

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1057 September 2003

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

平	林	丈	嗣
山	本		恭
酒	井		浩
秋	園	純	一
内	海		真

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	3
1. まえがき	4
2. 実験機の開発概要	4
3. 油圧制御系統	5
3.1 比例電磁バルブの取付け	5
3.2 遠隔操作用バルブドライバの取付け	5
3.3 無線式リモコン装置の取付け	6
4. 角度センサ	7
4.1 関節ポテンシオメータの取付	7
4.2 ポテンシオメータの特性	8
4.3 バケットリンク機構に対する角度計算	8
4.4 バックホウの運動学問題	9
5. アタッチメント型反力センサの開発	10
5.1 アタッチメント型反力センサの製作	10
5.2 アタッチメント型反力センサの特性	11
6. 制御プログラムの開発	12
6.1 D/A ボードによるバルブ制御	12
6.2 A/D 電圧入力ボードによる姿勢認識	12
6.3 比例制御によるバックホウの遠隔操作	13
7. 通信プログラムの開発	13
7.1 通信プロトコルの決定	13
7.2 制御プログラムフローチャート	13
7.3 断線試験	15
8. 動作確認試験	15
8.1 試験内容	15
8.2 遠隔操作性能試験	15
8.3 動作精度試験	15
9. 結論	16
10. あとがき	18
謝 辞	18
参考文献	18
付 録	19

Development of the experimental backhoe with Bi-lateral operation

Taketsugu HIRABAYASHI*
Takashi YAMAMOTO **
Hiroshi SAKAI***
Jun-ichi AKIZONO ****
Makoto UTSUMI*****

Synopsis

This paper describes the manufacturing of an experimental backhoe for advanced remote-control system. The experimental backhoe is reconstruction of 0.1 m³ class mini shovel attaching proportional-type electric control valves for hydraulic power, valve drivers, potentiometers for joint angles, a reaction force sensor.

These sensor data acquisition and hydraulic power control are systematically carried out by A/D, D/A interface boards of control PC. When the control PC receives coordinate data directed from the input device, it calculates the joint angles of backhoe to follow the coordinate, and then controls the electric control valves automatically. The experimental backhoe has 2 ways of manual emergency stop. When the network of control system is broken down, all the electric control valves are returned to neutral.

Key Words : Bi-lateral control, underwater backhoe, remote control, Augmented Reality

*Researcher of Control Systems Division, Constructions and Control systems Department

** Trainee of Control Systems Division, Constructions and Control systems Department, Saeki Kensetsu Kogyo Co

***Head of Control Systems Division, Constructions and Control systems Department

****Research Coordinator for Advanced Technology, Constructions and Control systems Department

*****Specific researcher of Control Systems Division, Constructions and Control systems Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-468-445062 Fax : +81-468-440575 e-mail : hirabayashi@pari.go.jp

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

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

要 旨

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。本資料は遠隔制御システムの実験に用いる陸上実験機の製作に関するものである。

陸上実験機はバケット容量 0.1m³クラスのミニショベルをベースに、パイロット油圧制御用比例電磁バルブ、バルブドライバ、姿勢角度ポテンシオメータ、反力取得センサアタッチメントを付加したものである。これらのセンサデータ取得及び油圧制御にはコントロール用 PC の A/D・D/A インタフェイスボードにより統合的に行われている。コントロール用 PC は入力装置からの指令座標データを受けると、その座標に追従するようバックホウ関節角度を計算しパイロット油圧制御用比例電磁バルブを自動でコントロールする。安全対策として非常停止を 2 系統有し、ネットワーク断線時にはすべてのパイロット油圧制御用比例電磁バルブを中立にする。

キーワード：Bi-lateral 制御，水中バックホウ，遠隔制御，Augmented Reality

-
- * 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

1. まえがき

陸上、特に災害復旧現場において油圧汎用施工機械の遠隔操作技術が進歩している¹⁾。平成6年の雲仙普賢岳火山噴火災害対策や、平成12年の有珠山火山噴火災害対策など、災害現場での実践的技術開発により遠隔操作技術は大きく進歩した。国土交通省においても平成13年7月に公共事業への無人化施工(Unmanned Construction System)の本格的導入を発表しており、今後は災害復旧だけでなく一般工事への汎用化やコスト軽減化を図った器機の整備が予想される。しかしこれらはあくまで陸上施工を対象にしており、操作も市販されているリモートコントロール装置を使用するなど、現状の操作卓の形状と大きな違いは無い。技術開発の対象も電波の送受信技術や複数TVカメラによる視認技術に重点を置いている。

このように、現状の無人化施工技術は対象が陸上施工であるという前提のもとに開発されたものであり、つまり条件としてはモニターで視覚を確保できる必要があるということである。

本研究は水中作業の遠隔操作化を目的として、Bi-lateral制御技術とオーグメンティドリアリティ技術を組み合わせた新しい発想に基づく施工機械システムを構築しようとするものである。これは水中施工において欠落しやすい視覚情報を触覚情報により補うことで認識力を高めるものである。オペレータは施工機械と相似形の入力機器を用いて操作を行い、同時に入力機器に呈示されるカフィードバック情報から地形情報を得る。さらに接触のあったポイントを画面に表示させ触像の視覚化を行うことにより、濁水中の地形情報を得ようとするものである。

これまでの研究によって、これらの技術を代表的な水中機械であるバックホウに適用した場合の制御手法について基本的なシステムの設計を行うことができた。さらに、この考え方を電動の室内実験装置として具体化し、これを用いた室内実験を行うことで、我々が提案した制御システムが遠隔操作技術として有効であることを示した²⁾。

しかしながら、建設機械のような過酷で特殊な環境条件で稼動する機器に適用される技術は、実機規模での実用性の確認が必要不可欠である。すなわち、まず、第一にそのような新しい発想に基づく施工機械が実際に製作可能であるのか、さらにその施工機械が室内実験で示した性能を実機レベルで発揮することが可能であるのか、これらについて確認することは研究の極めて重要な部分であると言える。

このため、本研究では、室内実験で得られた成果に基づき、実機規模の油圧式の遠隔操作型実験機を開発し、これ

を用いた陸上実験を実施することにより、油圧式バックホウの遠隔操作に関する各種の性能を確認し、我々が開発した新システムの有効性を実機レベルで検証することとした。本論文では、実験機の開発と動作確認試験について報告する。

2. 実験機の開発概要

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-1にベースマシンの側面図を示す。表-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系統の改造が必要となる。これについては第3章に述べる。

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。第4章に、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。

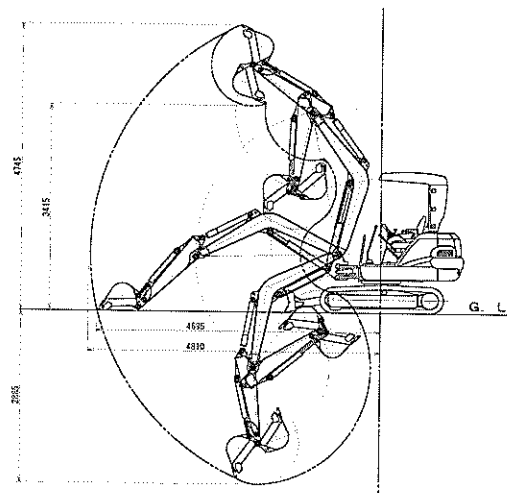


図-1 ベースマシン側面図

バイラテラル制御技術を具体化するために最も重要な情報の一つは、バケット先端に作用する対象物からの反力である。これを検知する実機規模の反力センサの開発につ

いては第5章に述べる。

さらに、操縦装置と実験機で構成される陸上実験システム全体の制御系の基本システム構成を第6章に、操縦装置と実験機間の通信プログラムについては第7章に、開発した実験機の動作確認試験の結果については第8章に述べる。

なお、本報告では実験機のフロント部の改造のみについて記述しており、旋回、移動に関する動作については別途報告する。

3. 油圧制御系統

3.1 比例電磁バルブの取付け

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 springs 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。そこで低圧の油圧系統を別に設け、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。この低圧の油圧系統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。写真-1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用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。

3.2 遠隔操作用バルブドライバの取付け

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写真-2に示す。バルブドライバの仕様を表-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。

表-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(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)

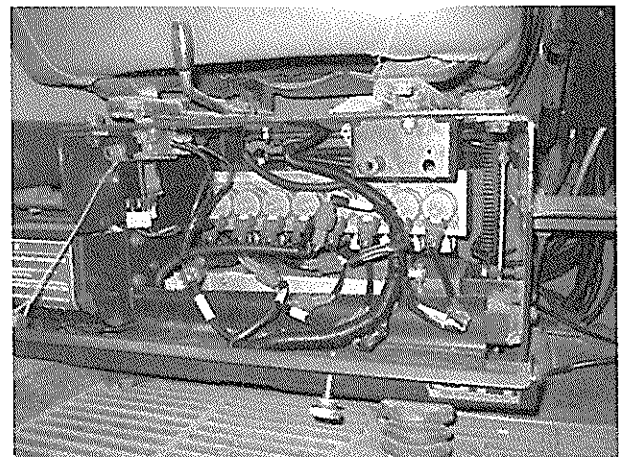


写真-1 比例電磁バルブ

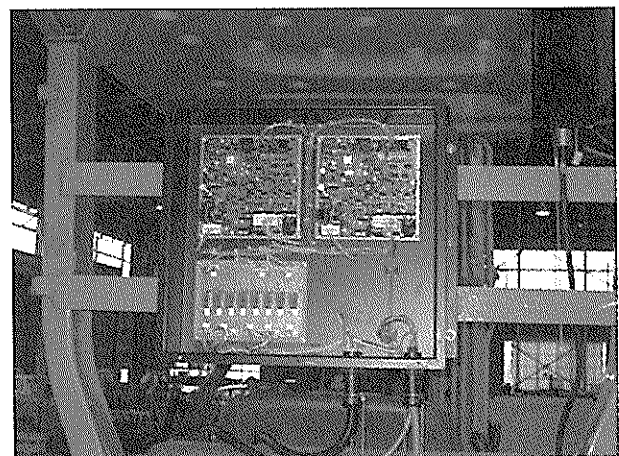


写真-2 バルブドライバ設置状況

表-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	



写真-3 非常停止ボタン

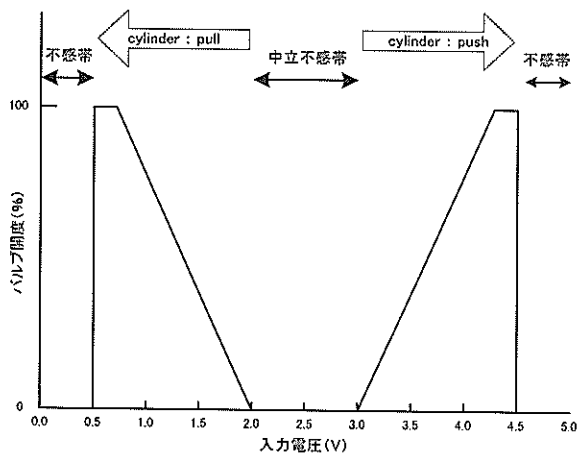


図-2 入力電圧-バルブ開度

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-2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。写真-3に非常停止ボタンの写真を示す。

3.3 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写真-4に、リモコン装置受信部を写真-5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-3に示す。

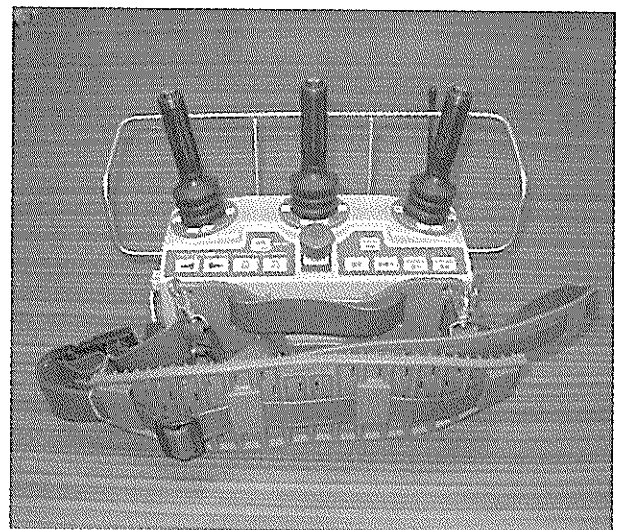


写真-4 リモコン装置操作部



写真-5 リモコン操作受信部

表-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
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×H70×D150mm

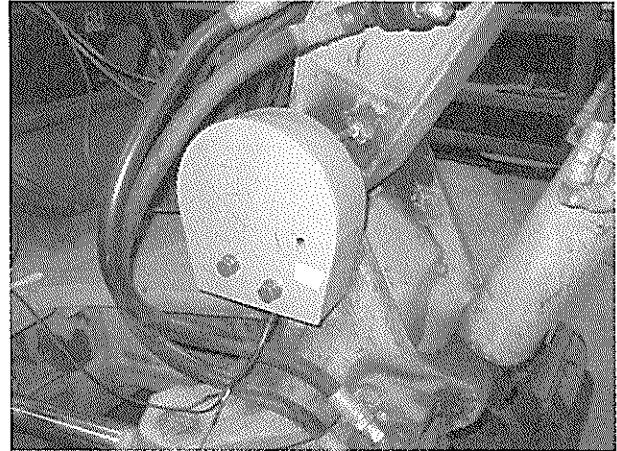


写真-6 ブーム軸ポテンシオメータ取付状況

4. 角度センサ

4.1 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にポテンシオメータの仕様を写真-6から写真-8に各ポテンシオメータの設置状況を示す。

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0.75mm²のシールド線とした。



写真-7 アーム軸ポテンシオメータ取付状況

表-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)	

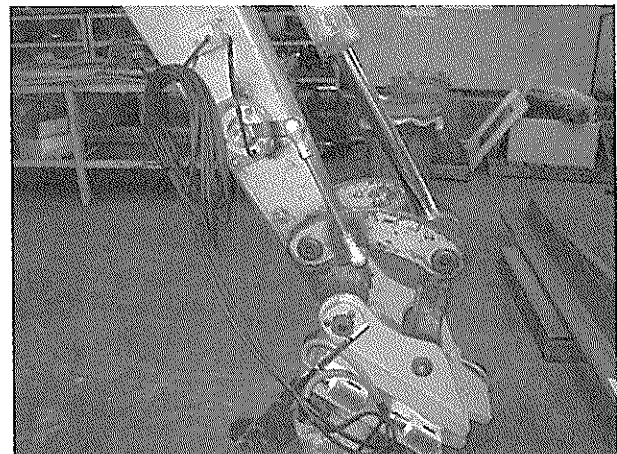


写真-8 バケット軸ポテンシオメータ取付状況

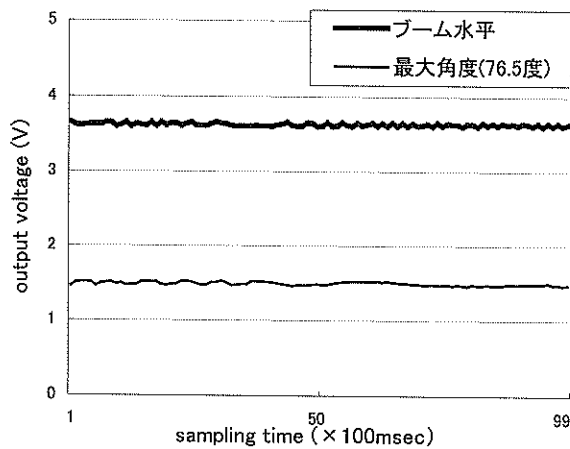


図-3 ブーム軸ポテンシオメータ特性

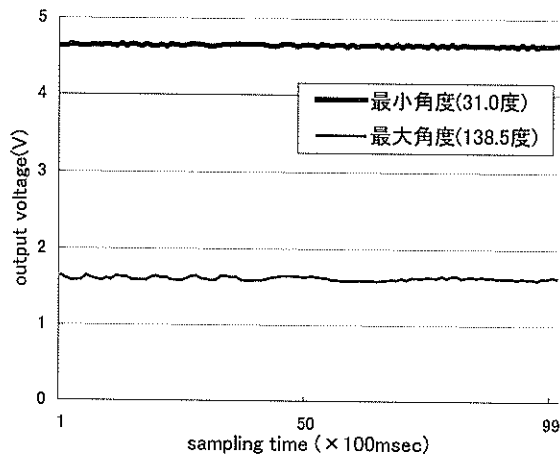


図-4 アーム軸ポテンシオメータ特性

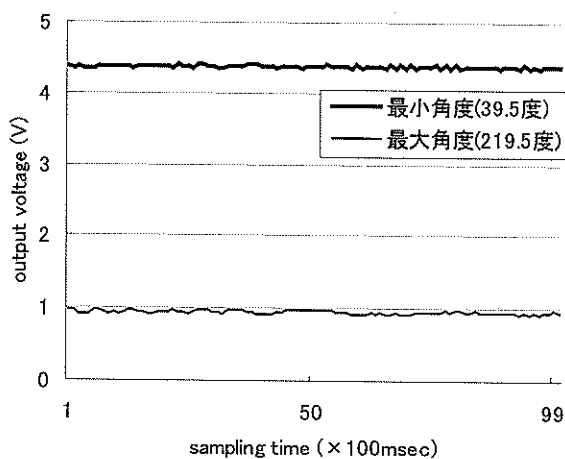


図-5 バケット軸ポテンシオメータ特性

4.2 ポテンシオメータの特性

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100msecで99回のサンプリングを行っている。図-3から図-5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4.3m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。

4.3 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-6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。ポテンシオメータによる検出角度を $th1$ としたときのバケット角度 thB を求める計算式を式(1)に記す。

$$thB = 266^\circ - \cos^{-1} \frac{0.05 - 0.08 \cos\{(th1) - 17^\circ\}}{0.306 \sqrt{0.09 - 0.08 \cos\{(th1) - 17^\circ\}}} - \cos^{-1} \frac{0.07 - 0.08 \cos\{(th1) - 17^\circ\}}{0.370 \sqrt{0.09 - 0.08 \cos\{(th1) - 17^\circ\}}} \quad (1)$$

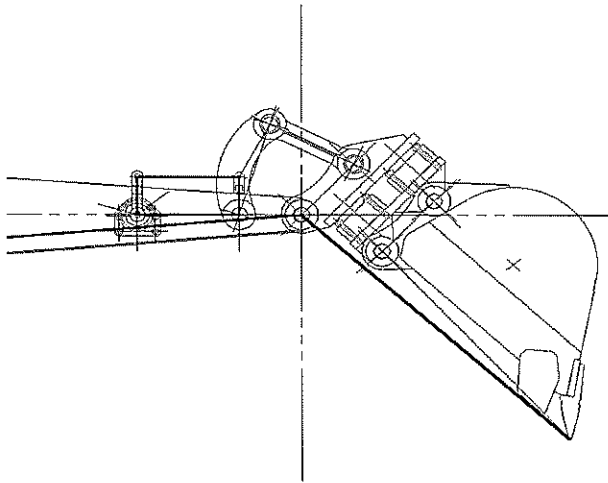


図-6 バケットリンク機構

4.4 バックホウの運動学問題

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

$$r = f(q) \quad (2)$$

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³⁾と呼ぶ。

図-7 に示す $x-z$ 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。

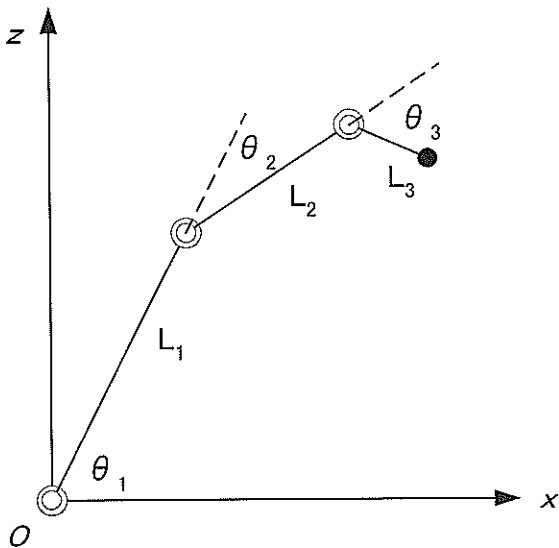


図-7 バックホウモデル

順運動学問題は三角関数の定理より

$$\begin{aligned} x &= L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ z &= L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ \theta &= \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \end{aligned} \quad (3)$$

と導くことができる。次に逆運動学を求める。

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

に式(3)を代入し整理すると

$$\begin{aligned} &(z - L_3 \sin \theta) \sin \theta_1 + (x - L_3 \cos \theta) \cos \theta_1 \\ &= \left\{ (z - L_3 \sin \theta)^2 + (x - L_3 \cos \theta)^2 + L_1^2 - L_2^2 \right\} / (2L_1) \end{aligned} \quad (5)$$

となる。ここで

$$a \sin \sigma + b \cos \sigma = c \quad (6)$$

の関係式が成立するとき

$$\phi = a \tan 2(a, b) \quad (7)$$

と置くと、三角関数の合成則より

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

$$\sin(\phi - \sigma) = \pm \sqrt{(a^2 + b^2 + c^2) / (a^2 + b^2)} \quad (9)$$

となり、 σ は

$$\sigma = a \tan 2(a, b) - a \tan 2(\pm \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}, c) \quad (10)$$

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(10)によって θ_1 を得る。同様にし

$$L_1^2 = (L_1 \sin \theta_1)^2 + (L_1 \cos \theta_1)^2 \quad (11)$$

に式(3)の関係を代入し整理すると

$$(z - L_3 \sin \theta) \sin(\theta_1 + \theta_2) + (x - L_3 \cos \theta) (\theta_1 + \theta_2) = d \quad (12)$$

を得る。ただし

$$d = \left\{ (z - L_3 \sin \theta)^2 + (x - L_3 \cos \theta)^2 - L_1^2 + L_2^2 \right\} / (2L_2) \quad (13)$$

である。これより

$$\theta_2 = a \tan 2(\pm \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}, c) - a \tan 2(\mp \sqrt{a^2 + b^2 + d^2}, d) \quad (14)$$

を得る。 θ_3 は

$$\theta_3 = \theta - \theta_2 - \theta_1 \quad (15)$$

で求める。(14)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。

5. アタッチメント型反力センサの開発

5.1 アタッチメント型反力センサの製作

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¹⁾。

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。図-8に対称

型 Bi-lateral 制御のブロック図を示す。

しかしこの対称型 Bi-lateral 制御では 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。

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、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-9に力逆送型 Bi-lateral 制御のブロック図を示す。

室内模型実験による制御手法の検証によって、これら二種類の制御を組み合わせがバックホウ遠隔操作に有効であることがわかった。陸上実験機においても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は力逆送型 Bi-lateral 制御に移行する制御系を構築する。

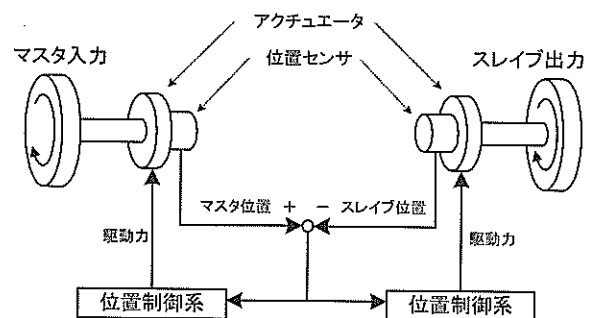


図-8 対称型 Bi-lateral 制御

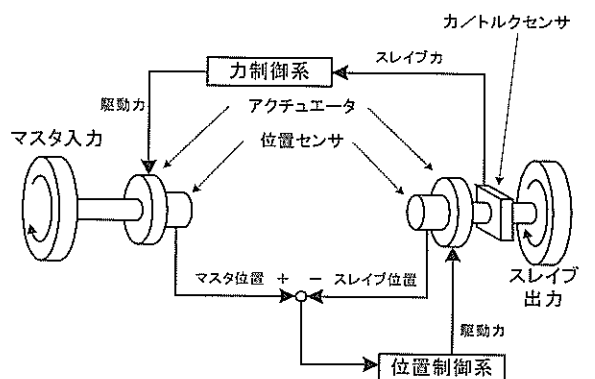


図-9 力逆送型 Bi-lateral 制御

力逆送型 Bi-lateral 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⁵⁾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

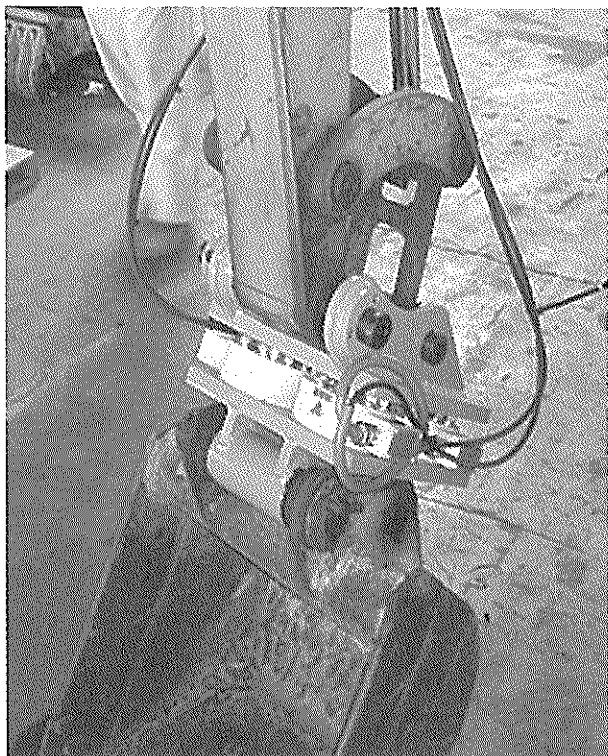


写真-9 アタッチメント型反力センサ

作し取り付けしている。機体本体の改造は最小限にとどめたため、バケット軸にとりつけるアタッチメント方式とした。図-10 にアタッチメント型反力センサの四面図を示す。写真-9 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プ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。

5.2 アタッチメント型反力センサの特性

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-11 にバケット角を示す。写真-10 に実験状況を示す。図-12 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。

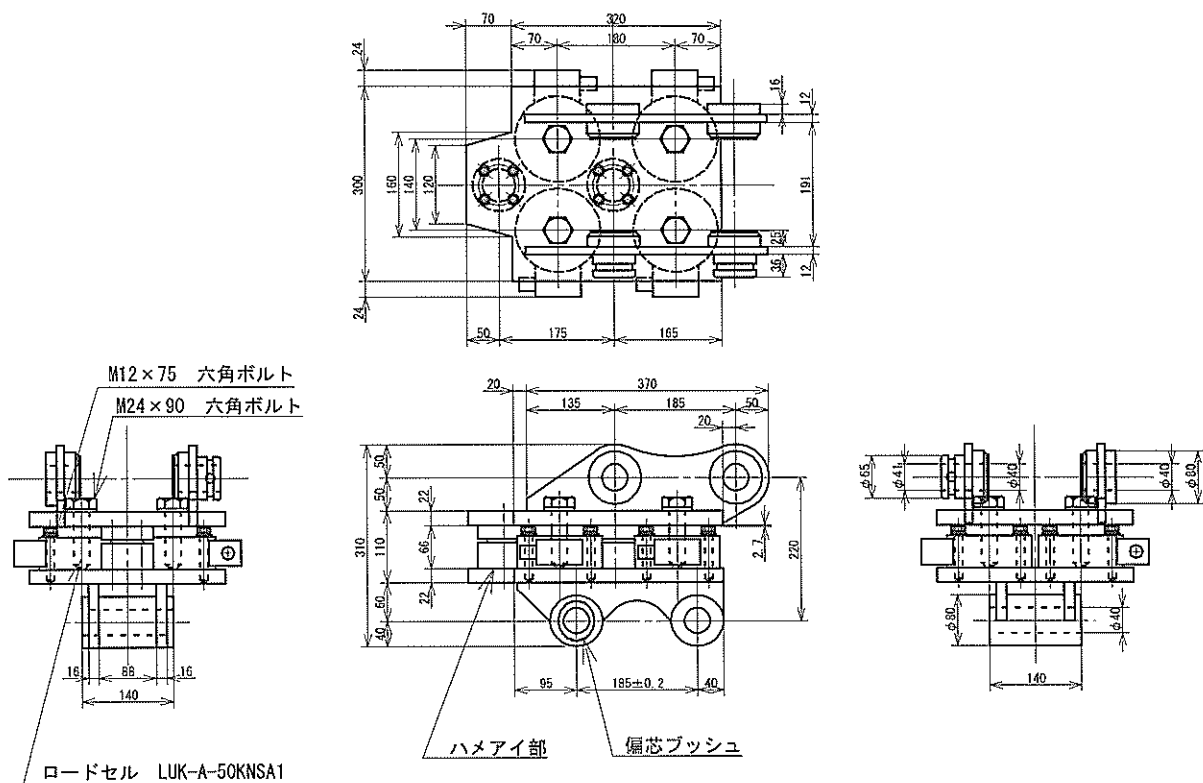


図-10 アタッチメント型反力センサ四面図

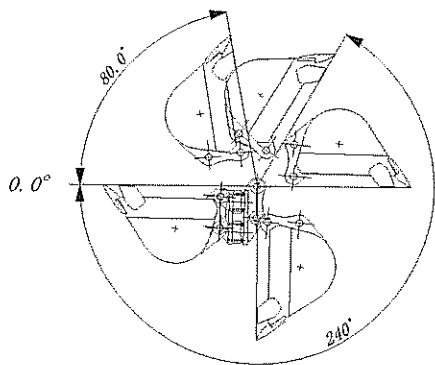


図-11 反力センサ特性試験バケット角度設定図

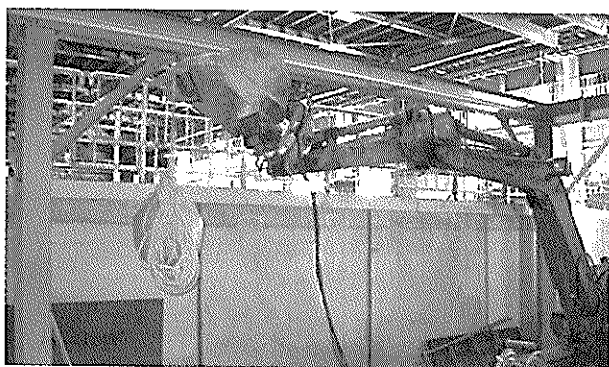


写真-10 反力センサ特性試験(荷重 50kg 姿勢 220°)

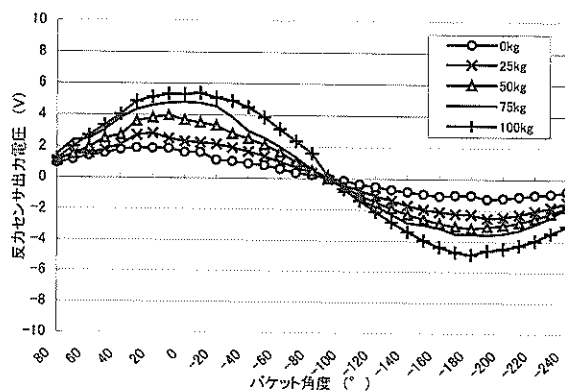


図-12 反力センサ特性

6. 制御プログラムの開発

6.1 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-5にD/A ボードの仕様を示す。

設定として 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。しかし動作試験の結果、実際の動作は設定と異なることを確認した。動作試験による動作電圧範囲を表-6に示す。

バルブ開度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-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-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) ~ 0.5V (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) ~ 0.5V (最大)
バケット電圧 (push)	3.70V (最小) ~ 4.50V (最大)

6.2 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-7に使用したA/Dボードの仕様を示す。

表-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

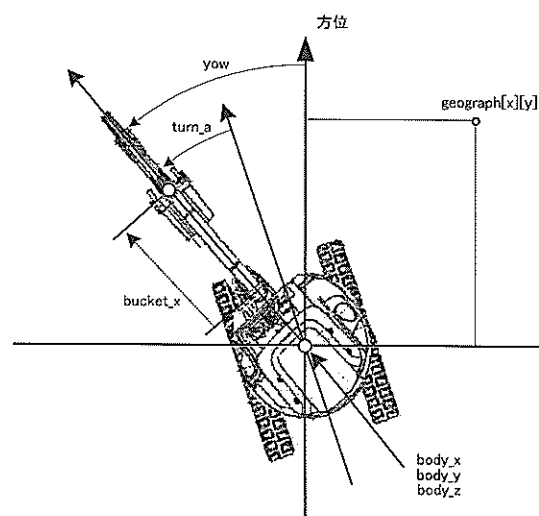


図-13 バックホウ制御変数名

6.3 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にした。

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分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分が小さくなるにつれてバルブ開度も小さくなる。差分が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。

表-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

7. 通信プログラムの開発

7.1 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-13 にバックホウ制御変数名を示す。表-8 に MasterPC から SlavePC へ指令を送る通信変数名を、表-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。

表-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(pitch)	pitch	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(yaw)	yaw	%	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

7.2 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

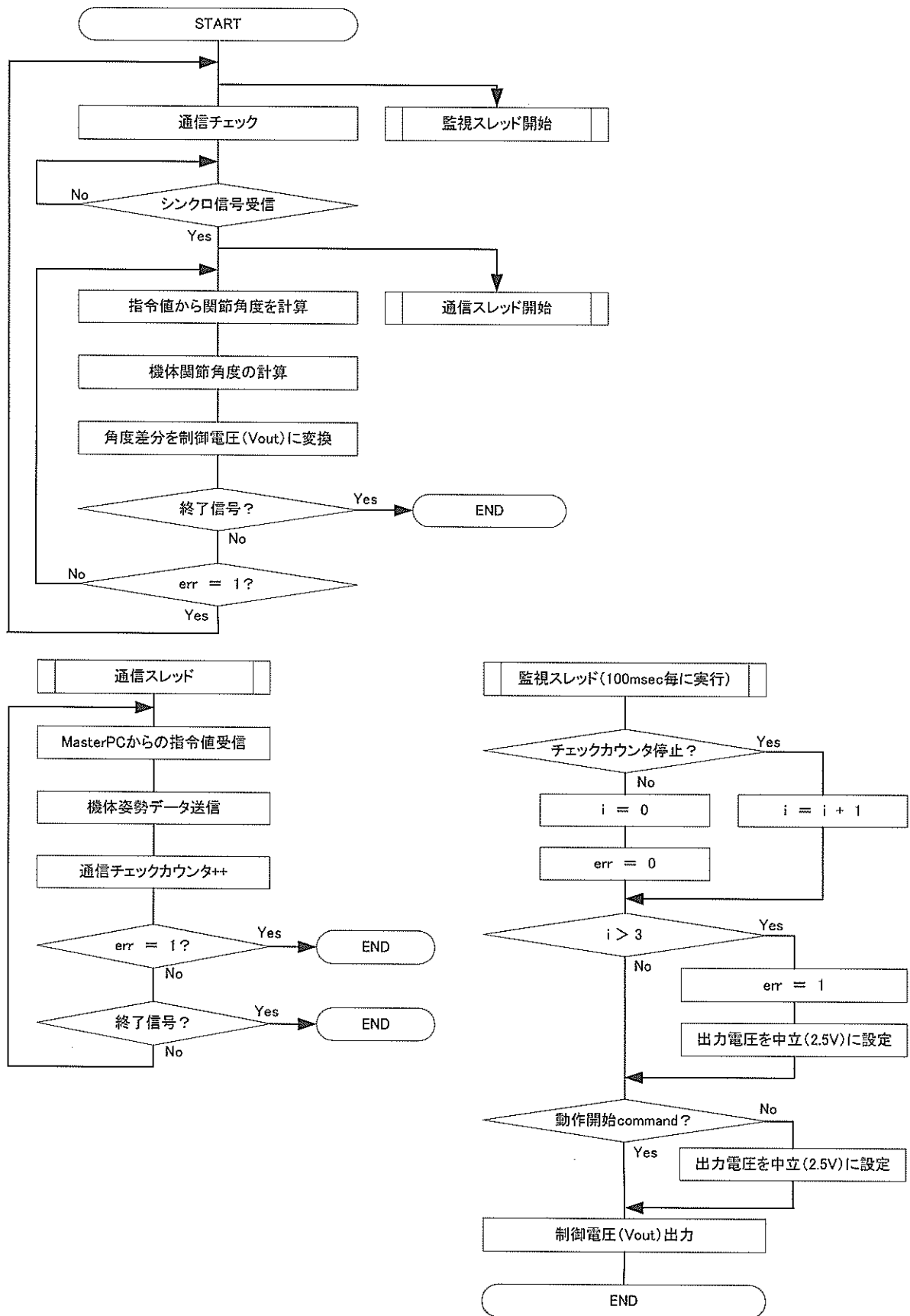


図-14 バックホウ制御フローチャート

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-14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。

7.3 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。

8. 動作確認試験

8.1 試験内容

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。本試験の座標系を図-15に示す。

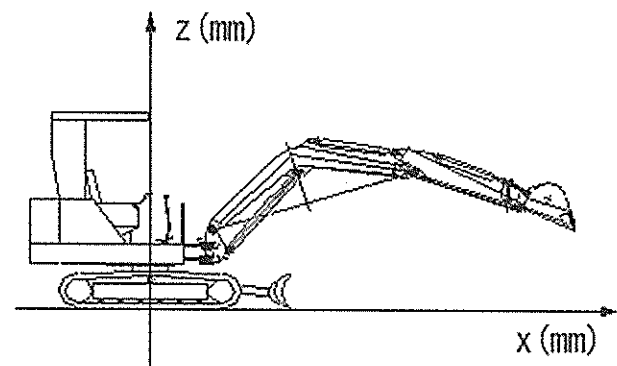


図-15 動作試験時の座標系

8.2 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-16, 17, 18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。なお、図に示す座標値は、第4章に述べた実験機のフロント部に設置した角度センサの測定値に基づきバケットの先端座標を算出したものである。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。

ただ、指示値は直線的な軌跡となるような離散値で与えたにもかかわらず、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。遠隔操作上の問題はないが、実機を操縦する際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。

8.3 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、

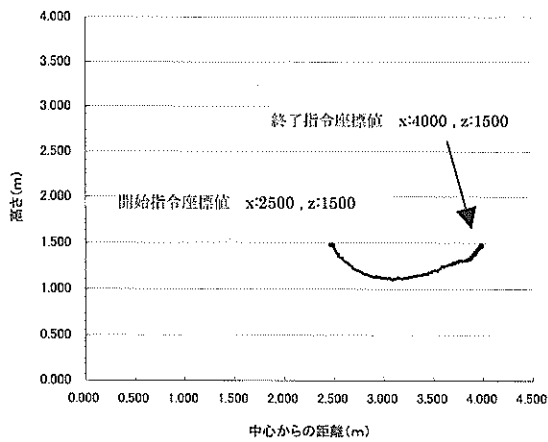


図-16 水平移動軌跡

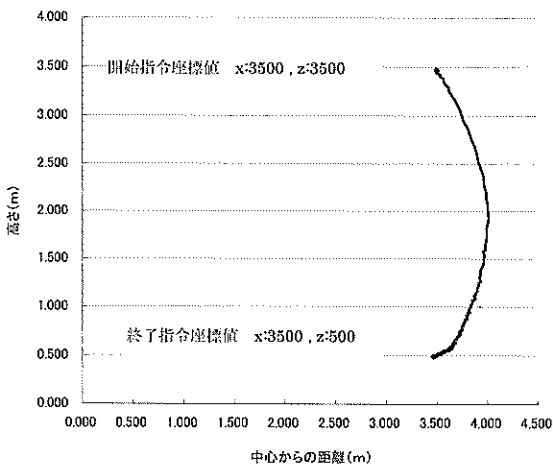


図-17 垂直移動軌跡

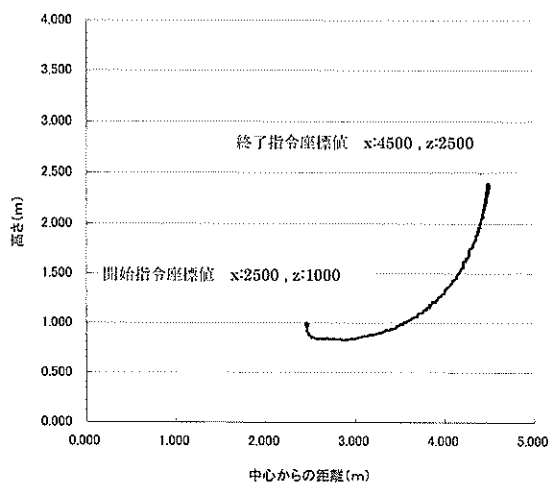


図-18 斜め移動軌跡

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-19 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 $\pm 300mm$ 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、 $x=3m$ 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。

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-20 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。

9. 結論

本研究開発によって、バイラテラル制御技術とオーグメンティドリアリティ技術を組み合わせた新しい発想に基づく制御システムを具体化した遠隔操作型油圧式バックホウ実験機を完成することができた。このために、既存ミニショベルの油圧システムの改造、フロント各部の角度を測定するセンサの設置、バケット先端に作用する対象物からの反力を取得するセンサの開発、実験システム全体の制御系

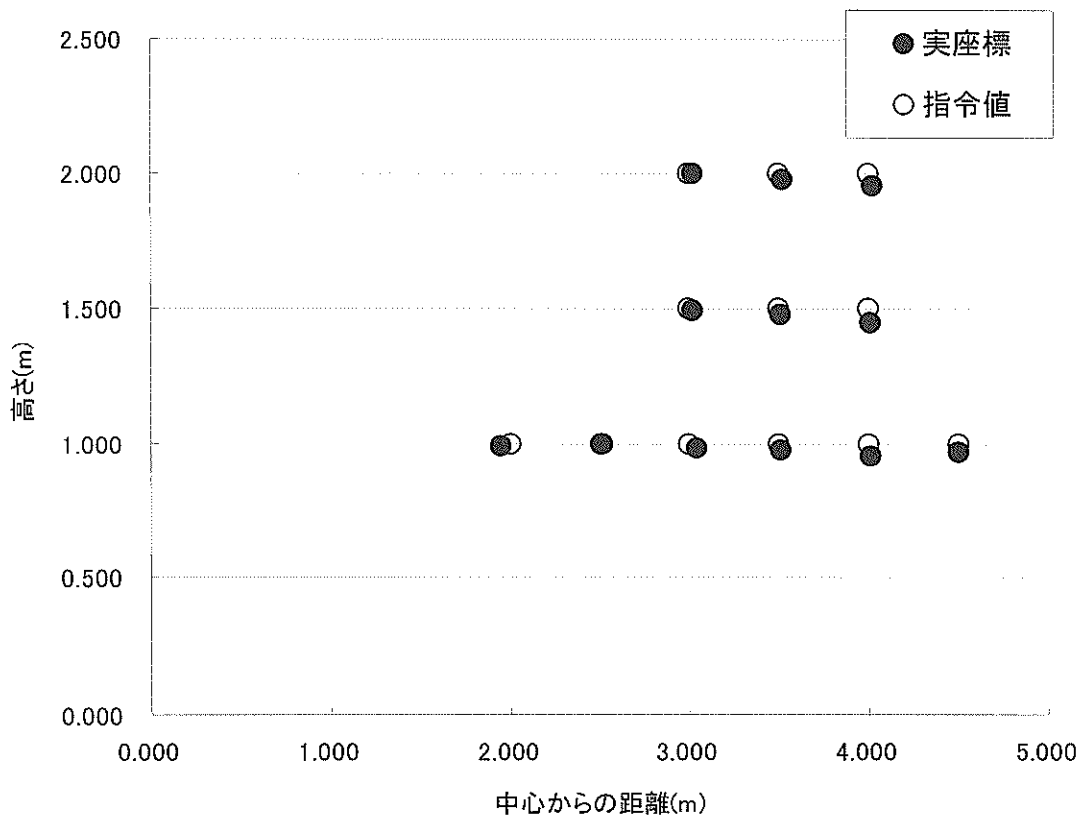


図-19 指示座標への追従精度

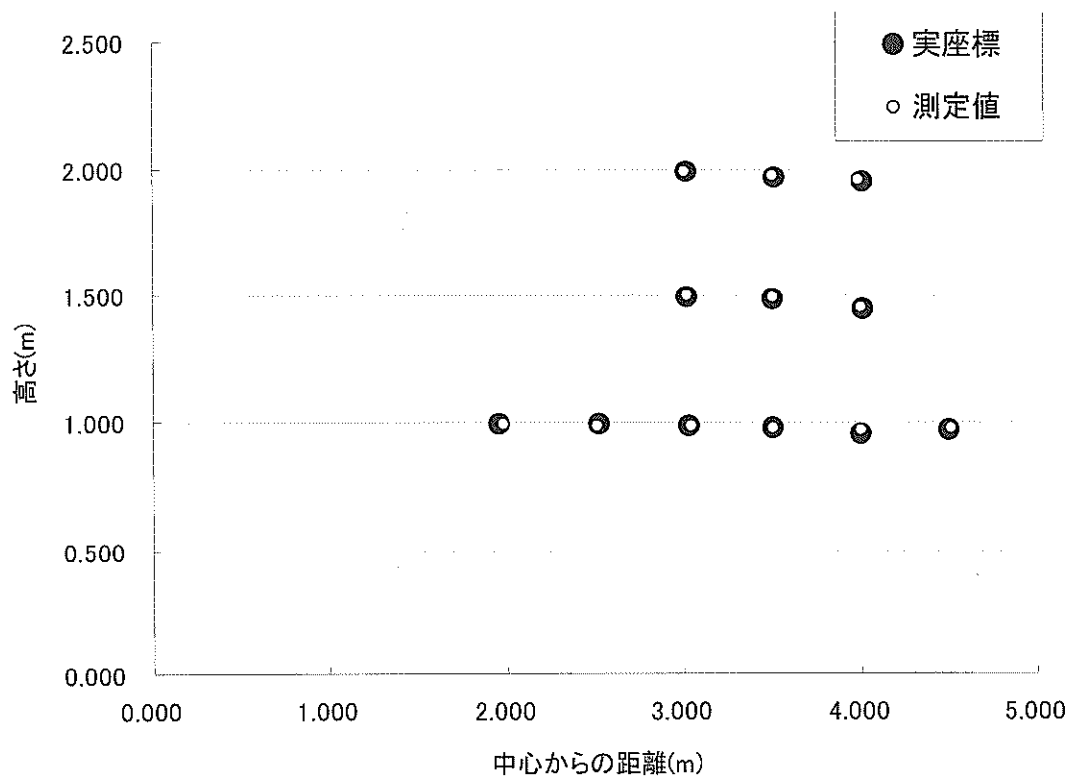


図-20 実座標に対する測定値精度

の基本設計および操縦装置と実験機間の通信プログラムを開発した。また、動作確認試験を実施することによって、開発した実験機は十分な性能を有することを検証することができた。

10. あとがき

今後、本実験機を用いて陸上実験を実施し、本システムの有効性を確認するとともに、遠隔操縦による施工性に関する各種のデータを取得する予定である。本実験機が十分にその機能を発揮することを期待するとともに、この陸上実験を通じて本実験機を改良し完成度を高め、今後の水中実験機さらには実機への適用についてノウハウを高めていきたい。

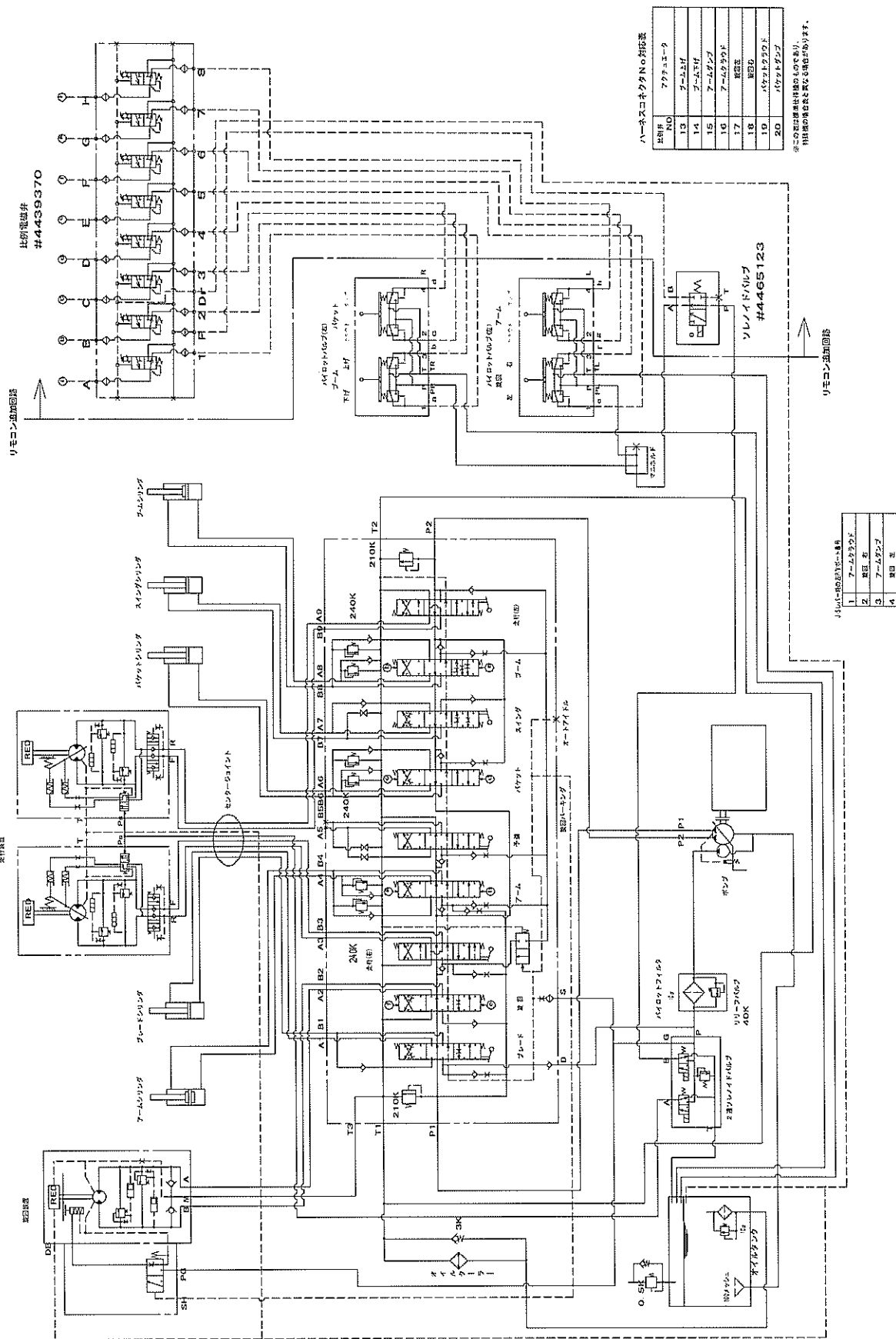
(2003年5月12日受付)

謝辞

本資料の執筆を行うにあたり、施工・制御技術部の方々はもとより、筑波大学機能工学系の矢野博明先生、岩崎正揮氏からも日頃より有益なご助言やご示唆、ご指摘を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 平林文嗣，山本恭，酒井浩，秋園純一，内海真：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，港湾空港技術研究所報告第42巻第3号，2003年
- 3) 川崎晴久：ロボット工学の基礎，森北出版，1991年，pp. 57-59
- 4) 社団法人日本機会学会：機械工学辞典，社団法人日本機械学会，1997年，pp1024-1025.
- 5) 川村貞夫：ロボット制御入門，オーム出版局，1998年，pp. 108-112



付録 陸上実験機油圧回路図

港湾空港技術研究所資料 No.1057

2003.9

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 野崎印刷紙器株式会社

Copyright © (2003) 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。