

水中建設機械のマニピュレータ化と 操作インタフェース

平 林 丈 嗣

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、当所では水中作業を目的とした重作業用ロボットアームとして水中建設機械を利用することを提案している。しかし遠隔操作での作業性向上のためにはエンドエフェクタ座標の最終位置精度だけでなく、ターゲットへのアプローチ軌跡についても重要な項目である。この課題に対しフロント部の重心を計算し、その重心位置により制御指令値に補償を加える制御手法を用いることで目標追従が大幅に改善され、直線的な動作が可能となった。これにより建設機械側の操作追従性が向上されれば、遠隔操作における作業効率の向上が期待できる。

キーワード：水中建設機械，水中作業，港湾，潜水士，マニピュレータ

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、その多く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¹⁾。バックホウはバケットの代わりにアタッチメントを取り付けることで、把持、カッター、ブレーカなど様々な作業に適應することができる汎用作業機械であり、水中維持補修作業においてもその汎用性は期待できる。そこで、水中作業における機械化の基礎技術として、フォークグラブアタッチメントを搭載し、ハンドリングマニピュレータ作業機械システムを構築することとした。これは将来的な維持補修作業や大水深での工事に潜水士の手作業の代替となる技術として期待できる。

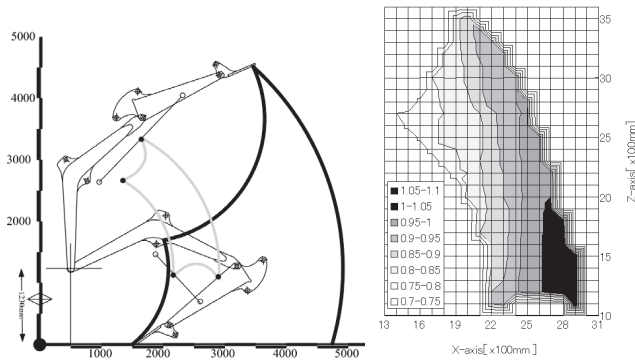
2. 維持補修用水中マニピュレータの提案

(1) 油圧作業機械の追従性向上

建設機械をマニピュレータとして活用するにはエンドエフェクタ座標を直線的に移動させる場面があると予想される。追従性低下の大きな要因として挙げられるのは、ブームシリンダ延長時と短縮時にその特性が大きく異なるためだと考えられる。つまり延長方向にはバックホウフロント部の重量が負荷として加えられ、短縮時には摩擦抵抗をキャンセルする動きとなるため、絶対的な差分

だけでバルブ開度を決定するP制御では特に中立付近の微少な制御は困難となる。またフロント部の重量は不変であるが、アームの角度によって重心位置が変化するため延長時の負荷も変化すると考えられる。

ここで油圧を用いたバックホウの機構を考えると、動力源となる油圧ポンプは1つで、弁の開閉により各シリンダへ供給される油量を調整²⁾する。そのため、動きやすいシリンダが大きく動くため、先端座標の精密な制御は困難である。さらに建設機械の場合、油圧が低いパイロット圧回路でシリンダを駆動させるためのメインバルブを駆動している。遠隔操作に対応させるためには電磁弁に変更することが必要となるが、高圧で大容量なメインバルブをサーボ弁に変更することはコスト的にも現実的ではなく、低圧小容量のパイロット弁を比例電磁弁に変更することが一般的であり、高精度な制御に適した機構では無い。この問題に対し重力補償を用いることにより解決する。これはフロント部（ブーム・アーム・バケット）の重心を計算し、その重心位置により制御指令値に補償を加えるものである³⁾。この補償量は予め調べたものをマップとして持たせており、リアルタイムにマップを参照することで、バックホウの姿勢に応じたバルブ開度に修正するものである。このマップは、静止摩擦抵抗を超え実際にシリンダが動作開始するのに必要な電圧を記録したもののほか、動作中のシリンダが停止しない程度の電圧値を実測により作成している。図1に重力補償型油圧制御の補償マップを示す。

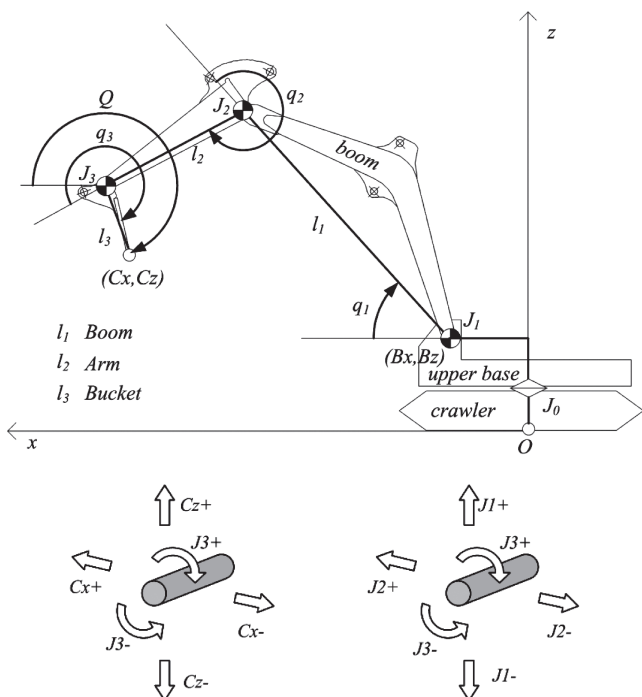


図一1 バックホウ可動範囲および補償マップ

さらにエンドエフェクタを直線的に動作させるため、ブーム・アーム・バケットの各シリンダが同時に開いている場合、目標値との差分が少ないシリンダのバルブを絞ることとした。これにより目標との差分が大きく遅れている関節のシリンダに作動油を供給し、全体として滑らかな動作を実現している。

(2) マニピュレーション操作インタフェース

フォークグラブを用いた建設資材ハンドリング作業では、最終的な座標だけではなく、対象物へのアプローチも重要な要素となる。つまりエンドエフェクタの座標を直線的あるいは任意の曲線上に移動させる場合が想定され、これをオペレータが容易に入力できる必要がある。バックホウの形状を考えたとき、4つのリンク機構を持つシリアルリンクマニピュレータと考えることができる。ここでJ1からJ3までは油圧シリ



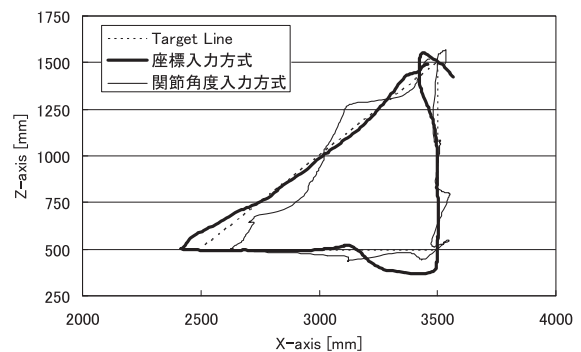
図一2 (左) 座標入力 (右) 関節角度入力

ンダの伸縮により駆動されるため、ある程度精度の高い位置制御が可能である。そこで旋回動作のための入力レバーは別に設けることとし、本研究における操作入力装置の制御対象である先端座標はバックホウ正面をX軸としたX-Z平面状に制限する。また、作業アームのエンドエフェクタをフォークグラブなどとし把持作業を行う場合、対象物とフォークグラブの成す角度が重要であると考えられる。つまり操作入力装置にはJ3の角度が制御可能であることが求められる。以上のことを考え、操作入力装置はレバーグリップ部が回転入力できるジョイスティックを横に設置した形状とした(図一2)。

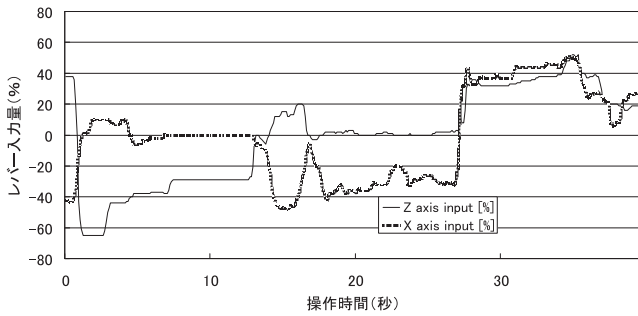
(3) 移動目標追従実験

座標入力方式、関節角度入力方式について、操作性と操作精度を検証するための実験を行った。実験は実機の機体姿勢が描画されるCG画面上でTargetを描画し、作業アームの先端がTargetに合致するように操作入力を行う。実機の先端座標軌跡とレバー入力量によって評価する。Targetの移動軌跡は二辺が1000mmの直角三角形を移動し、その移動速度は75mm/秒とした。なお本実験では先端座標の軌跡に注目するため、J3(バケット角)は180度固定としている。

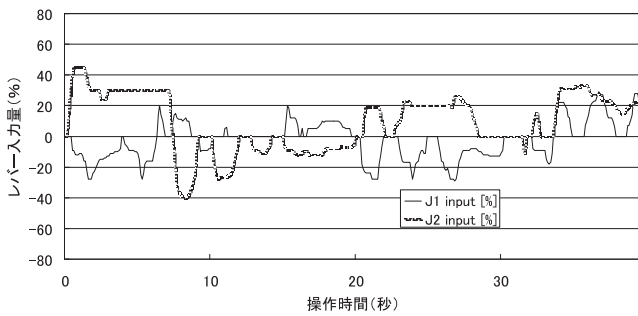
図一3に先端座標の軌跡を示す。関節角度入力方式では水平に移動させる部分では直線的な軌跡となっているが、特に斜面部において目標ラインを大きく外れている。座標入力方式ではほとんどの場所において良好な結果を得ている。また図一4,5はインタフェースのレバー入力量である。横軸の0~13秒が垂直動作、13~27秒が水平動作、それ以降が斜面動作時の入力量となる。関節角度入力方式では全体的に細かな動作を行っており、Targetを追従するために複雑な動作を必要とすることがわかる。座標入力方式のレバー操作量を見ると、微少な変化はあるものの、各辺においてほぼ一定の操作量であった。つまり先端座標を直線的に移動させる場合でも複雑な操作を必要としない



図一3 先端座標軌跡



図一四 座標入力方式における操作量

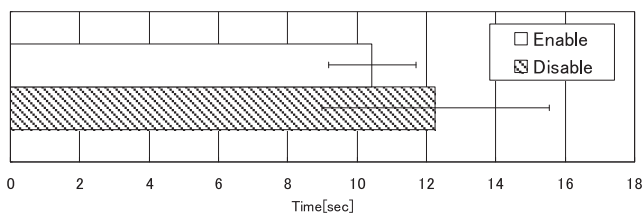


図一五 関節角度入力方式における操作量

め、マニピュレータとしてのインタフェースに適していると言える。

(4) 微少操作時の位置制御の有効性

座標入力方式では、把持作業時の微調整など先端座標の微少な操作を行うことを想定し、任意のタイミングで位置制御に移行することが可能である。ここではその有効性を調べるため、目標位置から 50 mm の誤差で停止させる作業を、位置制御を利用した場合としない場合で比較する実験を行った。目標位置はバックホウ座標系原点から X=4,000 mm, Z=1,000 mm の場所とし、50 mm の誤差範囲内に 3 秒静止させることとする。なお J3 の角度は 180 deg 固定とし、先端座標の初期位置は X=2,800 mm, Z=0 mm とする。作業回数はそれぞれ 10 回行った。目標位置に到達するまでの時間を図一六に示す。なお、この結果は 3 秒の静止時間を差し引いたものである。位置制御を利用した場合は、利用しなかった場合と比べて約 1.8 秒程度の時間短縮しか見られず、位置制御は作業時間の短縮に効果があるとは言えない結果となった。しかし、位置制御を利用した場合の標準偏差は小さく、さらに



図一六 操作時間

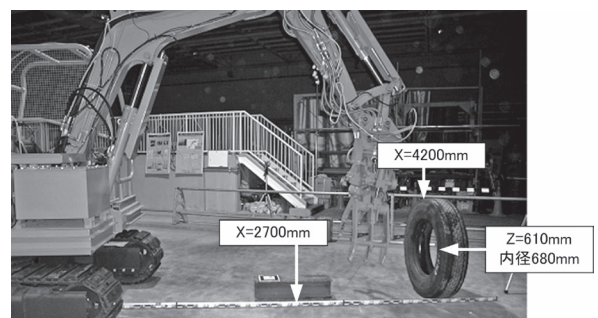
移行するには一度操作を停止するための時間ロスがあることを考えると、最終位置決めにかかる時間は短縮したと考えられる。以上の結果から、位置制御の移行は微調整作業に有効であると言える。

3. 港湾工事における把持運搬作業

水中での重量物の把持・運搬は、現在のところクレーン台船により行っており、その玉掛や指示は潜水士により行っている。ここでクレーン運転士は水中の状況を目視で確認することが不可能であり、操作は潜水士の音声指示により行っている。また、台船上からの荷役であるため、台船が波浪により動揺すると、吊荷も安定せず、近傍で指示を行う潜水士に危険を及ぼす可能性がある。

そこで水中バックホウの先端にフォークグラブを取り付け、重量物のハンドリングに用いることを想定し、遠隔操作による把持作業について実験を行った。

実験はフォークグラブを取り付けた実験機により H 鋼 (700×200×200) の中心を機体の旋回中心から 2.7 m の距離に設置し把持動作を行い、垂直に持ち上げた後、水平状態を保ったまま 4.2 m 先に設置したタイヤ (中心高さ 610 mm, 内径 680 mm) に通す作業を実験タスクとした (図一七)。評価は H 鋼の角度の変化と中心座標の軌跡とする。但し、H 鋼を直接計測することは困難であるため、把持後のフォークグラブの座標・角度の変化量から算出することとした。さらに、比較実験として JIS 型リモコンによる入力方式、及び、直視での座標入力方式による操作実験を行った。それぞれの入力方式においてそれぞれ 5 回実験を行うこととした。



図一七 把持運搬作業実験状況

図一八は横軸を時間とした場合の H 鋼の角度変化、図一九はそれぞれの入力方式において最も角度誤差が大きかった回の H 鋼の中心座標の軌跡を示したものである。データは H 鋼を掴んでから 0.5 sec 毎に記録している。

JIS 型入力では常に角度が大きく変化しているのに

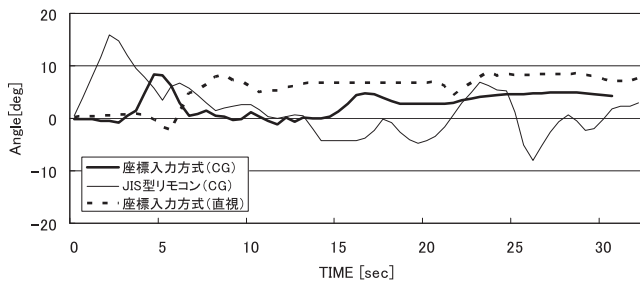


図-8 H鋼の角度の変化

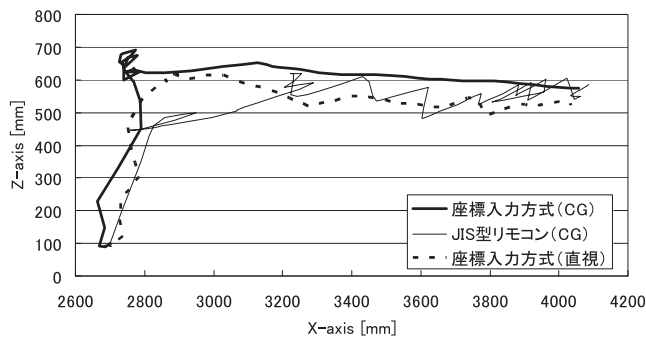


図-9 H鋼中心座標の軌跡

対し、座標入力方式では前半に角度誤差が大きくなるものの、後半では一定の角度で推移している。

H鋼座標軌跡の図では、JIS型入力が鋭角的な動きになっているのに対して、座標入力方式は水平移動時に ± 5 cmの範囲で直線的に移動している。この結果から、エンドエフェクタ座標入力方式ではJ1, J2, J3の角度を連携して操作することができており、任意の姿勢で直線的に対象物を移動させる入力操作を容易に行うことができたと言える。

4. 水中建設機械の多機能化

前述の対象物を把持する動作、エンドエフェクタを任意の位置に移動・固定する動作のほか、精密な動作を行える電動アームをフォーククラブアタッチメントに追加することで、重量物を固定し加工する動作についての研究を行っている。例えば人間の動作を考えたとき、片手で対象物を固定し、片手で工具などを使い作業を行うことが考えられるが、通常のバックホウではアームが1本であり、このような作業は実現できない。近年レスキュー活動や解体作業などを対象とし研究開発が進められている双腕型バックホウでは、動力が油圧シリンダであり強力な出力は有するが、微細な動作は不向きである。

そこで、フォーククラブアタッチメントの根元に電動アームを追加することで、把持などの力作業と、溶断や穴開けなどの比較的精密な作業を目指した簡易双腕アタッチメントについて提案を行い、現在はその入力インターフェースについて研究を行っている(図-10, 11)。



図-10 双腕操作インターフェースイメージ

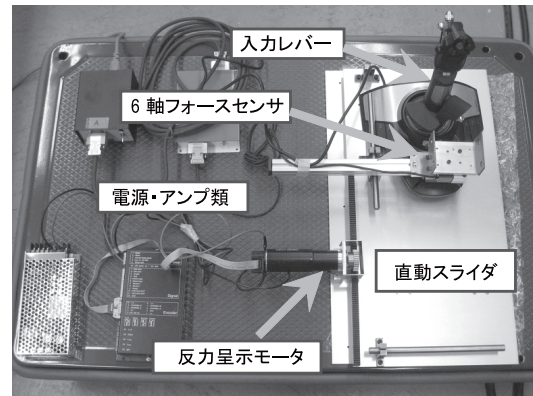


図-11 力入力型左手インターフェース

利き手側ではない操作の場合、複雑な入力や呈示は混乱や誤操作を招くと考えられる。そこで基本的な情報として押し付け作業反力に注目し、手首部分に力センサを取付けることで力帰還型制御を行う操作インターフェースを開発した。また、Slaveの前後位置をスライダの位置によって呈示する機構も追加している。

しかしPCでのシミュレーションにおいて実験を行ったところ、Master-Slave間で遅延が発生する場合、Slaveの速度(スライダ速度)と力センサ入力の同期が取れず発振するような挙動となった。そこでSlaveに負荷がない場合は力センサの入力でMasterの速度制御を行いSlaveが追従する位置-位置制御とし、Slaveに負荷がある場合には力帰還型制御に移行する方式とした(図-12)。

Slave側となるバックホウフォーククラブ上には、電動の補助アーム(図-13)を設置した。これは三軸の自由度を持ち、フォーククラブ正面方向に対して左右と前後は直動としている。上下方向については円弧運動の軌跡となるが、並行リンクにより常に一定の角度を保持する。タスクとして重量物を把持しつつ鋼材の切断する解体作業を想定し、この電動補助アームにエアプラズマ切断機(ダイヘン社製 M-1500C)のトーチ部を取り付けた。なお、溶断時のトーチスイッチはケーブルにより延長し、フットスイッチにより操作することとした。

この電動補助アームを前述の左手インターフェースにより操作を行い、バックホウのブーム・アーム・フォー

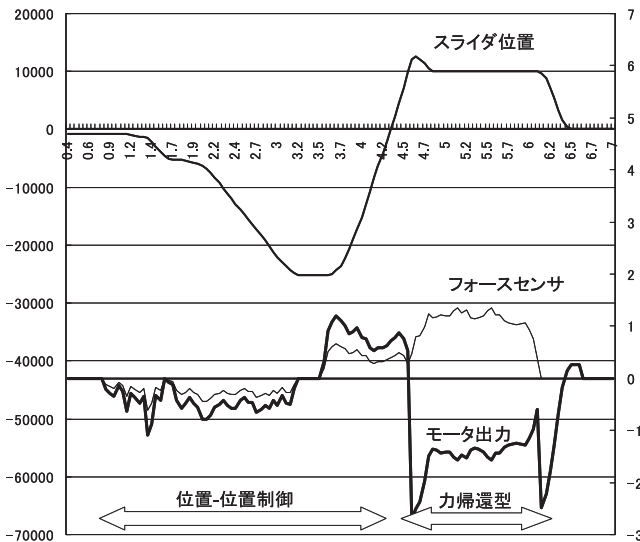


図-12 双腕操作インタフェース出力特性

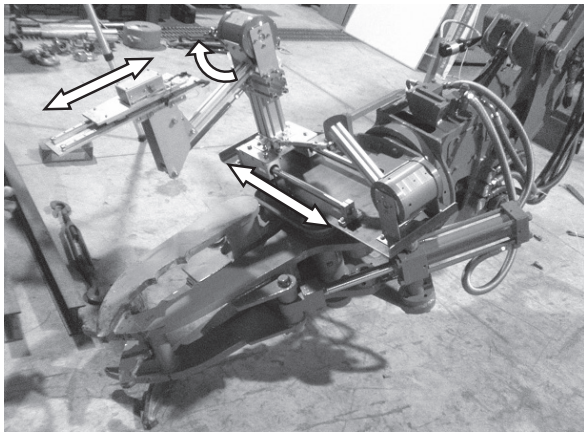


図-13 電動補助アームの自由度

ククラブなど油圧系については2章で述べたジョイスティックレバーにより操作することで、簡易的な双腕マニピュレータを実現した。

現段階では本システムにより重量物であるH鋼を把持し、その一部を溶断する作業を実施(図-14)しており、今後その有効性について検討する予定である。

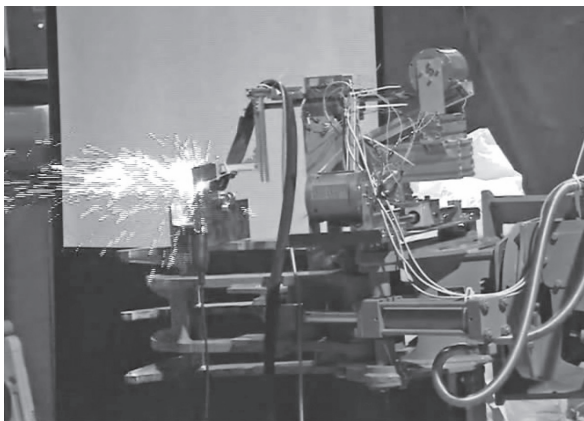


図-14 電動補助アームによる溶断作業

課題点としては電動補助アームの自由度が少なく、直線的な運動しか実現していないため、エアプラズマトーチしか搭載していないが、自由度を増やし高精度な制御を実現することで、港湾域における玉がけ作業や水中溶接のほか、大水深下での水中構造物構築のためのジョイント作業やカプラコネクタの接続などといった様々な水中作業への応用が期待できる。

5. おわりに

陸上での工事では作業内容に応じて多種にわたる建設作業機械が開発・普及しており、様々な作業を効率よく施工している。それに対し水中における工事では、その特殊性から機械化が進んでおらず、いまだ潜水士の手作業に依存している。しかし水中作業は極限作業環境下であり、最も機械化が必要な分野⁴⁾であると考えている。そこで近年現場導入されはじめた水中バックホウに注目し、アタッチメントを変更することで様々な作業に適応できる水中作業マニピュレータとして活用することを想定し研究を行ってきた。高度成長期に整備された数多くの港湾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、情報の呈示に優れた操作インタフェースを建設機械遠隔操作に応用し、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。

なお本研究は科研費(21760349)の助成を受けたものである。

JICMA

《参考文献》

- 1) Hirabayashi, Yamamoto, Yano, Iwata : Experiment on Teleoperation of Underwater Backhoe with Haptic Information, ISARC2006, pp.36-41 (2006)
- 2) 一柳健 : 電子油圧制御 ; 日刊工業新聞社 (1993)
- 3) 平林文嗣, 矢野博明, 岩田洋夫 : 「ARを用いた濁水中における物体認識」, 第12回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 pp.15-18 (2007)
- 4) 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 (1999)

【筆者紹介】

平林 文嗣 (ひらばやし たけつぐ)
 (株)港湾空港技術研究所
 新技術研究開発領域 計測・システム研究チーム
 研究官

