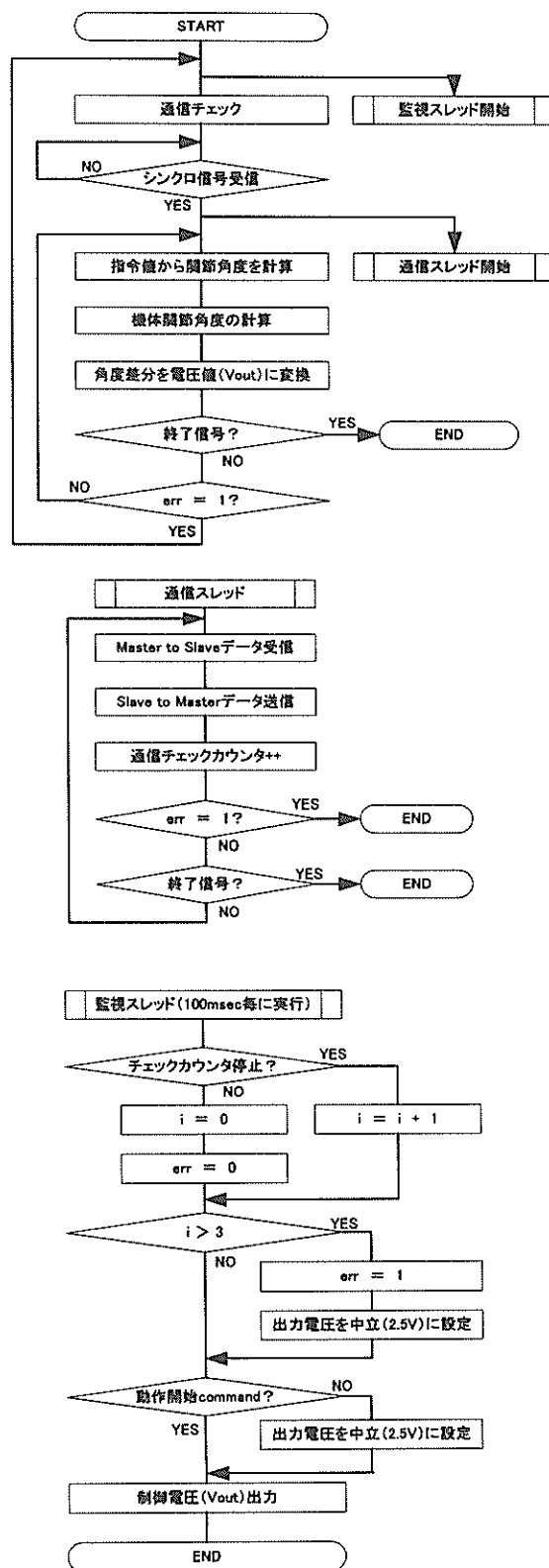


図-15 制御フローチャート

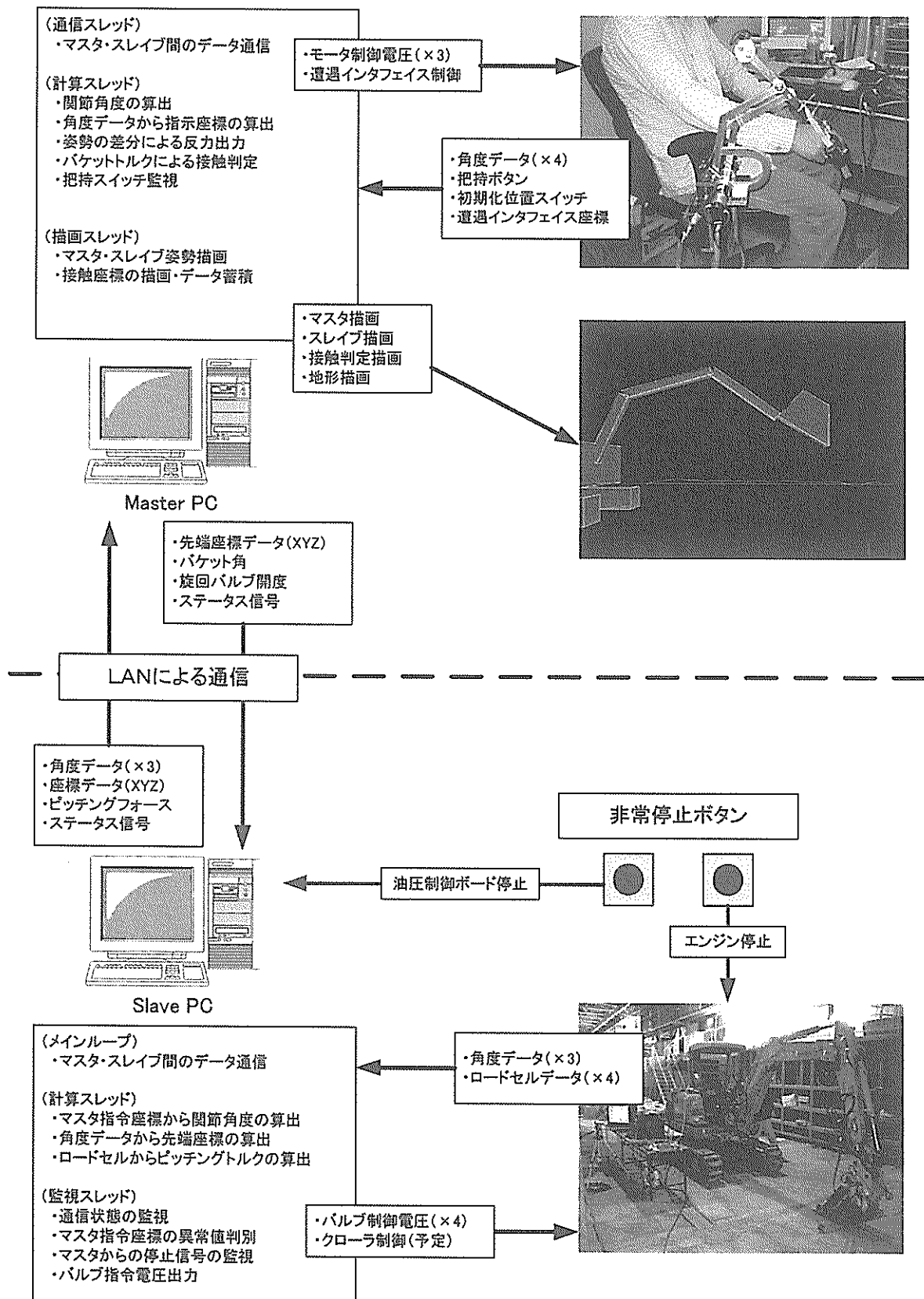


図-16 システム概要図

5.4 可変ゲイン位置対称型 Bi-lateral 制御

模型実験により、Bi-lateral 制御法について無負荷時には Master-Slave 間の姿勢変位を抑える対称型 Bi-lateral 制御とし、センサで負荷を取得した場合に接触認識の容易な力逆送型 Bi-lateral 制御に移行する方法が有効であることを確認した。このような制御法について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 Bi-lateral 制御¹²⁾と呼ばれており、本実験機の制御に関しても本制御を用いることとした。図-17 に本実験機の制御に関するブロック線図を示す。以下にブロック線図で使用した変数名の説明を示す。

ここで本ブロック線図に関して以下の条件を付す。

- ①軸抵抗などの機構的な負荷は無視する
- ②油圧シリンダに流れる作動油流量及びピストン受圧面積は push-pull 方向について等しいと仮定する
- ③パイロットバルブの開度は入力電圧に比例しその開度が作動油流量に比例する理想的なサーボ弁と仮定する

また油圧シリンダの運動方程式は条件①より式(1)と表すことができる。

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} = A_p \times p_s \quad (1)$$

さらに、シリンダに流れる作動油流量に関してはベルヌーイの定理を用いることで以下の式が成り立つ。

$$q = k_x x - k_p p_s \quad (2)$$

$$q = A_p \cdot \frac{dy}{dt} \quad (3)$$

式(1)に式(2)、式(3)を代入しまとめると

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \left(\frac{b}{m} - \frac{A_p^2}{mk_p} \right) \frac{dy}{dt} = \frac{A_p}{m} \cdot \frac{k_x}{k_p} \cdot x \quad (4)$$

となり、これが油圧シリンダ毎の運動方程式となる。

Master からの指令値は座標で与えられるため、逆運動方程式により各関節の角度に変換し、機体に取り付けられたポテンショメータからの角度情報をもとに位置制御を行っている。バルブ開度は作動油の流量を制御しているが、ピストンにかかる負荷もその作動油流量に影響を与えているため、式(2)によりその流量を算出する。

バックホウの各関節角度は Master にフィードバックされ、Master の関節角度との差分を 0 にする位置制御を行っている。オペレータの操作量は各関節の回転トルクに分解され、アクチュエータの回転トルクと加算される。このトルクは慣性モーメントで除算することで加速度となる。この加速度を二回積分したものが回転角となり、各回転角を順運動方程式により座標位置に変換したものをバックホウの指令座標とする。

また、バケットにかかるピッチングトルクは Slave の姿勢制御に用いず、MasterPC に直接渡される。このピッチングトルクの量は可変ゲインによって Master-Slave 姿勢差分の抑制力を増加させる。それにより無負荷の場合は少ない力で操作し、負荷がかかったときは入力装置を重く感じることでオペレータが接触や抵抗を認識する。さらに力伝達ゲインによって Master のバケット関節に電圧を加え力をフィードバックしており、均し動作時のバケットトルクの認識が可能となっている。

一般に油圧シリンダを位置対称型 Bi-lateral 制御した場合、その追従性能の低さから遅れが発生し、常に反力を出力してしまう。また、反力は位置差分に応じて増加するため負荷のかかる瞬間の認識は困難となる。さらに力逆送型 Bi-lateral 制御では、Slave からの力がオープンループで Master にフィードバックされることから、振動のおこる可能性が高い。可変ゲイン型 Bi-lateral 制御法は位置対象型 Bi-lateral 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。

5.5 触覚情報の視覚化アルゴリズム

接触情報によって推測地形を生成するアルゴリズムを図-18 に示す。

(1)バックホウの可動範囲の地面を 10cm 刻みでメッシュ化し、初期高さを適宜設定する。

(2)バックホウが実際の地形と接触したら、メッシュデータの最近傍の点 (i) の高さを接触点の高さとする。

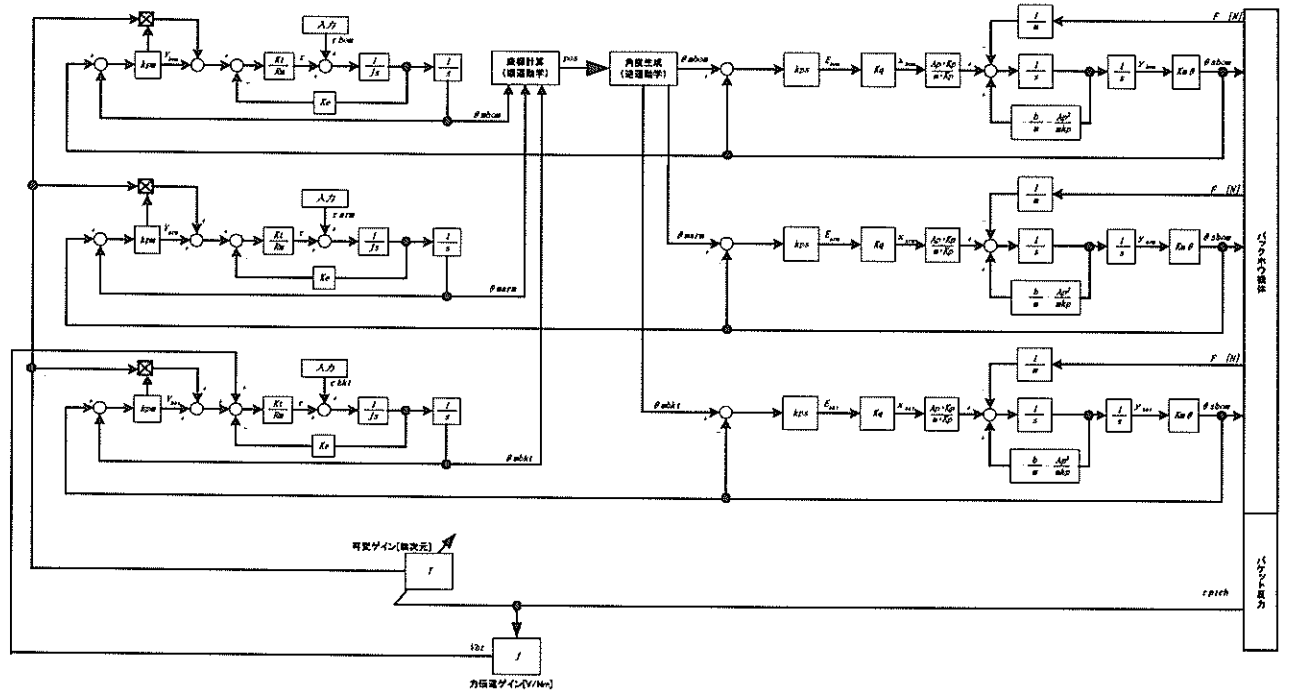


図-17 可変ゲイン型 Bi-lateral 制御 ブロック線図

- (3) 接触点の1つ隣の点 ($i-1$ および $i+1$) は、接触点の高さの75%とする。
- (4) 接触点の2つ隣の点 ($i-2$ および $i+2$) の高さを、接触点の高さの50%とする。
- (5) 接触点の3つ隣の点 ($i-3$ および $i+3$) の高さを、接触点の高さの25%とする。
- (6) (2)から(5)を繰り返す

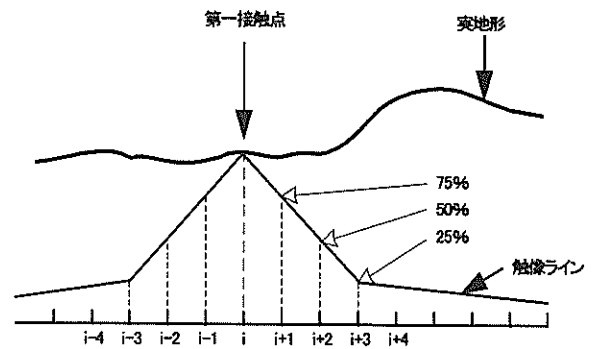


図-18 触像生成アルゴリズム (1)

たとえば図-19 に示すように、2回目の接触が $i+4$ の場所だったとすると、 $i+4$ の高さは接触点の高さになり、その左隣の $i+3$ は、接触点の高さとループ前の $i+3$ の高さの差分の75%だけ上昇する。2つ左隣の $i+2$ は、接触点の高さとループ前の $i+2$ の高さの差分の50%だけ上昇する。右側についても同様である。

実際に触像を生成している様子を図-20 に示す。画面には、相似形入力装置の姿勢を表した青色の機体描画と、角度センサからの情報を基に白色のワイヤフレームで書かれたバックホウ機体姿勢が側面視点から重畳表示されている。さらに目標高さを予め入力しており、画面では緑の線で表されている。また赤い線は触覚情報によって生成された地形情報を表している。

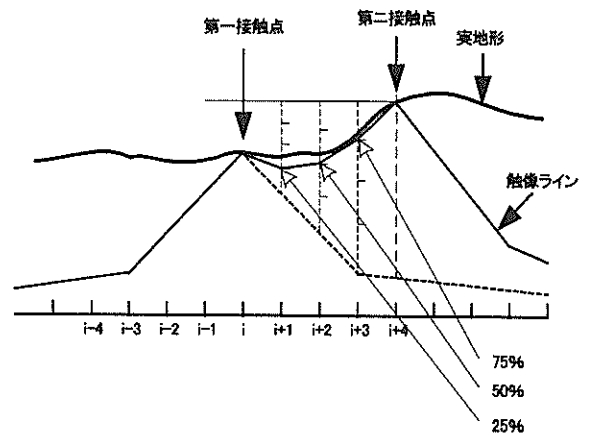


図-19 触像生成アルゴリズム (2)

実際のバケット先端が地面と接触が力センサで検出されると、バケット部分が赤く表示され、前述の地形生成アルゴリズムに基づいて地形情報を描画する。

なお、図-20では、実物とインタフェースの間に接触抵抗による作動遅れが発生しているため、両者にずれが生じている。このような負荷による作動遅れについても姿勢差分抑制のための力覚呈示を行っている。

図-21は触像生成作業終了時の触像の様子を示したものである。この画像により未知の地形形状を認識する。

今回の実験に使用したプログラムでは、バックホウ旋回中心から10cm間隔で50個の配列を用意し、接触した点に該当するポイントに高さ方向のデータを代入することとした。

5.6 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。本実験機では遠隔操作による旋回が行えないため、直線のみを均しとした。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。写真-4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。写真-5に制御室全景を示す。写真-6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-22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。

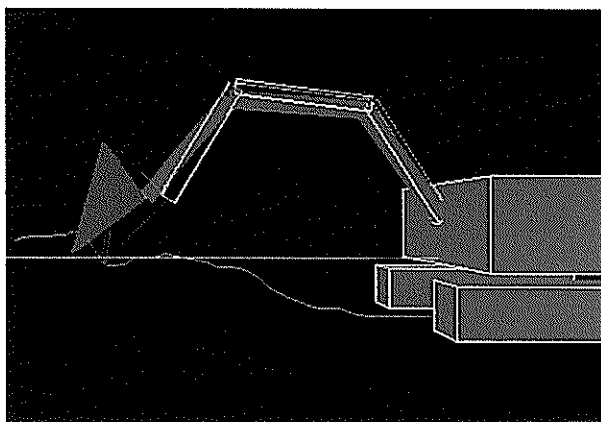


図-20 触像の生成過程

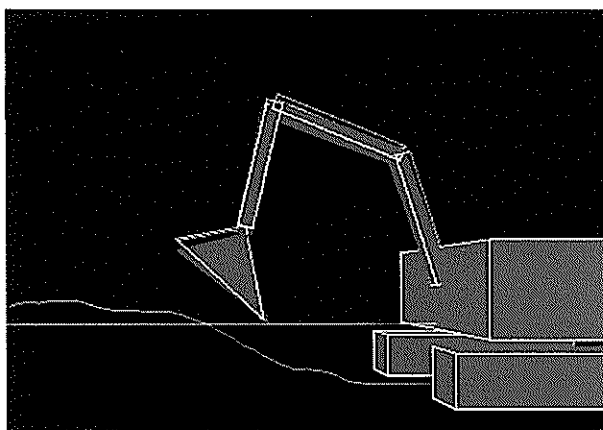


図-21 触像可視化の一例

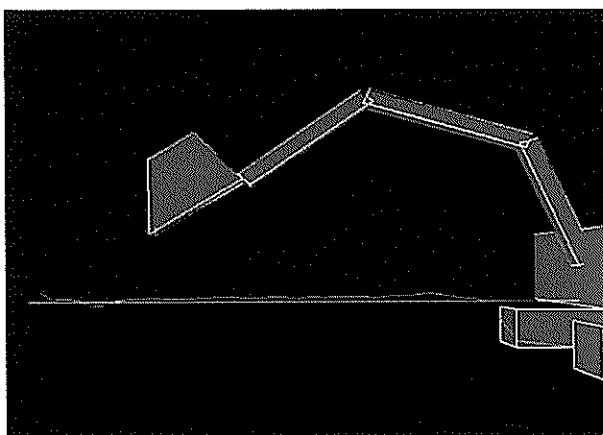


図-22 均し作業後のモニタ画像

5.7 結果

遠隔操作による慣らし作業の結果を図-23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-6 に示す。実験終了後の均し状況を写真-7 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±300mm を満たしていることが確認された。

5.8 誤差原因の検討

図-23 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刺さっても高さの更新はされない。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し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。



写真-4 実験対象石山



写真-5 制御室

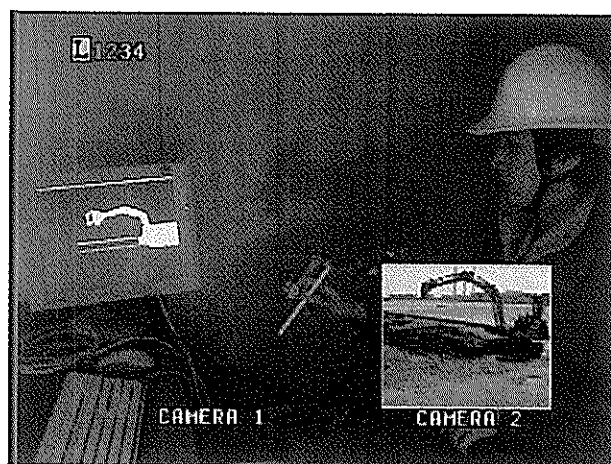


写真-6 操作状況

表-6 施工精度 (mm)

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

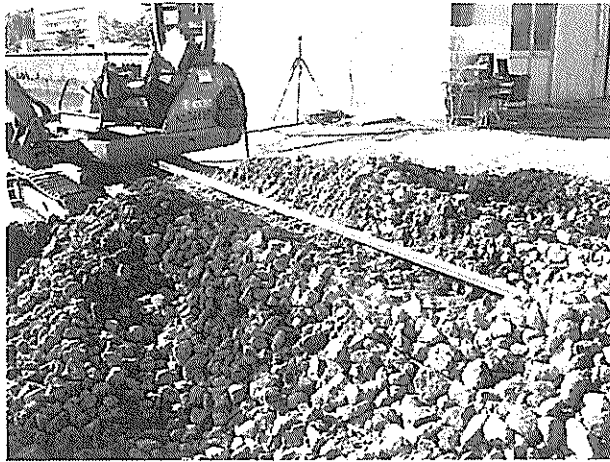


写真-7 均し作業後の状況

6. 結論

本研究では水中バックホウの遠隔操作化に AR 技術の導入を行ったシステムを開発しようとするものである。本研究は模型実験機によるシステム開発と、陸上小型バックホウによる実証試験を通じた成果の検証を行ったものである。

模型実験機では、Bi-lateral 制御及び触覚情報の視覚化を用いた遠隔操作システムを構築し、その制御方法と機器構成について検証を行った結果、以下の結論を得た。

- ①相似形入力を用いたシステムにより視覚及び反力情報がフィードバックされ直感的な操作が可能となる。
- ②バケットの制御には位置制御が適切である。
- ③旋回の制御には速度制御が適切である。
- ④Bi-lateral 制御について、無負荷時は対称型による姿勢差分増大の抑止を行い、接触を判断した場合には力逆送型に切替えて力覚を呈示する手法が適切である。

陸上小型バックホウによる実証試験では、これらの結論を基に開発された実験機を開発し、施工精度の実証試験として視覚情報の無い条件で均し作業を行った結果、以下の結論を得た。

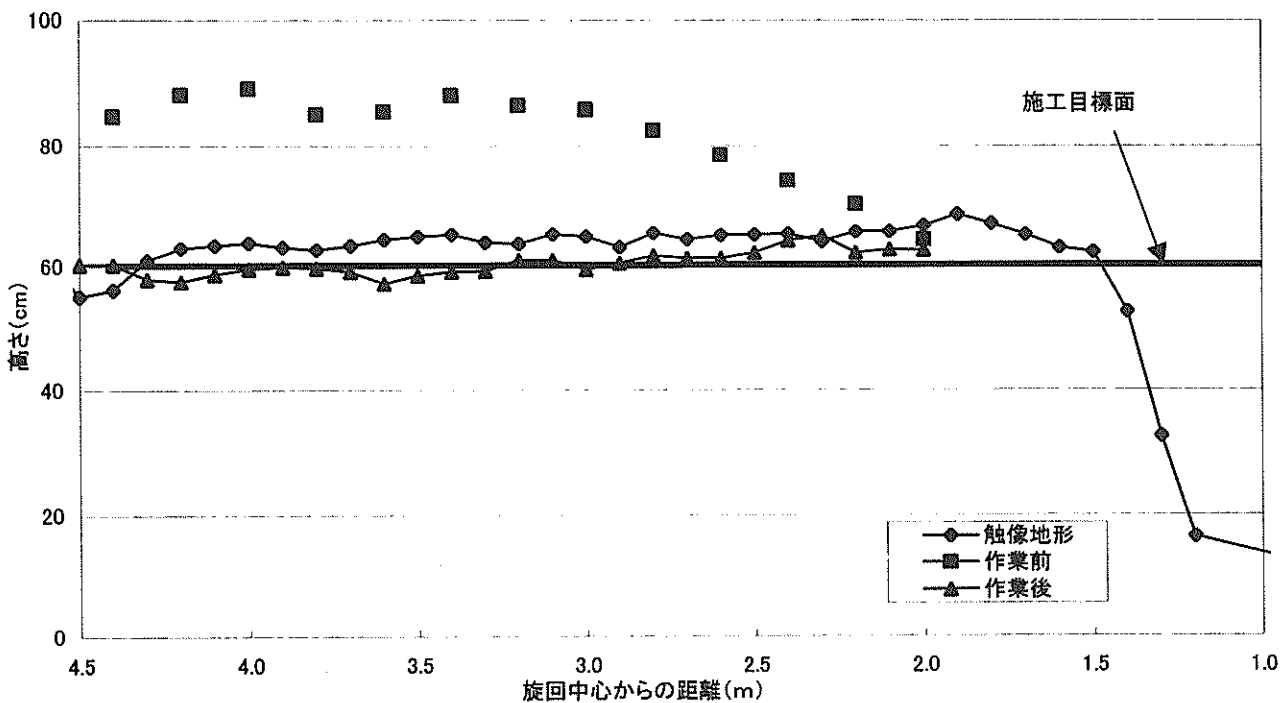


図-23 作業による地形高さ比較

- ⑤視覚情報の無い場所での作業に相似形入力システム、Bi-lateral 制御，触覚情報の視覚化による AR 技術の適用が有効である。
- ⑥本陸上実験機は管理基準±300mmの荒均し作業に対して十分な精度を有する。

また，今後の実用化を想定すると本実験によって発見された課題は以下のようにまとめられる。

- ⑦作業機械固有の精度による施工精度への影響を低減する手法が必要である。
- ⑧接触判断や地形描画アルゴリズムの高度化が必要である。

7. あとがき

本研究は，AR の技術を建設機械に応用するという独創性の高い研究であり，実際の陸上機械を用いて遠隔操作システムを構築し，その有効性を確認することができた。本研究の実施にあたっては，オペレータがどのような情報を用いて運転操作するのかを知ることが最も基本的で重要な事項である。このため整地用小型車両機械の講習を受け，自らバックホウを運転し，機械からの振動や負荷がかかった時の安全バルブの音といった視覚以外のフィードバック情報が操作性にどれだけ重要であるかなど，実際の運転状況を体験しながら研究を進めた。これらはヒアリングだけではわからなかった部分であり，今後はこういった情報の呈示手法も検討する必要があると認識している。

今回の実験は直線的な均し動作だけであったが，視覚を一切用いないで作業を行うことができたという点については非常に満足できる結果と考えている。

今後はこの遠隔操作システムをさらに高度化するため，旋回や移動を含めた総合陸上実験による施工能力調査を行い，最終的には水中実験により本システムの有効性を検証する予定である。

(2003年5月12日受付)

謝辞

本研究を行うにあたり，筑波大学機能工学系の矢野博明先生には，日頃より有益なご助言やご示唆，ご指摘を頂いた。また，筑波大学機能工学系の岩崎正揮氏には陸上実験実施に多大なるご尽力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 吉江宗生, 白井一洋, 田中敏成, 平林丈嗣: 港湾工事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論文集, 2000年, pp. 29-36.
- 2) 中田誠: ダイビングの事故・法的責任と問題, 杏林書院, 2001年, pp9.
- 3) 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, 財団法人先端建設技術センター編, 2001年, pp22-24.
- 4) 藤井政雄: 雲仙普賢岳における無人建設機械の操作実感, 建設機械1月号, 2000年, pp. 40-43.
- 5) 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
- 6) 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7月号, 1996年, pp. 17-22
- 7) 平林丈嗣, 吉江宗生, 内海真: 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, TECHNO OCEAN2000, 2000年, pp411-414.
- 8) 舘暲: バーチャルリアリティと実空間・ロボットから人間を読み解く, 日本放送出版協会, 1999年, pp. 166-179
- 9) 社団法人日本機会学会: 機械工学辞典, 社団法人日本機会学会, 1997年, pp1024-1025.
- 10) 江川栄治, 生田正治, 小関光弘: 油圧ショベルのワンレバー式操縦システムの開発, 第9回建設ロボットシンポジウム論文集, 2002年, pp. 241-248
- 11) 平林丈嗣, 山本恭, 酒井浩, 秋園純一, 内海真: バイラテラル制御に対応した遠隔操作型バックホウの開発, 港湾空港技術研究所資料 No. 1057, 2003年
- 12) 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年, pp. 140-147

記号表

A_p : ピストンシリンダ受圧面積	[m ²]
b : 粘性抵抗係数	[Ns/m]
J : 慣性モーメント	[kg・m ²]
K_e : 逆起電力定数	[V・sec/rad]
km_θ : シリンダ変位-角度変換ゲイン	[rad/m]
K_p : 圧力ゲイン	[m ⁴ s/kg]
K_{pm}, K_{ps} : 角度変位-電圧変換ゲイン	[V/rad]

K_t : トルク定数	[N・m/A]
K_x : 流量ゲイン	[m ² /s]
m : 慣性負荷質量	[kg]
P : 供給圧力	[Pa]
P_s : ピストン圧力	[Pa]
q, q_1, q_2 : 流量	[m ³ /s]
R_m : 電機子抵抗	[Ω]
T : 可変ゲイン	[-]
T_v : 力伝達ゲイン	[V/N・m]
v : 流速	[m/s]
x : サーボ弁変位	[m]
y : シリンダ変位	[m]
ρ : 密度	[kg/m ³]