

バイラテラル操作系を用いた水中バックホウの遠隔操作技術の研究開発

酒井 浩・平林 丈嗣

近年、港湾構造物の大水深化、大規模化が進む中で、港湾工事における効率性や安全性の向上のため、水中作業の自動化が従来にも増して重要で緊急な技術課題となっているが、水中では濁りなどにより視覚情報が十分でないことが大きな阻害要因になっている。このため、当所では、視覚情報を補完する情報として捨石等の対象物からの接触情報をオペレータに伝えるとともに施工状況などを理解しやすい映像情報として提供することによって、水中バックホウの遠隔操作を可能にするための技術について研究開発を行っている。

本報文では、室内実験および陸上実験を通じて現在までに得られた本技術の有効性に関する成果を紹介する。

キーワード：水中バックホウ、遠隔制御、バイラテラル (Bi-lateral) 制御、CG、相似形入力

1. はじめに

近年、港湾構造物の大水深化、大規模化が進む中で、安全にかつ効率的な港湾構造物の建設・維持管理の実施が求められている。

このためには、水中作業の機械化、自動化が必要となるが、水中では陸上と異なり、空気がなく水圧がかかり潮流や波は風に比べて外力として大きいということに加えて、電波が通らないこと、動力源として内燃機関は基本的に持込めないなどといった技術上の難点が多く、その中でも特に視覚情報が十分でないことが大きな阻害要因になって、建設機械類による簡単な機械化も一部の導入にとどまっている。

このため、合理的かつ安全な水中の施工現場の実現を目指して、水中バックホウを対象として相似形入力装置、バイラテラル (Bi-lateral) 制御および触覚情報の視覚化技術などを統合した濁水中における遠隔操作技術について研究開発を行っている。

これは、遠隔操作において視覚情報を補完する情報として、対象物からの反力情報をオペレータに力覚として伝えるとともに、対象物との位置関係などをオペレータに理解しやすい情報として提供し、視覚情報が不十分な水中環境においても施工機械の遠隔操作を可能にするマン・マシン・インタフェース技術とも言えるものである。

2. 遠隔操作化のための要素技術

(1) 相似形入力装置

バックホウのフロント部はブーム、アーム、バケットの三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それぞれの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、操縦している。しかし遠隔操作を行う場合、このような装置では視覚情報が不十分になった時、操作効率が大幅に悪化するため、現状の2本レバー形状を見直し、バックホウのブーム、アーム、バケットと相似形の操作装置を開発することとした。これは、バックホウのフロント部と同じ形をした操作装置を用いて、これを動かしたい姿勢にしてやれば、関節ごとに指令値を入力しなくても簡単に操縦できるばかりでなく、操作装置の形が実機のフロント部の姿勢を表すことになり、視覚情報の不足を補うことができるものである。

(2) Bi-lateral 制御

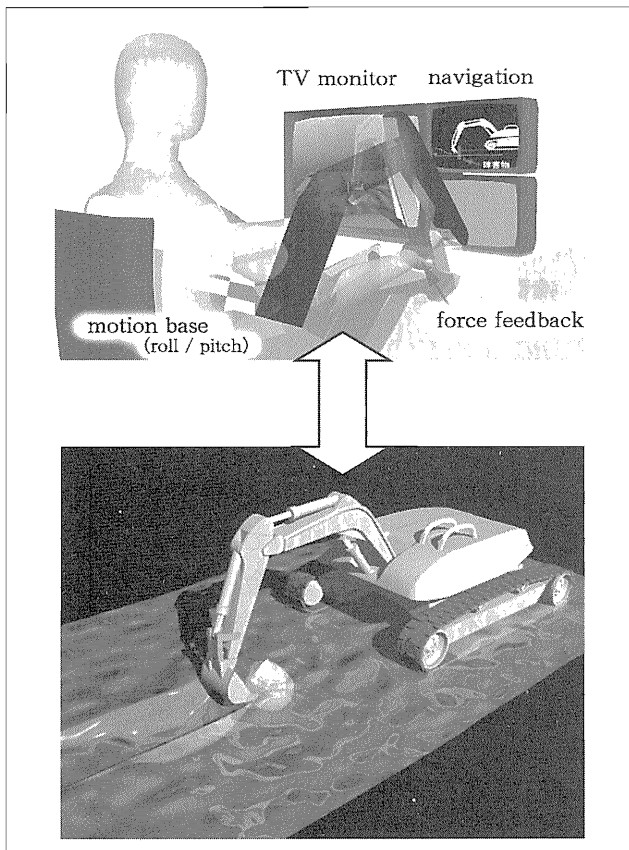
視覚情報が得られない状況で遠隔操作を行う場合に、バケットが対象物に接触したときの対象物からの反力情報をオペレータへ提示することは、作業状況を理解するため、非常に有用であると考えられる。このため、本研究では視覚情報を補完する第二の手段として Bi-lateral 制御技術によるオペレータへの力覚のフィードバックが可能なシステムを開発することにした。

(3) 触覚情報の視覚化

視覚情報を補完する第三の手段として、対象物の触覚情報を視覚化する技術を開発した。

一般に、触覚により構築される像のことを触像と呼ぶが、本研究では触像をコンピュータグラフィックス(CG)により視覚化し地形情報として表示し、さらにコンピュータ画面内にセンサからの姿勢情報によりバックホウを描画することによって、バックホウと対象物の位置関係をオペレータに示し、安全で確実な作業が可能のようにサポートするものである。

図一1にこれらの要素技術を組合わせたシステム図を示す。



図一1 遠隔操作システム図

3. 室内模型実験によるシステムの検証

(1) 室内模型実験装置

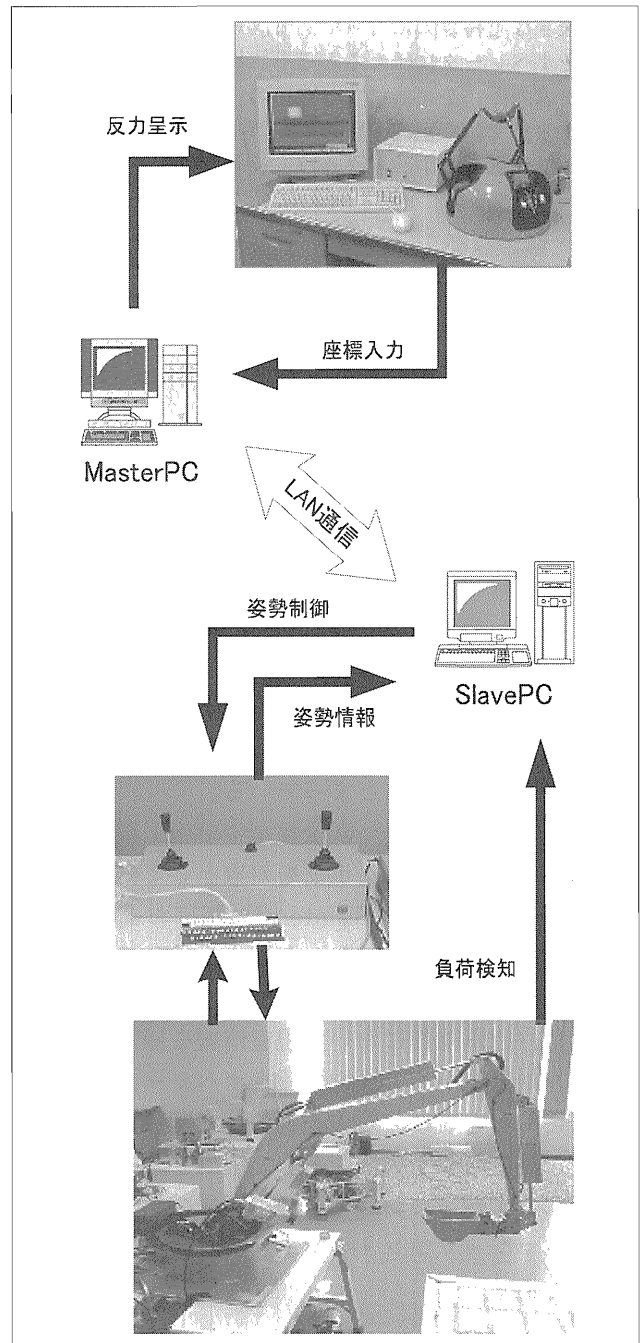
本研究で提案している遠隔操作技術の有用性を検証するため、基本的な制御システムに基づいた電動式の模型装置を開発し、これを用いて室内実験を行った。

実験模型はバックホウのフロント部を模した動作部と、3次元の座標入力可能な入力装置によって構成されている。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の入力も可能なものである。さらに、対象物からの反力を出力すること

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、バケット座標およびバケット角度の入力が一つのレバーで入力できることから、模型実験においてはこの入力装置を用いることとした。なお、個々の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なっている。

実験装置は図一2に示すように、マスタースレイブ方式により入力したバックホウのアームの姿勢やバケットの位置情報に対し、反力と位置情報をフィードバックするBi-lateral制御系を構築するものである。



図一2 室内模型実験装置

(2) 反力センサの検討

触覚情報を取得するための反力センサとしては、高負荷に耐えられるロードセルを利用した反力センサ機構を考案した。本模型実験装置ではバケットが受ける力のうち、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のみを引張り圧縮型圧力センサにより計測するアタッチメントを取付け、その機構を検討した。

(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、触覚情報を視覚化するプログラムを開発した。バックホウ前面にある未知の形状の対象物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CG上でポイントとして描画する。さらに、対象物とバックホウ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を描画したものをこの画像に加えた。このCG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である。図-3に反力情報を視覚化した映像を示す。

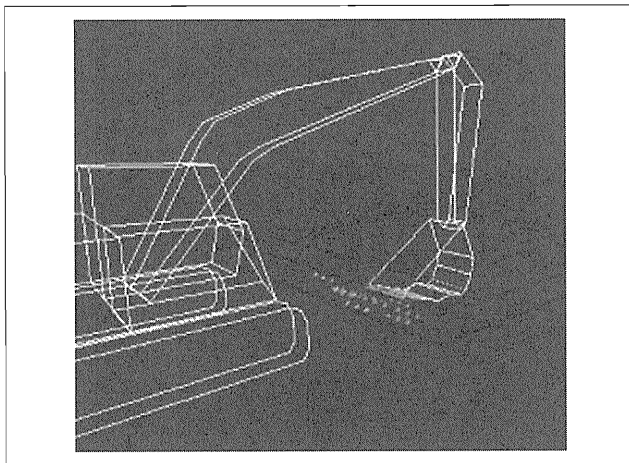


図-3 反力情報の視覚化

画像上で接触点は赤色で点描される（図中では白い点）。さらに、対象物との接触を繰り返すことにより、この接触点情報が重ね合わせられることで、オペレータは対象物の形状や位置を確認し、視覚情報が不十分な環境においても作業が可能となる。

(4) 室内模型実験

この実験装置を用いて模擬物体を対象にした操作実験を行い、Bi-lateral制御の有効性を確認した。また、反力情報および視覚の補完情報システムも有効であることを確認した。

また、実験の結果から、適切な反力センサ方式を選

定するとともにマスタースレーブ制御におけるフィードバック内容と方式の決定およびバケット制御における操作入力方法を選定した。

さらに、制御対象を設定するとともに、負荷状態に応じたBi-lateral制御手法を選定することによって、本研究における遠隔操作システムに関する考え方を現実の機器において具体化することができた。

4. 陸上実験によるシステムの検証

(1) 陸上実験用小型バックホウ

実際の施工における石材を対象物とした場合の性能や、動力として油圧を用いた場合における本遠隔操作システムの適応性について検討するために、より実機に近い油圧式の実験機を開発し、陸上実験を実施した。

バケット容量0.09 m³クラスの既存のミニショベルをベースマシンとし、これを改造してカスタマイズすることによって陸上実験機を開発した。陸上実験機の仕様を表-1に示す。また、図-4に外観を示す。

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オメータの設置、比例電磁バルブの設置、ロードセルを用いた反力センサの設置である。また、実験上の安全性を高めるため、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。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

表-1 陸上実験機の仕様

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"> ・角度取得ポテンシオメータ取付 ・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) ・反力センサ

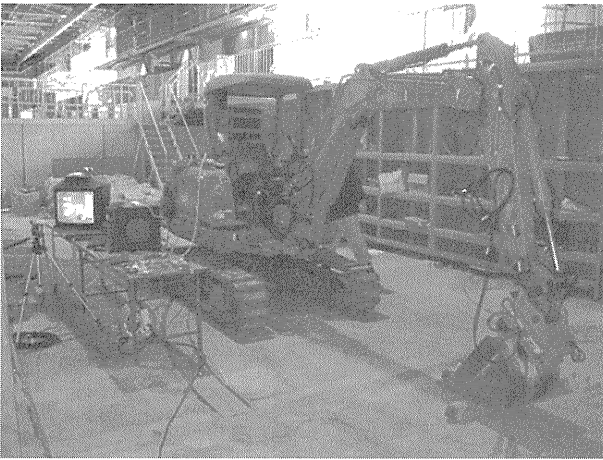


図-4 陸上実験機

あるスイッチで切替えるものとした。

陸上実験機の遠隔制御システムは室内模型実験装置によって検証された制御法に基づいている。制御対象も室内実験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。

(2) 相似形入力装置

Bi-lateral 制御を行うために開発したバックホウ用相似形入力装置を図-5に示す。これは今回実験に用いる陸上実験機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およ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、室内実験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ものである。

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

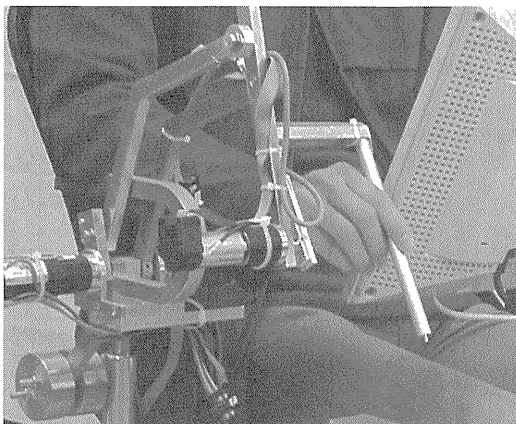


図-5 相似形入力装置

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付けられている。

(3) 触覚情報の視覚化アルゴリズム

バケットの対象物への接触情報に基づき、地形情報を生成、描画するアルゴリズムを開発した。触像を描画している様子を図-6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。なお、操作装置と実験機姿勢の間には接触抵抗によって作動遅れが発生しているため、画面上では両者にずれが生じている。さらに目標高さをあらかじめ入力しており、画面では緑の線(図中では水平の線)で表されている。また赤い線(図中では山形の線)は触覚情報によって生成された地形情報を表している。

バケット先端が地面と接触したことが力センサで検出されると、画面上のバケット部分が赤く表示され、地形生成アルゴリズムに基づいて地形情報を描画する。

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10 cm 間隔で50個のメッシュで対象平面を区切り、接触した点に該当するポイントに高さ方向のデータを入力することとした。

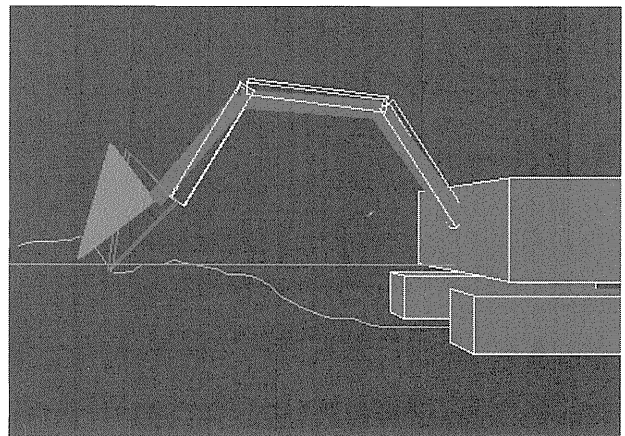


図-6 触像の生成過程

(4) 陸上実験

開発した実験機を用いて、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。本実験では、直線均し作業を検証対象とした。10 cm 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した。

地形形状計測にはトータルステーションを用いた。対象物としては粒径150 mmの割栗石を用いた。実験状況を図-7に示す。



図-7 実験状況

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CGによるバックホウ姿勢と視覚化された触覚情報、相似形入力装置にフィードバックされる力覚のみである。その様子を図-8に示す。



図-8 操作状況

効率的な作業を行うために、オペレータは最初に触覚による石山の形状認識を行った後、均し作業を開始する。CGには完成高さにラインが表示してあり、オペレータはこのラインを目標にして均し作業を行う。この均し作業時には触覚データはバックホウの動作にリンクして適宜更新されていく。均し作業後のモニタ画像の地形データはファイルとして出力、保存できるようになっている。すなわち、本システムは施工ナビゲーションとしての機能を備え、デジタル施工データによるCALSへの組込みを想定したものである。

実験の結果、開発した油圧式の陸上実験機は遠隔操作により円滑に稼働した。また相似形入力装置と触覚情報の視覚化によるCGを活用したオペレータの作業はスムーズであり、難視界での均し作業における本システムの有効性が確認された。また、所定の精度で均

し作業が可能であることも検証された。

5. おわりに

水中バックホウの遠隔操作技術として、相似形入力装置、Bi-Lateral制御および触覚情報の視覚化技術を用いた新たなシステムを提案し、室内模型実験と陸上実験を行った結果、実施工への適用可能性を確認することができた。

今後、実用化に向けて、本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。

本システムの基本的な考え方は、人間と機械の持つそれぞれの能力を生かすことによって最大の効果を得ようとするものである。したがって、制御される機械系とオペレートする人間系の親和度、すなわち、マン・マシン・インタフェースとしての完成度を高めていくことが重要であると言える。

本技術の活用によって、幅広い範囲にわたる水中作業の遠隔操作化が推進され、港湾工事における危険、苦渋作業が解消され、施工の安全性の向上、品質の向上、効率化が図られ、工期短縮ひいてはコスト縮減の実現が期待される。

JICMA

《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, pp. 29-36, 2000年
- 2) 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 Ocean 2000, pp. 411-414, 2000年
- 3) 平林丈嗣, 酒井 浩, 秋園純一, 内海 真, 山本 恭: 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, Vol. 42, No. 2, 2003.9
- 4) 平林丈嗣, 酒井 浩, 秋園純一, 内海 真, 山本 恭: 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, 2003.9

〔筆者紹介〕



酒井 浩 (さかい ひろし)
独立行政法人港湾空港技術研究所
施工・制御技術部
制御技術研究室
室長



平林 丈嗣 (ひらばやし たけつぐ)
独立行政法人港湾空港技術研究所
施工・制御技術部
制御技術研究室
研究官