

3. 水中バックホウのマニピュレータ化に関する研究

港湾空港技術研究所
筑波大学
筑波大学

○ 平林 丈嗣
矢野 博明
岩田 洋夫

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，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．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．

本稿では，維持補修を目的とした水中建設機械の高度遠隔操作インタフェースに関する研究において，エンドエフェクタの追従性向上のためブーム・アームの重心位置により油圧弁の開度を可変する Valve 補償について提案しており，その特性についての報告を行う．また，エンドエフェクタにフォークグラブアタッチメントを搭載し，遠隔操作による把持作業についての実験について述べる．

2. 維持補修用水中マニピュレータの提案

本研究所では，過年度の水中バックホウ遠隔操作に関する成果を基¹⁾に，点検診断・維持補修を目的とした重作業用ロボットアームとして利用することを提案しており，平成 18 年度よりマニピュレータ化に関する研究を行っている．

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応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．なお，対象とする作業は重量物の把持作業とした．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．

2.1 油圧作業機械の追従性向上

過年度の研究では位置-位置制御である相似形インタフェースを用いたため，油圧シリンダの制御に追従性の悪い P 制御を用いても特に問題とな

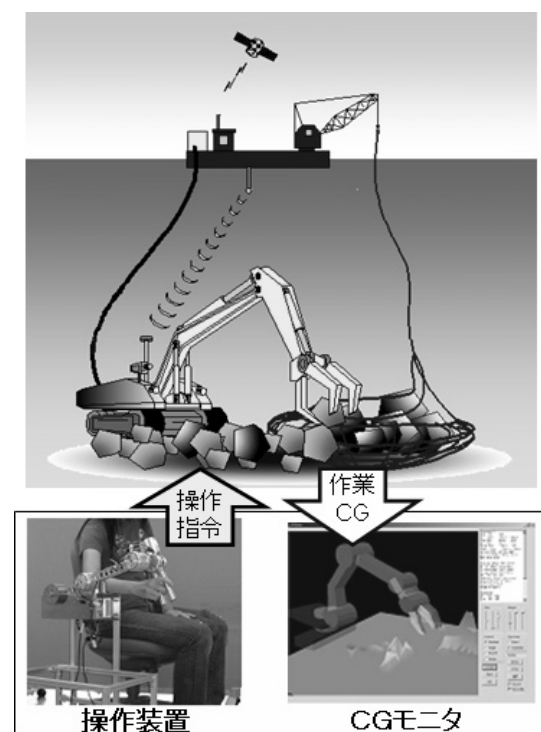


図-1 水中における把持作業イメージ

ることは無かった．しかし，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働きとなるため，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小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．

そこで，フロント部重心位置をパラメータとした動作開始電圧値を補償マップとして持つ重力補償をブームシリンダの制御に適応する．

2.2 バックホウのディメンション

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

$$r = f(q)$$

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²⁾と呼ぶ。

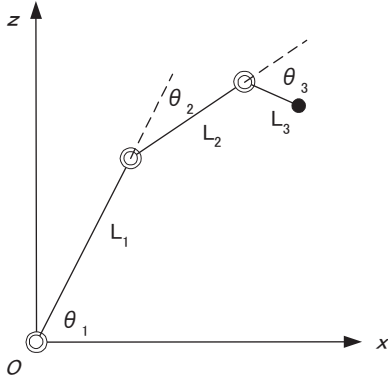


図-2 バックハウフロント部モデル

図-2 に示す x z 平面内を動くバックハウのブーム・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。順運動学問題は三角関数の定理より

$$\begin{aligned} x &= L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ z &= L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ \theta &= \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \end{aligned} \quad (1)$$

と導くことができる。次に逆運動学を求めると

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

に上式を代入し整理すると

$$\begin{aligned} (z - L_3 \sin \theta) \sin \theta_1 + (x - L_3 \cos \theta) \cos \theta_1 \\ = \{(z - L_3 \sin \theta)^2 + (x - L_3 \cos \theta)^2 + L_1^2 - L_2^2\} / (2L_1) \end{aligned} \quad (3)$$

となる。ここで

$$a \sin \sigma + b \cos \sigma = c \quad \dots \dots \dots (4)$$

の関係式が成立するとき

$$\phi = a \tan 2(a, b) \quad \dots \dots \dots (5)$$

と置くと、三角関数の合成則より σ は

$$\begin{aligned} \cos(\phi - \sigma) &= c / \sqrt{a^2 + b^2} \\ \sin(\phi - \sigma) &= \pm \sqrt{(a^2 + b^2 + c^2) / (a^2 + b^2)} \\ \sigma &= a \tan 2(a, b) - a \tan 2(\pm \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}, c) \end{aligned} \quad (6)$$

と求まる。したがって

$$\begin{aligned} a &= z - L_3 \sin \theta \\ b &= x - L_3 \cos \theta \\ c &= \{(z - L_3 \sin \theta)^2 + (x - L_3 \cos \theta)^2 + L_1^2 - L_2^2\} / (2L_1) \\ \sigma &= \theta_1 \end{aligned} \quad (7)$$

と置くことにより θ_1 を得る。同様にして

$$\begin{aligned} \theta_2 &= a \tan 2(\pm \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}, c) \\ &\quad - a \tan 2(\mp \sqrt{a^2 + b^2 + d^2}, d) \end{aligned} \quad (8)$$

を得る。上式の複合は二つの姿勢を持つことを示しているが、バックハウの場合関節の可動範囲が限定されるため判別は可能である。

これらの式によりバックハウの先端座標、及び各関節角度を求められる。

2.3 重力補償制御

一般的に制御に用いられる P 制御手法では、Master と Slave の位置の差分を各関節独立して検出し、その差分を指令値として Slave を制御する。ここで油圧を用いたバックハ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³⁾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。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。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、バックハウの姿勢に応じたバルブ開度に修正するものである。図-3 に重力補償型油圧制御の補償マップを示す。

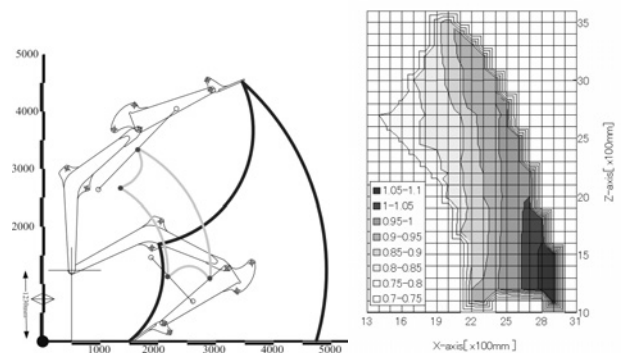


図-3 バックハウ可動範囲および補償マップ

この重力補償をバックホウ制御系に組み込みバケット先端座標を水平移動させ軌跡を計測する。

図-4はP制御に重力補償を加味したときの先端座標の軌跡である。往路では±30mmの範囲に収まっているが、3600mm付近で急激な振動が起きた。このときのシリンダ速度と角度差分を示したグラフを図-5に示す。

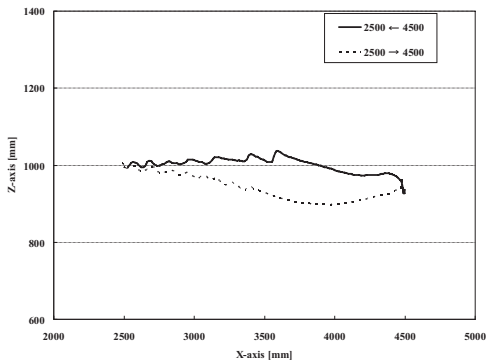


図-4 P制御によるバックホウ先端座標

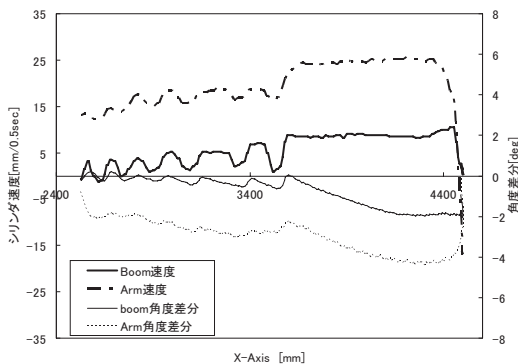


図-5 シリンダ速度及び角度（引き動作時）

ブーム角度差分を見ると一定の遅れはあるものの、シリンダ速度は動作開始直後より急激に立ち上がっており、補償マップにより静止摩擦抵抗、自重負荷をキャンセルしたと言える。その後、目標角度に達するまで速度がほぼ等速であり、これは補償マップによりシリンダが作動する最低のバルブ開度を確保しているためである。

しかしブーム角度が目標値に達した瞬間、補償量が0になりバルブが全閉となるため、ブームシリンダは急激に停止している。このブームが停止するタイミングにあわせて、アームシリンダの速度も変化しており、これは停止時の加速度がアーム動作に影響を及ぼしたものと考えられる。

また、図-4の復路の軌跡においては、目標値より大きく下回った。これはアームが開く場合、重力に逆らう方向への動作となるため目標角度への追従性が低下したことが原因であると考えられる。この結果より、ブームを上げる場合にはPI制御+重力補償とすることでブームシリンダの緩停止を

行い、アームが開く場合にはPI制御のみとすることで、目標角度への追従性の向上を図る。

図-6に重力補償に上記の条件を加味したときの先端座標の軌跡を、表-1に各軌跡の座標誤差を示す。これらより可動範囲全域において直線的な軌跡であることがわかる。このように本制御手法により追従性の高いバックホウの制御が可能となる。

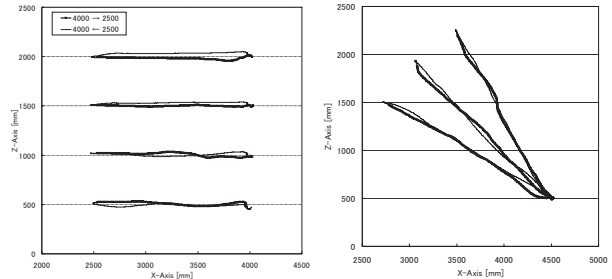


図-6 先端座標の軌跡

表-1 先端座標誤差

Horizontal		Average	Standard deviation	Maximum difference	Minimum difference
Z=500	往路	509.7	14.4	32	-18
	復路	490.5	16.2	24	-48
Z=1000	往路	999.9	17.7	31	-39
	復路	1007.0	14.3	34	-15
Z=1500	往路	1491.5	9.0	9	-42
	復路	1528.7	9.0	40	2
Z=2000	往路	1979.0	12.0	11	-50
	復路	2028.9	12.7	50	-10

ANGLE(deg)		Average	Standard deviation	Maximum difference	Minimum difference
120	往路	-17.5	25.9	31.9	-59.8
	復路	-18.7	17.8	12.7	-51.4
135	往路	-31.0	20.8	35.4	-73.2
	復路	-16.2	19.7	19.8	-54.3
150	往路	-13.7	22.7	34.0	-80.2
	復路	11.7	11.8	40.7	-28.1

2.4 マニピュレーション操作インタフェース

バックホウの形状を考えたとき、図-7のように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 J_1 から J_3 までは油圧シリ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 J_3 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-7)。レバーを倒すことにより先端座標を速度制御し、レバーを捻ることで

J_3 を角速度制御する。また、横置きとしたことで入力方向が X-Z 平面となり、レバーを倒す方向にアーム先端が動くため直感的な操作も期待できる。

しかし、入力量が減少した場合、微小な入力が行いにくくなることが想定される。遠隔操作型建設機械では比例電磁弁（パイロット弁）により低圧の油圧を制御し、その油圧で高圧のメインバルブを動かす構造となっている。つまり物理的に動く弁が二段階あるため、駆動するまでにタイムラグが発生することになり、ハンドリング作業に必要となる微調整が難しくなるものと考えられる。

この問題に対しては最終的な座標を指定できる位置制御が有効であると考えられる。具体的には機体が停止状態、レバー中立の場合に、速度制御と位置制御を切替えるようにする。ここでジョイスティックの最大入力角度は約 30deg であり、その範囲を 10 段階程度で入力できた。また実験機の先端座標の目標分解能は 50mm としている。よって位置制御に移行した場合、その時点での位置を中心として、レバー入力量最大のときに先端座標が 25cm 動くように設定することとした。

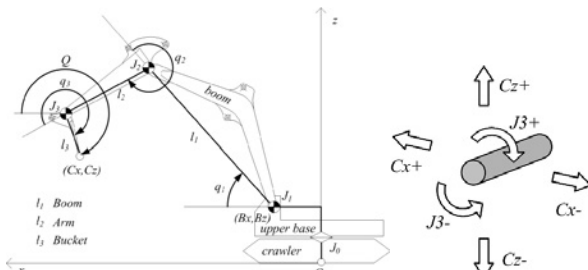


図-7 エンドエフェクタ座標直接入力方式

2.5 対象物認識技術

海底面に積まれている鋼材など不用意な力がかかることを避けねばならない状況下での物体認識を想定し、対象物にもっとも近接できるフォークグラブ部に設置した水中カメラにより、対象物の位置を同定する方法を提案する。前述のバックホウのモデルでは、バックホウ回転中心を Z 軸、バックホウ正面を X 軸とし、Z 軸とクローラ下面と交わる点をバックホウローカル原点 0 としている。回転を考慮しなければ、バックホウは一般的な 3 自由度シリアルリンクマニピュレータと考えることができ、先端部に設置したカメラ座標 (C_x, C_z) 及びカメラの向き Q は以下の式によって表すことができる。

$$C_x = l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3) + B_x \quad (9)$$

$$C_z = l_1 \sin q_1 + l_2 \sin(q_1 + q_2) + l_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3) + B_z \quad (10)$$

$$Q = q_1 + q_2 + q_3 \quad \dots \dots \dots \quad (11)$$

この式からカメラ視線は次の一次直線として表すことができる。

$$z = (\sin Q / \cos Q)x - (\sin Q / \cos Q)C_x + C_z \quad (12)$$

また、カメラと対象物の位置関係は ARToolKit を用いた。これは既知形状のマーカを画像解析することで、その位置・傾斜を 4 行 4 列のアフィン変換行列式で表すことができるものであり、その行列を用いて図-8 のように Master モニタに H 鋼の姿勢を描画すれば、H 鋼とフォークグラブの位置姿勢の関係容易に認識できる。

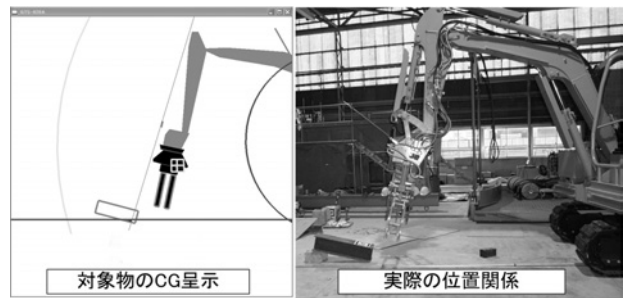


図-8 傾斜した対象物の呈示

3. 遠隔マニピュレーション実験

3.1 単純把持作業実験

H 鋼等の部材が海底面に無造作に置かれた場合、その姿勢は水平であるとは限らない。

そこで H 鋼 (L700×H200×W200mm) をピッチング方向に傾斜させた場合の把持実験を行った。実験時の H 鋼の設置位置・姿勢を図-9 に示す。

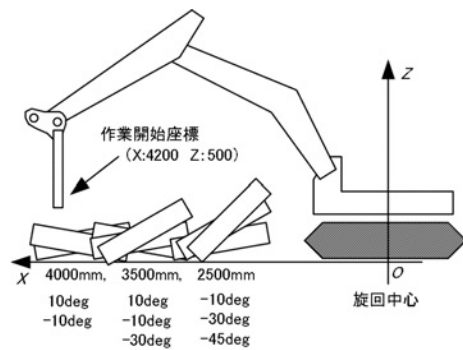


図-9 実験時の H 鋼設置位置

それぞれの姿勢において 3 回ずつ把持作業を行い、把持時の座標とフォーク角度を評価項目とする。フォーク先端座標の初期位置として、X:4200, Z:500, フォーク角度は真下の状態から作業を開始する。オペレータは H 鋼の中心を目標とし、H 鋼の設置角度と直交するように把持作業を行う。実験は座標入力方式のジョイスティックにより操作し、評価は H 鋼の中心位置からの差分と、H 鋼と直交する軸とフォークグラブ角度との差分とする。なお、ARToolKit を稼働させている PC のモニタ(フ

オークカメラ映像)はオペレータに呈示しておらず、図-8のCGモニタのみでの遠隔操作となる。さらに濁水中での作業条件に近づけるため、マーカークとカメラの距離が2m以上ある場合はCGモニタにH鋼を表示させないこととした。

3.2 単純把持作業実験結果

把持時のフォーク先端座標とフォーク角度をH鋼を基準とした座標系に変換したものを図-10に示す。図の長方形がH鋼を示しており、プロット点から伸びている線は把持時のフォーク角度を示している。

実験の結果、把持時のフォーク先端座標の誤差はH鋼の中心から長手方向に最大96.7mm、短手方向に最大71.2mmであり、H鋼に対する角度誤差は最大7度であった。また、計24回の把持作業においてすべて把持することができており、様々な視点からの映像が確保できない水中においてARToolKitによる座標認識とCGモニタによる位置関係の呈示は有効であると言える。

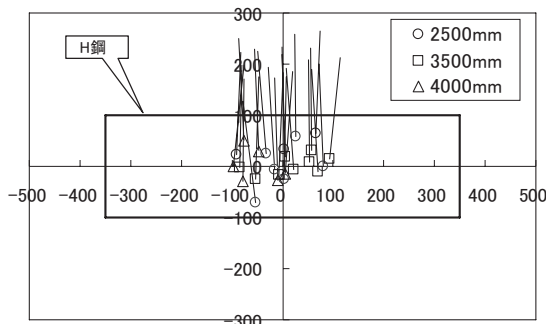


図-10 フォーク先端座標及び角度

3.3 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鋼を把持し、水平面に対し一定の角度を保持したままH鋼を移動させる作業を行うこととした。これは長尺資材を地面などに接触しないように任意の姿勢で運搬する作業を想定しており、具体的にはH鋼(700×200×200)の中心を機体の旋回中心から2.7m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4.2m先に

設置したタイヤ(中心高さ610mm、内径680mm)に通す作業を実験タスクとした(図11)。評価はH鋼の角度の誤差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。

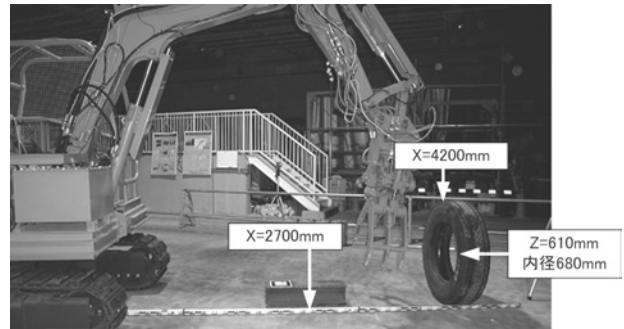


図-11 把持運搬作業実験状況

3.4 把持運搬作業実験結果

図-12は横軸を時間とした場合のH鋼の角度変化、図-13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0.5sec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。

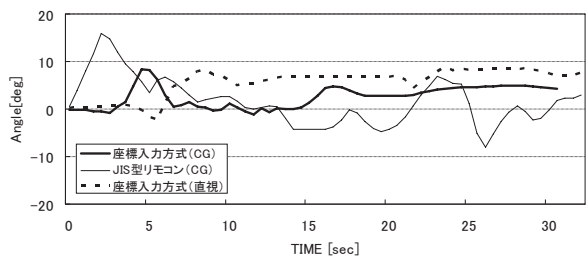


図-12 H鋼の角度の変化

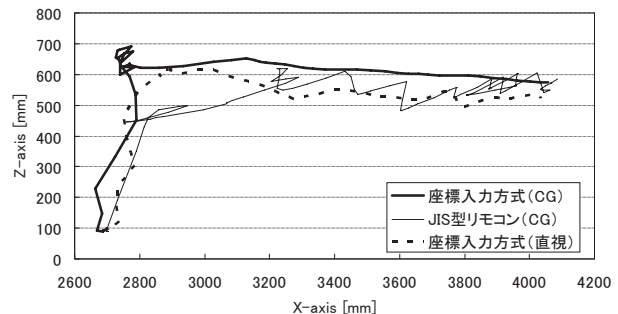


図-13 H鋼中心座標の軌跡

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±5cm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、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。

直接目視の場合では、操作装置を運転席横1mに設置した。角度の変化や水平移動時の軌跡は細かく変化することはないが、目標からの誤差は横視点CGを呈示した座標入力方式と比較して大きくなっている。これは、直接視認することで立体感はあるものの、水平や高さなどの情報は運転席付近からの視点では正確に判断できなかつたためであると考えられ、横視点CGによる情報呈示は精度を要求される遠隔操作に有効であると言える。

4. マニピュレーションの応用（水中点検作業）

バックホウをマニピュレータとして利用する場合、重量物の把持運搬のほか、可動範囲内における定点での固定が容易となる。また重力補償制御により、エンドエフェクタの座標を直線的に運動させることが可能となっており、その精度は±50mm以内に抑えられている。ここで前述のとおりバックホウは先端部のエンドエフェクタを変更することで様々な作業に適応でき、例えば点検用センサ等を搭載することで点検診断作業の機械化についても応用することが可能である。そこで先端座標誤差や、ロール・ピッチ方向への補正を行う電動ステージをエンドエフェクタとし、そのステージに超音波肉厚計測センサを搭載することで、波浪や潮流に影響されない正確な測定が可能となる。



図-14 水槽内での肉厚計測実験

そこで図-14に示すような実験水槽内での鋼管肉厚点検作業実験を行った。使用した超音波センサは当所で研究開発が行われているものであり、鋼管との距離を30cmから50cmの範囲で可能な限り直交させる必要がある。実験の結果、油圧制御とセンサ搭載機構により超音波センサの要求する仕様を満足することが可能となったことが確認で

きた。またセンサを任意の位置へ連続して固定することが可能となれば、肉厚断面のプロファイル計測が可能となり、信頼性の高い維持管理が可能となると考えられる。

5. まとめ

遠隔操作における作業効率の向上には、オペレータの操作意思を直感的に入力できるMaster、入力どおりに追従するSlave、そして状況をオペレータに呈示するトレイグジスタンスが重要である。

本研究では油圧制御に重力補償、操作インタフェースにエンドエフェクタ座標入力方式、さらにARToolKitにより対象物の位置を認識し、横視点からのCG表示により対象物との位置関係を明確に示すことで、作業状況の呈示を行うインタフェースを構築した。実験ではH鋼が傾斜していた場合でも把持を失敗することがなく、その有効性が確認され、提案するインタフェースは相似形インタフェースの問題点であった疲労度について改善し、水中遠隔操作作業において従来のJIS型操作方式より優れた操作精度を有することが確認できた。

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、さまざま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。

参考文献

- 1) Hirabayashi, Yamamoto, Yano, Iwata : Experiment on Teleoperation of Underwater Backhoe with Haptic Information” , ISARC2006, pp. 36-41 (2006)
- 2) 川村 : ロボット制御入門 ; オーム社(1995)
- 3) 一柳建 : 電子油圧制御 ; 日刊工業新聞社(1993)
- 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)