

触覚情報を用いた水中バックホウ 遠隔操作システムの開発

平 林 丈 嗣・白 石 哲 也・加 藤 英 夫

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、維持、補修は水中での作業となり、現在は相当程度を潜水士等の人力に依存している。このような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ている。

水中では作業中に発生する濁りなどにより対象物の視認が困難であり、作業の無人化は容易でない。そこで建設機械の受ける負荷を接触情報として利用し、「手応え」と接触点座標の「CG表示」により、光学映像に頼らない遠隔操作システムを提案した。本報文では、開発したバイラテラル制御を用いた遠隔操作型の水中バックホウの紹介と長崎港において実施された実海域実験について述べる。

キーワード：油圧ショベル、水中バックホウ、触覚情報、水中遠隔操作、バイラテラル制御、捨石マウンド、均し作業

1. はじめに

港湾施設はその大部分が水面下に構築されるため、その整備や点検、診断、維持、補修、あるいは災害復旧も含めて、その多くは水中での作業となり、また、現在は相当程度を潜水士等の人力に依存している。このような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ており、こうした観点から、港湾施設の整備や点検・診断、維持、補修、場合によっては災害復旧にも活用できる水中作業の無人化の研究開発を進めている。

ところで、陸上では既に施設の建設や点検の無人化が相当に進んでいるが、これは作業の遠隔化や無人ロボット化に有用な電波や光学映像が使用できることが大きな要因として挙げられる。これに対して、水中では電波が到達しないためGPSによる測位ができず、また、海中の濁りや浮遊物質による光の散乱により対象物の視認が困難であるなどの特殊な作業環境下にあるため、作業の無人化は容易でない。

本報文では、このような困難性を克服すべく開発したBILATERAL制御を用いた遠隔操作型の水中バックホウの紹介と長崎港において実施された実海域実験について述べる。

2. 遠隔操作システム

(1) 相似形入力操作

作業機械の操作方法を大別すれば、

- ・ジョイスティックと呼ばれるレバーを動かして作業機械を操作する方法、
- ・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)を操作する方法、

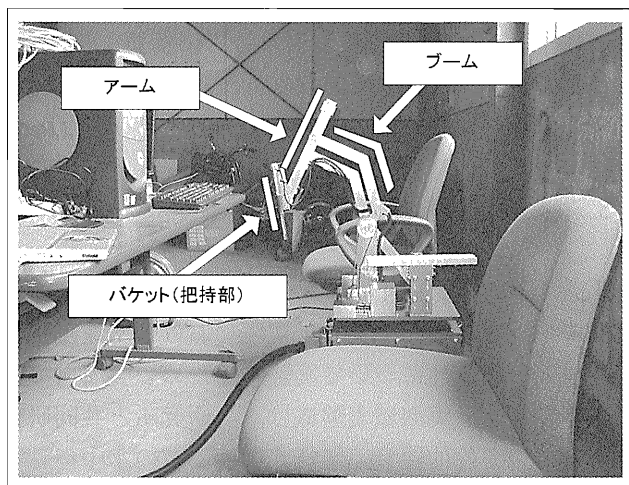
とがある。

ジョイスティック方式の特徴は、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。つまり、1つのレバーを大きく動かせば1つのアクチュエータの出力を大きくする、という具合である。この方式の具体的な例が通常のバックホウであり、これは何本ものレバーにより、複数の関節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、オペレータの手首から先の動きとバケットの

動きとを連動させ、直感的で平易な遠隔操作を実現する。このため、操作インタフェイスのうち、バケットに相当する部分を把持するものとした。ただし、バケットの可動範囲は約 300 度と広く、バケットそのままの形状では操作中に持ち替える必要があるため、本インタフェイスでは把持部を棒状とし、ペンを持つように操作することで、オペレータの意思どおりの入力と入力範囲の確保を行うこととした（写真—1）。



写真—1 相似形入力装置

また、インタフェイスの相似スケールは水中実機の 20 分の 1 とした。これは、手元の可動範囲を 400 mm 程度に収めること、実機制御に求められる精度（50 mm 程度と想定）に対応して、手元での操作精度 2.5 mm 程度（実機の操作精度の 20 分の 1）を確保することを考慮したものである。

遠隔操作では一般に Slave にかかる負荷をフィードバックすることで、遠隔操縦の操作性が向上する。そこで本研究で構築する相似形インタフェイスには反力提示機構を組入れることとする。なお、実機では割石を対象とした均し作業が主であるため、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 1 kgf 程度であればよく、本システムでも任意の方向に 1 kgf 以上出力できることを条件とする。

(2) バイラテラル制御

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

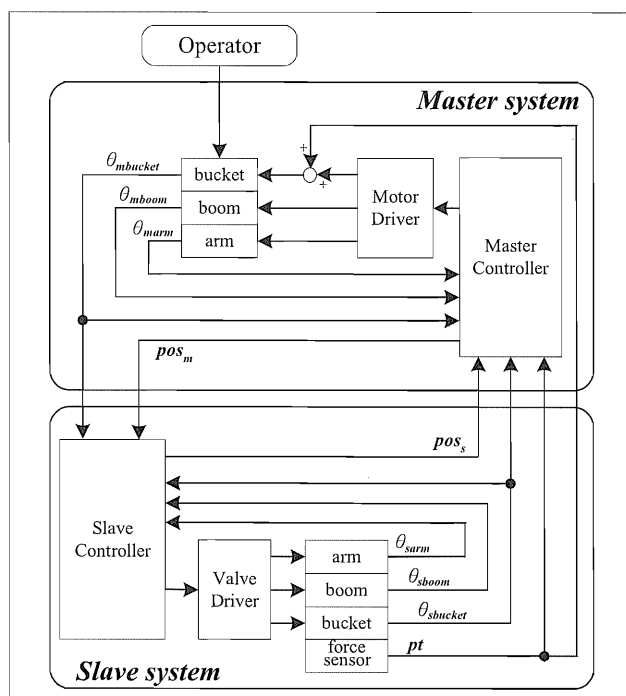
Master へ伝達する制御系を同時並行して制御する方式をいう。

バイラテラル制御には複数の制御手法があるが、油圧ショベルを対象とした場合、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、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用する場合、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効果的であった。

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¹⁾と呼ばれている。図—1 に制御ブロック図を示す。

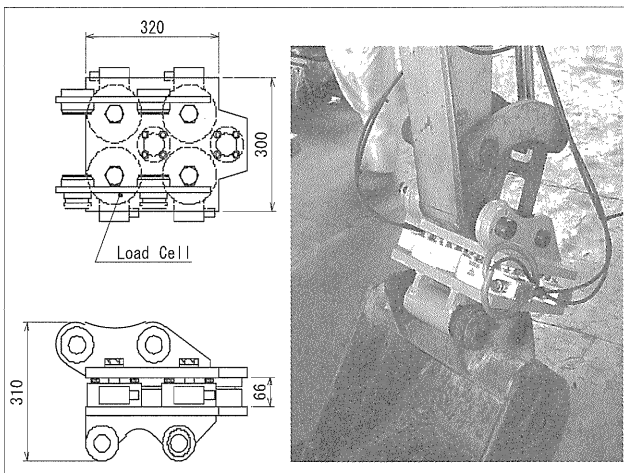


図—1 制御ブロック図

(3) 接触センサ

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製作して取付けている。また機体本体の改造を少なくするため、バケット軸に取付けるアタッチメント方式とした。

前述の室内模型での実験をふまえ、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のピンを設置している。写真—2にアタッチメント型反力センサを示す。



写真—2 アタッチメント式接触センサ

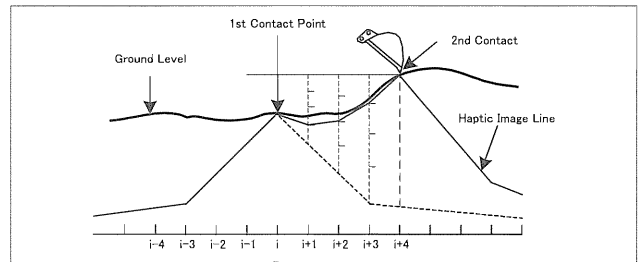
(4) Haptic Image

認識力を高める一つの技法として、前述のバイラテラル制御による力のフィードバックがある。欠落した視覚を補完するため、作業機械の受ける反力情報を手応えとしてオペレータにフィードバックすることで、作業中の状況を把握させている。

さらに、反力情報を力だけではなく映像化することも有効である。バックホウの場合、各関節の角度を取得することで自機とバケット先端の相対座標を算出することが可能である。この相対座標をモニタし、反力を受けた地点だけをPC上のモニタにプロットすることで、オペレータはバケットが接触した場所のマウンド高さを認識することができる。

このプロット画像は接触があった場合にリアルタイムに更新されるため、作業によりどのように地形が変化したのかを視覚情報として把握することが可能となる。さらに、そのプロット点をすべて記録することにより、過去に作業を行った範囲について広範囲に画像を表示することができる。

この画像は作業中必要に応じて様々な角度から地形を見ることができ、作業範囲の高低差なども認識する

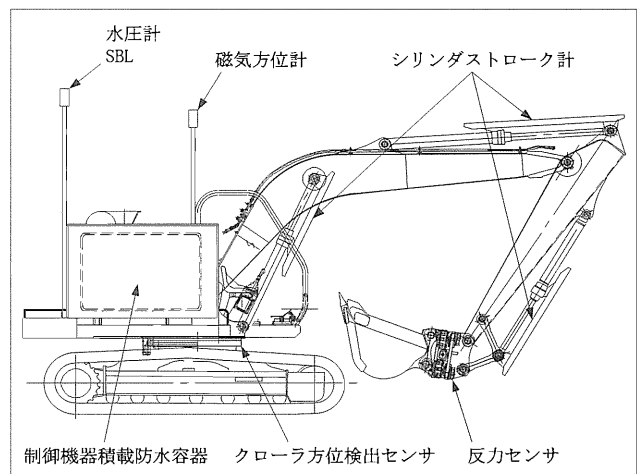


図—2 接触情報による地形認識

ことが可能となる（図—2）。この反力プロット画像のように情報を人間の認識しやすい形に変換し提示²⁾することでオペレータに感覚的な状況把握をさせ、作業効率の向上をはかる。

3. 実海域実験機の開発

平成16年度に荒均し作業を接触情報を用いた遠隔操作で行うこととし、実施工現場における本遠隔操作システムの有効性について実証するための実海域実験機を製作した。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式会社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—3に示す。



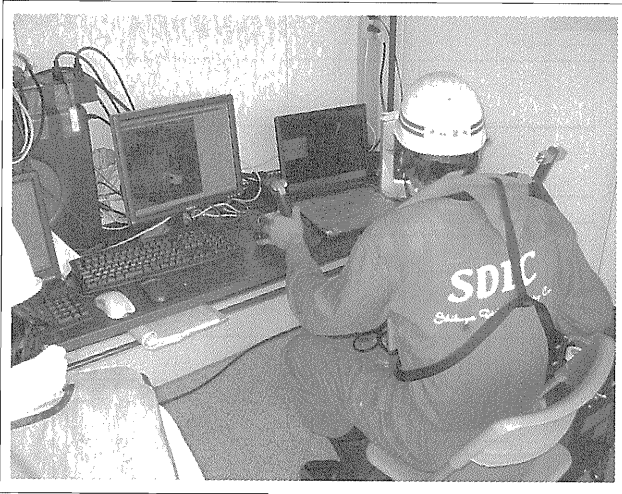
図—3 実海域実験機

今回の改造では油圧動力実験機と同等のセンサを取付け、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（図—4）。

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

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。写真—4に遠隔操作の様子を示す。

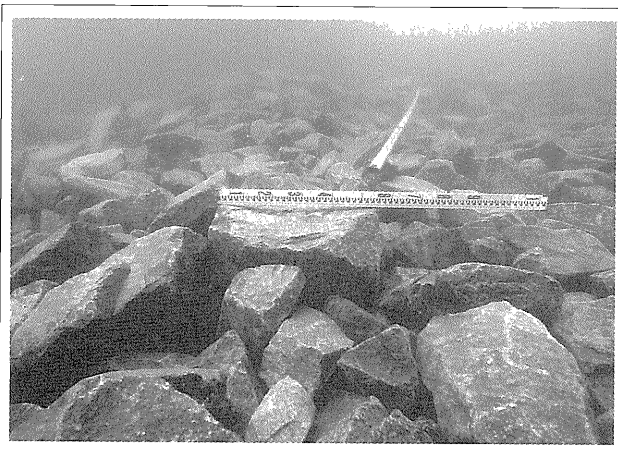


写真—4 遠隔操作状況

5. まとめ

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 には達しなかった。作業後に撮影したマウンドの状況を写真—5に示す。

作業前の状況では約 80 cm 程度の不陸が存在して



写真—5 作業後のマウンド状況

いたが、作業後にはスタッフからわかるようにほぼ平面に均すことができています。

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—6、及び図—7に示す。

		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—6 測量結果（潜水士搭乗による）

		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—7 測量結果（バイラテラル遠隔操作による）

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 1 m 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 $+27 \text{ cm}$ であり、その標準偏差は $\pm 8.1 \text{ cm}$ 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 $\pm 8.1 \text{ cm}$ であり、全体的に高めではあるが平坦に均している。

潜水士搭乗操作では丁張りを見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+17 cm であり、その標準偏差は±8.1 cm であった。また施工管理基準±30 cm 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+10 cm～+20 cm 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±30 cm のラインも表示しており、掘削作業中に+30 cm 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。

6. おわりに

1960年代の高度成長期に整備された数多くの施設が耐用年数に近づいている。そこでこれらを健全な状

態に管理し、有効に活用するうえで、点検、診断及び維持、管理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務である。こうした観点に立ち、今後ともより実用性の高い水中作業の無人化の研究を進めていく考えである。

本実海域実験においては、長崎港湾・空港整備事務所をはじめ関係各所に多大な協力を頂いた。関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。 JICMA

《参考文献》

- 1) 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
- 2) 秋園純一, 平林文嗣, 山本恭, 酒井浩, 矢野博明, 岩崎正揮: Teleoperation of Construction Machines with Haptic Information for Underwater Applications", International Association for Automation and Robotics in Construction, 2004年, pp. 340-345

【筆者紹介】



平林 文嗣 (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



白石 哲也 (しらいし てつや)
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



加藤 英夫 (かとう ひでお)
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
施工・制御技術部
新技術研究官