

38. 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

(独) 港湾空港技術研究所 施工・制御技術部 ○平林 丈嗣
白石 哲也
加藤 英夫

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る。当研究所では、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¹⁾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。

本稿では、このような困難性を克服すべく開発した BILATERAL 操作による遠隔操作型的水中バックホウの事例を紹介する。

2. 水中に特化した遠隔操作インタフェイス

人間は、例えば周りの状況を手探り（触覚）で確認し脳でそのイメージ（触像）を構成することによって、視覚情報がなくても行動することができる。このことを水中バックホウを遠隔操作するような場合に当てはめると、人間の持つ優れた認識能力を前提に、乏しいながらも複数の情報を理解しやすい形に加工して呈示することによって水中で行われている作業状況をリアルタイムに認識する途が拓かれる。これは強調現実感 (Augmented Reality) と呼ばれる方法である。この方法を応用し、触像(Haptic Image)の視覚化などの研究を進めている。

その一つは、水中作業機械のマニピュレータが対象

物と接触したことを検出した際、その座標位置を求め、コンピュータグラフィックスによって視覚化して遠隔操作に必要な情報を呈示するというものである。具体的には、対象物との接触を作業アームの先端部に触覚センサや力センサを取り付けて検出し、この接触位置を作業アームの各可動部の角度やシリンダのストロークから計算する。さらに、その作業機械自体の位置座標を水中座標位置計測システムで計測することにより接触点の三次元座標位置を求める。この方法を繰り返せば、対象物の形状等が次第に明確になり、より現実に近い画像を3次元座標上に描くことができる。

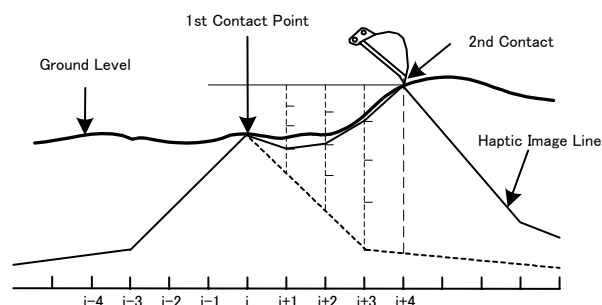


Fig.1 接触情報のCG化

さて、バックホウを有人で操作することを想起すれば、オペレータは、バケットの接触音、車体に伝わる振動、油圧安全弁の音の変化など様々な感覚を通して、バケットが対象物に接触したか、どの程度の負荷がかかったかを認識しながら操縦をしている。このことに着目し、さらに触像以外にも遠隔操作に必要な情報を呈示する方法の研究も行っている。それは、Slave（操作される作業機械側）が力センサで検出した情報を Master（遠隔操作するオペレータ側）にも力の感覚（手応え）として呈示する Bilateral 制御の技術についても同時に研究を進めている。

過年度において水中独自の条件に特化したインタ

フェイスを研究しており，TVカメラを用いない無視覚条件下でも所定の精度で荒均し作業が可能であることを陸上実験²⁾により確認している．(Fig.2, Fig.3)



Fig.2 相似形入力装置による遠隔操作



Fig.3 無視覚条件下における平面均し作業結果

3. 遠隔操作型水中バックホウの開発

3. 1 実海域実験機の開発

陸上実験によりバックホウ遠隔操作に Augmented Reality を用いる要素技術は確立した．しかし，陸上実験機のエンジン出力の問題から実際のマウンド築造に用いられる割石より小さい 150mm 粒径を実験で用いており，実スケールでの均し実験を行う必要がある．そこで平成 16 年度に実海域における均し作業の実験を行うこととし，その実験機を製作した．

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）所有の水中バックホウ³⁾ 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．

今回の改造では制御 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 のリブ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．機体方位，傾斜角度の検出には磁気方位センサ，およびジャイロを用いており，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 $\pm 200\text{kN}$ 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，皿バネを介し力を感じ取る機構に変更している．設置したセンサに関する情報を Fig.4 に，反力センサを Fig.5 に示す．

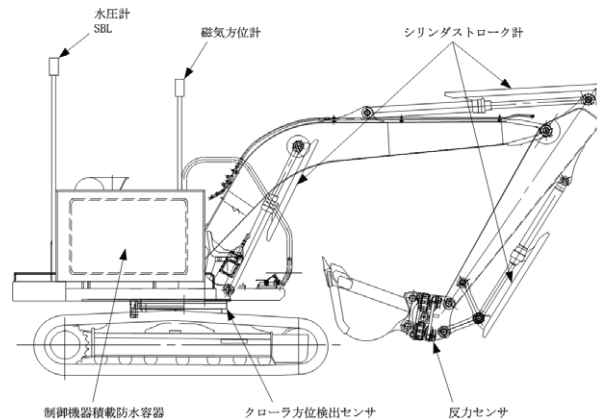


Fig.4 水中バックホウ BC-3



Fig.5 反力センサ



Fig.7 相似形入力装置

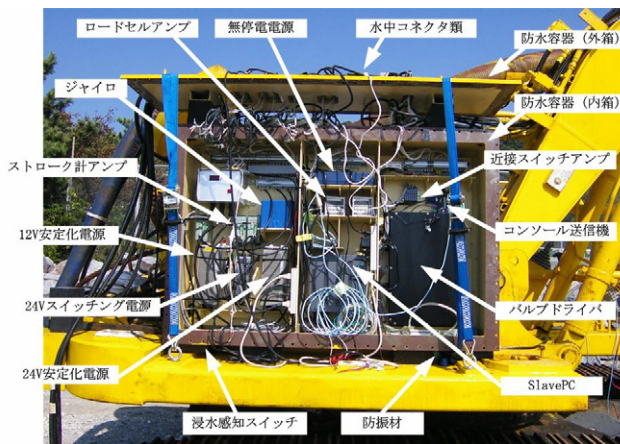


Fig.6 密閉容器内の搭載機器

3. 2 相似形入力装置の開発

Bilateral 制御を行うためのバックホウ用相似形入力装置を Fig.7 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と関節角度を認識するロータリエンコーダを有しており、これらの制御およびデータ取得は遠隔制御コンピュータにより行われている。この遠隔制御コンピュータにより関節角度から先端座標を演算し指令値としてバックホウ搭載 PC に送信する。また、バックホウ搭載 PC 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。

バイラテラル制御の方式は、油圧シリンダの特性を考慮して、可変ゲイン位置対称型バイラテラル制御⁴⁾とした。

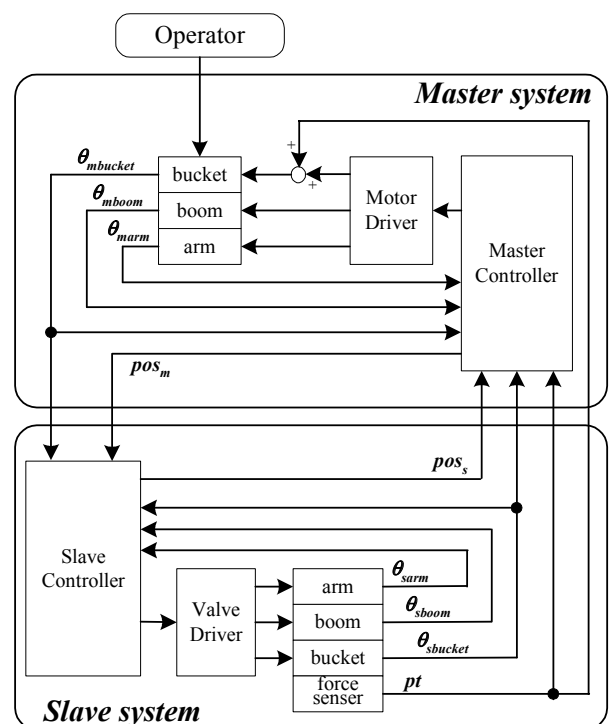


Fig.8 可変ゲイン位置対称型バイラテラル制御

3. 3 地形データベース

実海域での実験を想定し、広範囲での地形を蓄積するデータベースを構築した。このデータベースには 10cm 間隔で 50m×100m の計 50 万点の地形高さ情報を格納可能となっており、さらに丁張りの代わりとなる同数の目標高さデータも同時に格納している。また作業台船やケーソンなど周辺施設の位置も表示され、バックホウの位置、方位、姿勢などもリアルタイムに描画される。このデータベースも LAN に接続されており、通常は遠隔制御 PC から送信されてきたバケット接触高さのデータを格納するが、移動時など要求さ

れたタイミングには必要な範囲を切り出し遠隔制御コンピュータに地形データを送信する。また、超音波映像による地形データを読み込む機能やSBLによるバックホウ位置測位データをRS232Cポートから受信する機能、作業終了後の地形データをテキストファイルにより出力する機能を有する。

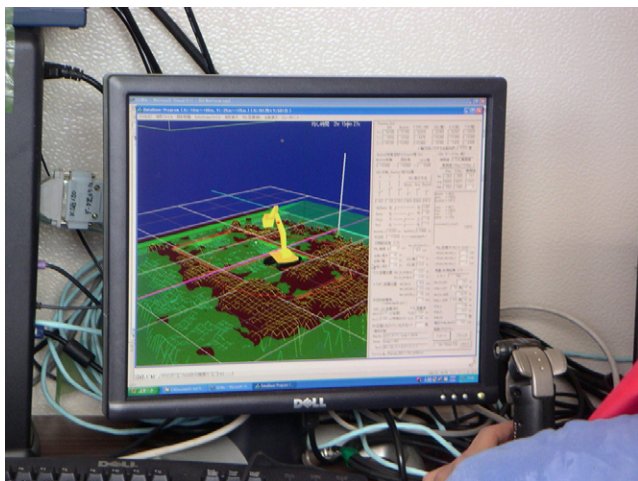


Fig.9 地形データベース画面

4. 実海域実験

4. 1 実海域実験海域

実験は平成16年10月4日～8日の5日間（うち悪天候による休止1日）、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。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 $\pm 30\text{cm}$ 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っている。Fig.10 に実験評価範囲を示す。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。

4. 2 実験準備

作業台船を実験海域まで曳航後、評価範囲の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、オペレータはバックホウ投入場所や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。バックホウ着底後のワイヤ玉外し作業は潜水士により行った。Fig.11 にバックホウ投入状況を示す。

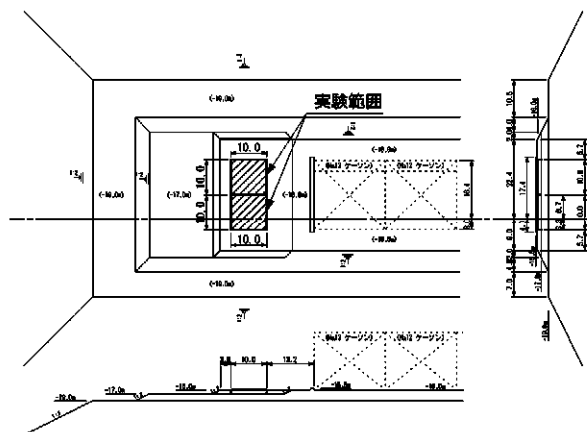


Fig.10 実験評価範囲



Fig.11 バックホウ投入状況

4. 3 遠隔操作による均し作業

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おり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。Fig.12 に遠隔操作の様子を示す。



Fig.12 遠隔操作状況

4. 4 実海域実験まとめ

作業後に撮影したマウンドの状況を Fig.13 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、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 Fig.14、及び Fig.15 に示す。この結果は潜水土搭乘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。

潜水土搭乘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+27cm であり、その標準偏差は±8.1cm 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±8.1cm であり、全体的に高めではあるが平坦に均せている。潜水土搭乘操作では丁張りを見ながらの作業が可能であるため、潜水土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+17cm であり、その標準偏差は±8.1cm であった。また施工管理基準±30cm 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



Fig.13 作業後のマウンド状況

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					

Fig.14 マウンド測量結果 (潜水土搭乘操作)

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				

Fig.15 マウンド測量結果 (遠隔操作)

た。半数以上の測量点において+10cm～+20cm の間に入っている。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。

5. 結論

本研究では、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。
- ・ 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+17cm（標準偏差±8.1cm）であった。これは、潜水士がバックホウに搭乗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。

6. おわりに

水中作業においては、光学映像を用いた遠隔操作が困難であるなど、陸上作業とは異なる様々な技術的障

害によって容易に無人化が進まず、潜水士の目視による人力作業に多くを依存してきたが、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。

しかし、今回の研究対象とした捨石均し作業は、所定の施工精度を要求される重作業ではあるが、作業内容としては比較的簡明なものであって、例えば栈橋の点検・補修など、繊細で複雑な水中作業にまで本システムを適用することはできない。

特に、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、本研究の成果を水中作業の無人化の第一歩として、今後とも、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考えである。

謝辞

長崎における実海域実験においては、国土交通省九州地方整備局長崎港湾・空港整備事務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。

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) 秋園純一，平林丈嗣，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 (IAARC), 2004年，pp.340-345.
- 3) 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.
- 4) 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