

遠隔操作型水中バックホウに関する研究

国立研究開発法人港湾空港技術研究所 新技術研究開発領域

主任研究官 ひらばやし たけつぐ 平林 丈嗣

1. 港湾工事における機械化

港湾施設はその大部分が水面下に構築されるため、その工事等は水中作業となり、相当程度を潜水士等の人力に依存している（写真—1）。このような港湾工事における作業を一層安全で効率的に行うことができる技術が必要であった。

河川の氾濫などの自然災害が多い我が国において、治水工事等の重要性から水中建設機械の開発は昔から行われており、1968年には河川工事用の水中ブルドーザーが、1972年には水陸両用油圧ショベルが日本で開発された¹⁾。1990年代に入り、港湾工事の急速施工への対応と水中作業の安全性向上のため、海洋土木会社各社が水中油圧ショベルを開発し、主に基礎マウンド均し作業で使用されている。さらにエンドエフェクタを変更することで様々な作業に適応することができることも利点の一つとして挙げられる。たとえば東京湾での安全な航路確保を目的として実施された第三海堡撤去工事では、エンドエフェクタとして水エジェクタを搭載し堆積土砂の除去作業に使用された実績（写真—2）がある。他にも地盤を破碎するためのプレーカやカッターヘッドなど様々なエンドエフェクタが開発され、水中工事における重作業に



写真—1 潜水士によるマウンド築造



写真—2 水エジェクタを搭載した水中建機

使用されている。

しかし港湾域は一般的に透明度が低く、さらに水中における施工では、作業時に発生する濁りにより視界が極端に悪化するため、光学映像を利用し地形など対象物の形状認識を行うことは困難である。さらに施工精度が必要となる防波堤マウン

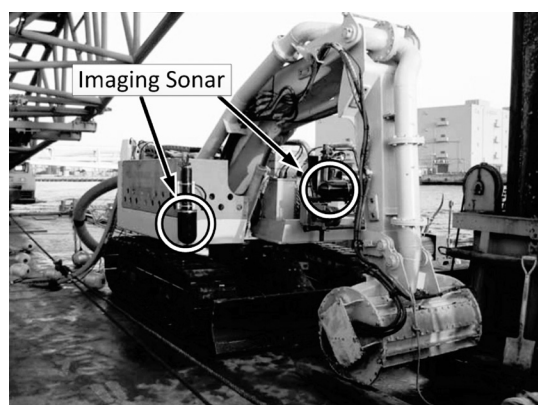
ド築造においては、作業機械近傍のマウンド高と目標となる基準高をリアルタイムに認識できる技術が必要である。気中であればレーザーレンジファインダなどの光波測量器を用い高精度の計測が可能²⁾であるが、水中では減衰が大きくなるため、500kHzから1 MHz程度の超音波を用いた計測が一般的である。ここで超音波の波長は光波と比較して非常に長く指向性も低いため、分解能が低くなる欠点が存在する。このような外界計測に関する技術的課題が水中作業機械による施工効率低下の要因となっている。

2. 水中施工を想定したインタフェース

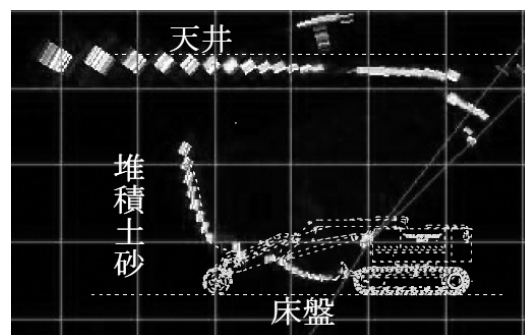
水中施工において外界計測および情報の呈示方法は重要である。ただし作業の目的や施工方法によって、操作者が必要とする情報は異なる。ここでは、狭歪部での浚渫作業、マウンド均し作業を対象としたインタフェースを紹介する。

(1) 浚渫用水中油圧ショベル

水流がある排水口などの場所での作業を潜水士が実施することは安全確保が困難であり、完全な機械化が必要となる。このような場所で堆積する土砂などの浚渫作業を実施するための浚渫用水中油圧作業機械が開発されている。写真—3は東亜建設工業株式会社が所有する浚渫用水中油圧作業機械「Yellow Magic-7」である。エンドエフェ



写真—3 浚渫用水中油圧作業機械



図—1 ソナーによる形状計測



写真—4 車体傾斜呈示運転席

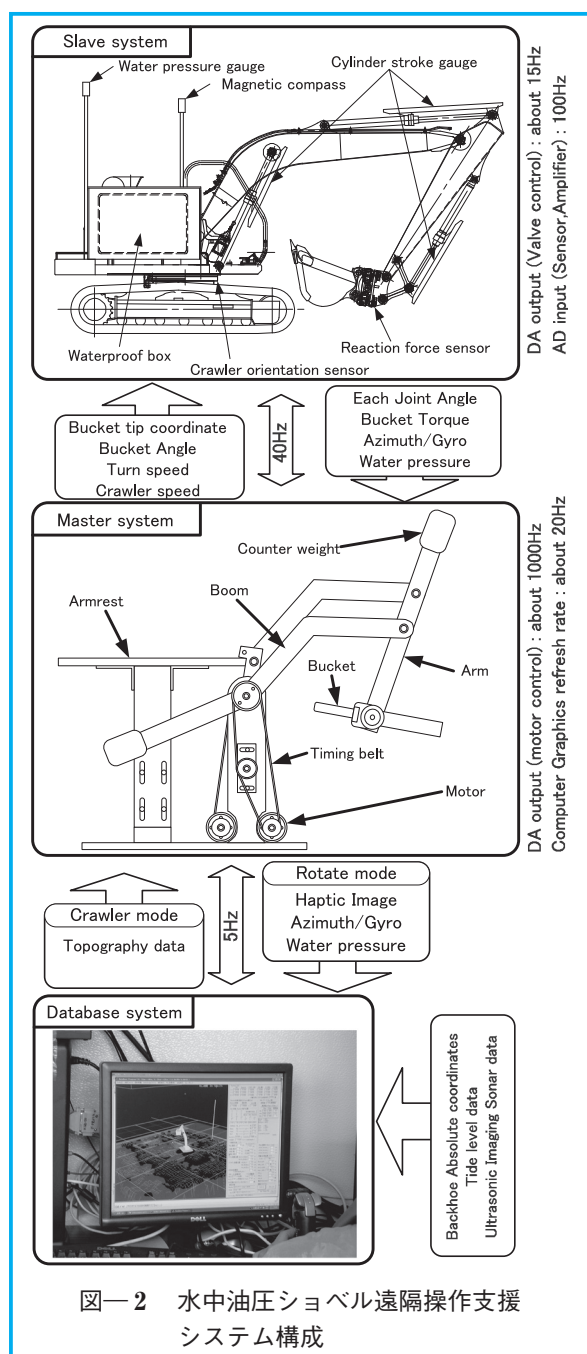
クタにはロータリー式浚渫ヘッドが装備され、土砂などの堆積物の浚渫作業を遠隔操作で実施することが可能となっている。作業対象が浚渫であるため、操作者が必要とする情報は「堆積物が存在」を判断できることが重要となる。そのため外界計測については前面のソナーによる断面形状計測（図—1）が行われている。また、堆積土砂が残っている状態で浚渫ヘッドを下げた場合、車体前方が浮き上がるため、車体の傾斜を検出し運転席を傾斜させている（写真—4）。これらの情報により現在の作業状況を認識し、視覚情報を利用せずに遠隔操作作業を実現している。

(2) マウンド均し作業

施工後の出来型（均し精度）が重要となるマウンド築造工事において、操作者が必要とする情報は、マウンドの目標高と現形状をリアルタイムに認識可能とする情報である。濁水中における地形形状の認識については触像を利用することが提案されている。これはマウンド面とバケットの接触座標を蓄積し画面に描画することで接触情報を視

覚的に呈示するもので、操作者は掘削などの作業により変化したマウンド形状をリアルタイムに認識可能となる。さらに設計形状を重畳して表示することで、形状の比較を常時行いながら作業できるものである。

図—2に水中油圧ショベル遠隔操作のための支援システム構成を示す。この支援システムは、水中作業における作業状況の認識に反力などの触覚情報を用いており、相似型インタフェースにより操作入力のほか、バケットの反力情報および機体の関節角度を認識する。



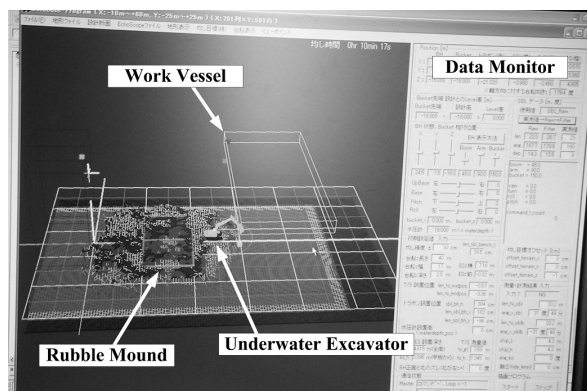
図—2 水中油圧ショベル遠隔操作支援システム構成

建設機械の遠隔操作では安全性が求められるため、単純で安定性の高い位置対称型バイラテラル制御が有効であるが、油圧作業機械のような小さな負荷ではMaster-Slave間で変位が生じない場合、接触の認識が困難である。また油圧ショベルに利用されるシリンダは一般にストローク速度が遅いため、力逆送型バイラテラル制御では無負荷時にMaster-Slave間で相似の関係を保つことが難しい。そこで本システムでは、無負荷時には位置対称型バイラテラル制御を行い、接触センサにより接触を認識した場合には位置拘束ゲインを高めることで負荷の呈示を行っている。

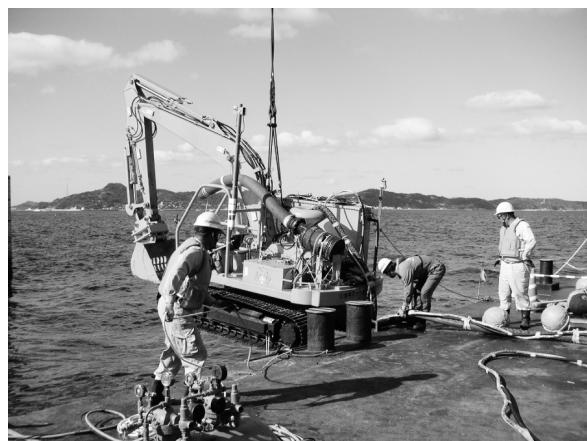
内界センサについては、シリンダストローク量を直動型磁歪センサにより検出し、関節角度から先端座標を算出する。機体の傾斜および方位はジャイロと地磁気方位計により検出し、機体位置については超音波による測位システムにより船舶との位置関係を検出する。ただし超音波による測位システムのみでは、位置精度が $\pm 30\text{cm}$ 程度となるため、水深方向のみ高精度水圧計により補正している。これらの情報を合わせ、接触座標をグローバル座標系に変換し記録する。なお、接触負荷の検出については、バケット部にロードセルアタッチメントを設置している。

また、作業負荷の変動が比較的小さいマニピュレーション作業の場合、ブーム・アーム・バケット部の重心位置によりバルブ開度の補正值を変化させる重力補償制御のほか、遅延の発生しているシリンダへ作動油を供給するため他のシリンダのバルブ開度を下げることにより、シリアルリンク機構である油圧ショベルの先端座標の追従性を向上させる工夫がなされている。さらに鳥瞰図モニター（図—3）により作業区域全体の進捗状況やバックホウの位置など認識可能となっている。

本支援システムの有効性を検証する目的での実海域実験を実施（写真—5）しており、水中カメラ映像を遮断した状態で、ケーソンマウンド荒均し作業（基準精度 $\pm 30\text{cm}$ ）を遠隔操作により実現している。



図—3 鳥瞰図モニタ



写真—5 実海域実験での水中バックホウ投入

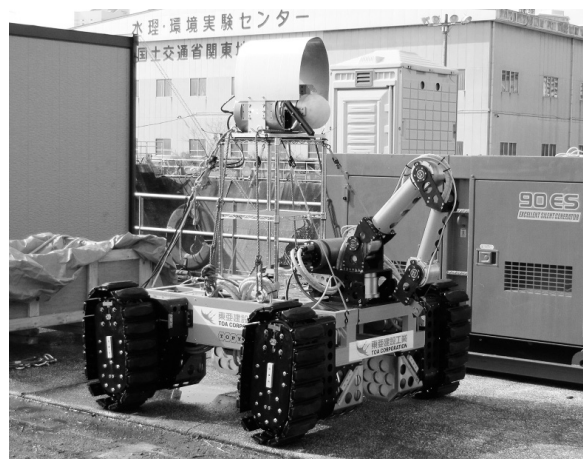
3. 水中作業機械の将来展望

近年、ROV等のビークルを用いた海底資源調査や水中施工への関心が高まっている。一般に、これらの水中作業での状況把握として、光学カメラによる視認が行われるが、作業等に伴って生じる濁りにより視認が困難となり、安全確保のため作業の中断となる。このような状況を回避するために、音響による水中視認技術の開発が望まれていた。

当所では以前より港湾や防波堤などの浅海域での施工や、維持管理を目的とした音響ビデオカメラに関する研究開発を実施している。ROVや水中施工機械による水中作業に適応するための必要な開発項目や目標値を検討するため、音響ビデオカメラによる水中作業状況認識実験を実施した。なお、実験で使用する音響ビデオカメラは、当所



写真—6 水中機材配置位置



写真—7 水中移動台車「DEEP CRAWLER」

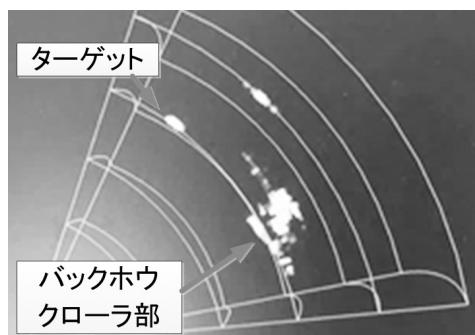
が港湾構造物検査用に研究開発を実施した技術に基づき、株式会社日立製作所が前方探査ソナーとして改良し小型化したものである。

なお当所では国土交通省関東地方整備局と「次世代海洋資源調査技術に関する共同研究」を締結しており、本実験は同局の施設である山内ドックにおいて実施した。写真—6に山内ドックにおける水中機材配置位置を示す。

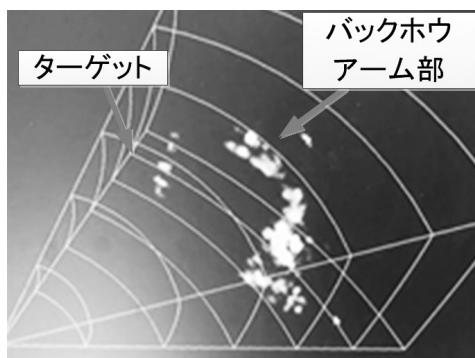
写真—7は東亜建設工業株式会社が新規に開発した水中移動台車「DEEP CRAWLER」である。特徴として四脚のクローラ角度制御による不陸走破性の向上が挙げられる。さらに今後の海洋開発での利用を想定し、耐水深性能は-3,000mとなっている。

実験ではこの水中移動台車上部に音響ビデオカメラを搭載し、水中バックホウとターゲットを音響映像により取得し、位置関係の認識について検討を行った。

実験で使用した音響カメラの特徴として、濁水



図一 4 音響カメラ画像（上面表示）



図一 5 音響カメラ画像（側面表示）

中での認識，対象物位置の三次元計測が挙げられる。つまり図一 4，5 に示すように視点位置を任意に変更可能であり，対象物との位置距離認識や三次元的な形状認識は可能である。

冒頭で述べたとおり，光学による計測と比較すると，音響による計測は分解能や精度が低い欠点が存在する。しかし濁水中において三次元座標をリアルタイムに計測可能という特徴は光学計測に対する大きな利点である。

つまり水中における遠隔操作作業を考えると，対象物とエンドエフェクタの位置関係は操作者にとって重要な情報となる。さらに音響映像であれば濁水中においても距離や形状，位置関係が認識できるため，採掘作業において重要な情報源となる可能性が高く，音響カメラはそれらの課題に対し有効であると言える。

また作業アームなどの姿勢については，掘削移動体の内界センサ情報と音響カメラなどの外界センサの情報を組み合わせ，オペレータが認識しやすい作業状況の呈示方法を検討する必要がある。たとえば，音響カメラ映像が三次元座標を取得可能である利点を活用し，視点移動による立体認識

（運動視差）を用いる呈示方法が有効であるものと考えられる。

4. おわりに

海洋国家である我が国において，海洋の開発及び利用等を基本理念とした海洋基本法が平成19年に成立された。さらに平成25年度の海洋基本計画見直し³⁾では，平成30年台後半にメタンハイドレート・熱水鉱床について民間主導の商業化を目指すことが明記された。特に熱水鉱床は銅の品位が高く，パプアニューギニア領海のビスマルク海で世界初の商業化を目指したNautilus Minerals社（カナダ）のSolowara 1プロジェクト⁴⁾が注目されている。

しかし深海底での大量の鉱物資源採掘を考えた場合，不陸のある広大な範囲を対象に，難視界という条件下での完全な無人化作業が必要である。つまりマイニングツールの開発には，施工方法や作業手順等から必要な自由度や機能等を検討し，そして採算性という非常に高いハードルを越えるために無人化施工の作業効率の向上が重要である。

我が国が海洋資源開発のイニシアチブを得るためには，水中ロボティクス，自然災害現場での無人化施工技術，深海探査技術，水中施工技術などの知見を集結させるべきだと考えている。

<謝辞>

本稿における音響ビデオカメラに関する実験は，戦略的イノベーション創造プログラムによる次世代海洋資源調査技術（海のジパング計画）のうち，ROVによる高効率海中作業システムの開発の一環として実施したものである。

【参考文献】

- 1) 大川聰，「写真でたどる建設機械200年」（三樹書房）
- 2) 供田英一，岩崎肇，岡本仁，「赤松谷川9号床固工事における無人化施工」，建設の施工企画，2010.08
- 3) <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/kaiyou/kihonkeikaku/130426gaiyou.pdf>
- 4) <http://www.nautilusminerals.com/s/Projects-Solwara.asp>