

## 水中構造物撤去装置 —第三海堡撤去への挑戦—

竹田 康雄・酒井 浩・内海 真

平成12年度より、東京湾の第三海堡の撤去工事が始まり、この作業でコンクリートブロック等の撤去に使用しているのが水中構造物撤去装置である。新型の撤去装置は、旧型の撤去装置の改良型として開発され、作業性、機能性、安全性をより追求したモデルである。

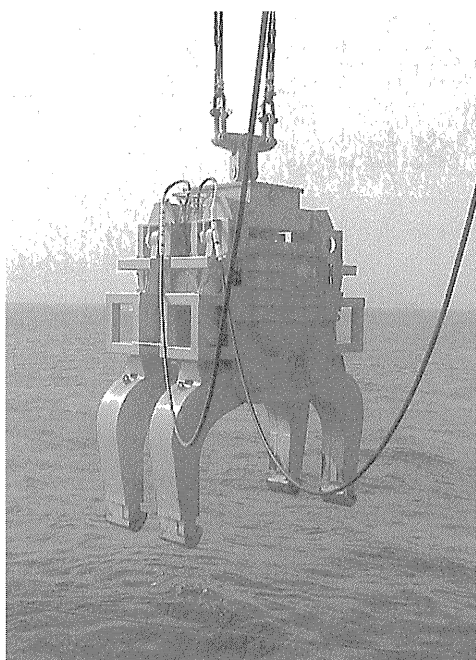
また、独立行政法人港湾空港技術研究所では、濁りのある水中での把持作業を遠隔操作化するため、オーグメンティドリアリティを視覚の補助とした遠隔操作型グラブシステムを開発中であり、第三海堡撤去工事への将来的な活用が期待される。

キーワード：第三海堡、水中施工、遠隔操作、電動油圧、バケット、撤去装置、把持システム、オーグメンティドリアリティ

### 1. はじめに

東京湾の第三海堡は、旧陸軍が東京防衛のための海上要塞として建設されたもので、完成から2年後の大正12年の関東大震災により、壊滅的な打撃を受け、その機能を喪失し、その後も風浪等による崩壊が進み、現在は暗礁化した状態で存在している。

海底に点在しているコンクリート塊の海底周辺には



写真—1 撤去装置全景

機雷、砲爆弾等の危険物も埋没している可能性が高い。

このため、第三海堡の撤去を安全に行うためには、従来の施工機械等を用いて撤去することは難しく、特殊な撤去機械が必要ということで、電動油圧式の水の中構造物撤去装置が開発され、撤去作業に従事している。

ここでは、従来から可動していた旧型に加え、より機能性、作業性、安全性を追求した、平成14年10月から可動している新型の水の中構造物撤去装置（以下、撤去装置；写真—1）について紹介する。

また、独立行政法人港湾空港技術研究所では、第三海堡をはじめとして、水中における構造物のブロックなどの把持作業を遠隔操作化するための技術研究開発に取り組んでおり、現在までの開発状況について、あわせて紹介する。

### 2. 撤去装置の概要

#### (1) 設計条件

撤去装置は、以下の設計条件のもとに製作されている。

- ① 対象構造物：コンクリート
- ② 対象構造物重量：最大60t
- ③ 地切力：最大10t
- ④ 所要水平力：343kN以上
- ⑤ 最大油圧力：21MPa
- ⑥ 最大水深：30m（撤去装置本体）

水中構造物と爪先との摩擦係数( $\mu$ )は、旧型の実績

データより0.5とする。

- ・摩擦係数： $\mu=0.5$
- ・アームの本数： $n=4$ 本
- ・水中構造物重量： $W=687$  kN
- ・所要水平方向掴み力： $N \geq W/(n \times \mu) = 343.5$  kN

(2) 構造と全体配置

撤去装置は、電動油圧方式により左右2本ずつ、合計4本の挟み爪用アームを開閉することにより、方塊ブロックを掴む装置である。

本装置は撤去装置本体、ケーブルリール、ケーブル、ガイドシーブ、制御盤・操作盤より構成されており、油圧装置は、撤去装置本体フレーム内に設置されている。また、全体配置図を図-1に示す。

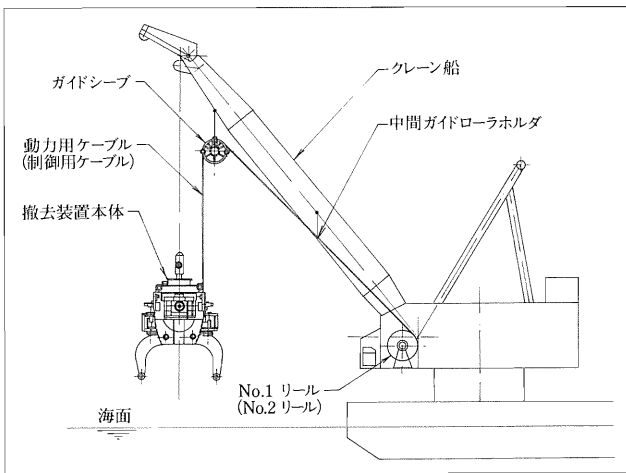


図-1 全体配置図

(3) 特徴

水中構造物撤去装置としては、国内最大級の能力を持つ撤去装置の主な特徴を以下に示す。

(a) 引きずり出し機能

旧型の撤去装置を使用した撤去作業で、方塊ブロックの周囲に障害物があると、方塊に爪をかけるために長時間要したため、新型では2本の爪を使って方塊を障害物がない場所まで引きずり出す機能を備えた。

これは、構造物を掴んだまま旋回できる機能や各爪左右一対ずつの単独制御により実現したものである。

(b) 監視システム

視界の悪い海底においても、作業効率の向上が図られるように、撤去装置本体下側にソナー1台と水中監視カメラ2台（広角、ズーム）を同時に使用できるように装備されている。

(c) メンテナンス性向上

撤去装置本体側との動力用・制御用ケーブルの接続は、コネクタ方式で切離し容易な構造となっており、

メンテナンス性に配慮されている。

(d) 機能性及び作業性向上

挟み爪の最大開き幅は4mとなっており、旧型が隣接するブロックが邪魔で爪が挿入できなかった教訓を生かし、狭い空間に爪を挿入できるように、爪を開いたとき爪がほぼ垂直下向きとなるような機構となっている。

また、挟み爪の先端部は、掴む対象物に順応するため、歯車型の固定式及びチルティングパッド式の2種類の先端金物を交換できる構造となっている。

(4) 主要仕様

主な仕様を表-1に、全体組立て図を図-2に示す。

表-1 撤去装置の主要仕様

| 項目     | 仕様                                    |
|--------|---------------------------------------|
| 装置型式   | 電動油圧方式                                |
| 対象物    | コンクリート (幅3m)                          |
| 能力     | 70 t (最大吊重量60 t, 地切り力10 t)            |
| 自重     | 60 t (撤去装置本体 (作動油含む))                 |
| 油圧ユニット | 本体内置型                                 |
| 作動油量   | 約2,500 L                              |
| 電動機    | 挟み爪アーム開閉用: 37 kW×2<br>旋回装置用: 2.2 kW×1 |
| 最高使用圧力 | 21 MPa                                |
| 開閉時間   | 開: 約20秒, 閉: 約40秒                      |
| 旋回角度   | ±90° (旋回速度: 1 rpm)                    |
| 最大使用深度 | 水深30 m (撤去装置本体)                       |

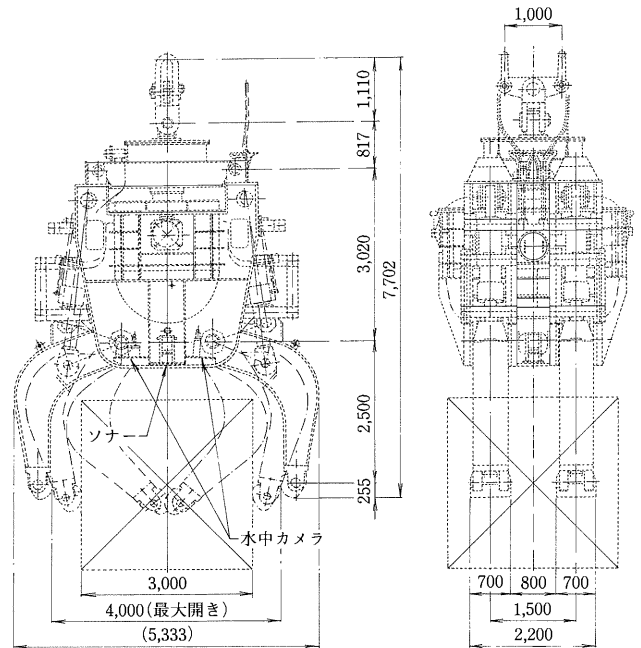


図-2 全体組立て図

3. 撤去装置の機構及び動作

(1) 挟み爪用アーム開閉

挟み爪用アームは、相対する2面を挟めるように本

体フレームの両側に左右対称に2本ずつ取付けられており、ヒンジにより可動する構造となっている。

(2) 旋回駆動方式

対象ブロックを吊った状態で、左右に90度、合計180度まで旋回可能な構造となっている。

旋回フレーム頂部に旋回軸受を設け、旋回軸を挟んだ2本のシリンダのロッドを伸縮させ、チェーンを押下げることにより旋回させる方式をとっている。

旋回駆動方式も歯車、ラック & ピニオン、ウォーム等いろいろ検討されたが、構造が簡単でメンテナンスが容易、という理由により、上記の方式に決定した。

なお、旋回装置はチェーンの錆びによる固着を防止するため、密閉式となっている。

(3) 油圧駆動方式

撤去装置は電動油圧駆動により、アームの開閉、旋回動作を行っており、常用圧力(最大油圧力)はそれぞれ21MPa、14MPaとなっている。

(a) 油圧系統

駆動方法は対向する挟み爪用アーム2本を一組とし、一組ずつ制御できるようになっていて、1台のバルブで開閉操作するが、同期回路は設けていない。

対象ブロックを掴んだ状態では、油圧ポンプから油圧シリンダへ圧力がかかる状態とすることにより、落下を防止している。

(b) 油圧ポンプ

爪が駆動する油圧ポンプは可変吐出型ポンプとし、爪が対象物に接触するまでは低圧で大吐出、爪が対象物を掴むと最大出力で最小吐出となるよう制御し運転効率を上げ、油圧回路の発熱を抑えている。

また、対象物を吊上げたとき、停電等により油圧ポンプが停止した場合、対象物を安全な位置へ移動するまでの間、掴み力を保つためのアキュムレータを装備している。

(c) 油圧タンク

油圧装置の油タンクは撤去装置本体フレーム内部に設けられており、撤去装置本体を横倒ししても、油漏れが起きない構造となっている。

(4) 遠隔操作

撤去装置の挟み爪の開閉、旋回動作及びケーブルリールは、屋内設置型及び移動式の操作盤より遠隔操作ができる。

また、監視機器の動作も操作盤により遠隔操作が可能で、モニターで監視できる。

(a) タッチパネル操作盤

遠隔操作盤(写真-2)はタッチパネル及びレバーで操作が行えるようになっていて、メイン画面より、ポンプ起動画面、運転状態表示画面、警報表示画面、メンテナンス画面、モニタ画面へ、操作状況によりそれぞれ切替えられるようになっている。



写真-2 遠隔操作盤

例えば、運転状態表示画面(図-3)は、各アーム開度、旋回角度、アーム圧力等の運転状態が一目で判断できるようになっている。これにより、目視のできない場所でのアームの微調整や状態を変化させて撤去作業をすることが容易にできるシステムが構築されており、安全性、操作性が著しく向上している。

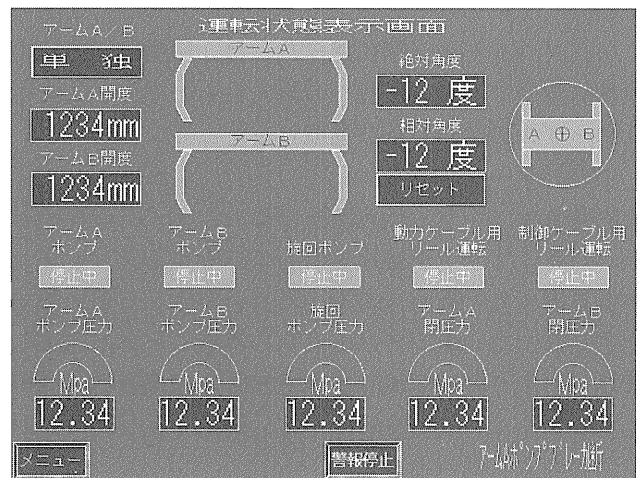


図-3 運転状態表示画面

(5) 水中監視システム

作業の経過とともに撤去作業深度も深くなり視界が悪くなっていき、水中監視の役割が大きくなる。そこで撤去装置本体下側にソナーと水中カメラを搭載し、水中での作業の効率化を支援している。

(a) 計測システム(ソナー)

海中にある方塊ブロック等の構造物の高さや大きさ

をソナーで計測し、パソコン上で鳥瞰図で確認することができ、撤去の立案や作業に大きく貢献できるシステムになっている。

これは、ソナー位置と撤去装置本体中心との相対座標でモニタ及び図の出力を行っている。

また、データを工事毎に設定、保存することが可能であり、作業管理が容易に行える。

#### (b) 水中監視カメラシステム

本システム（図-4）は、作業現場の海水中において、それぞれ性能の異なる2台の監視カメラにて広視野とズームを同時に撮影できる。

2台のカメラで撮影された映像は液晶モニタにて二分割映像で監視可能であり、さらに監視しながら、それぞれの映像はVTRで録画することもできる。

撤去すべき構造物とそれを掴むアームの動きを同時に確認しながら操作でき、従来の位置確認や形状確認のみであったのに対して、大きく機能アップしている。

#### (6) 動力制御の伝達方法

##### (a) ケーブルリール

ケーブルリール（制御盤含む）は、電動油圧方式の屋外防水型で、撤去装置への電力供給と操作制御を行うケーブルの送出し及び巻取りを行っている。

##### (b) ケーブル捌き

旧型では、切断や絡み防止のため、オートテンション、スリッピング機構を有しているが、テンションが効き過ぎて、旋回作業上、不具合が生じるケースが発生したため、新型ではそれらの機能に加え、送出し機能、巻取り機能が遠隔操作でできる構造とし、いつでもテンション機能を解除して、送出し及び巻取りが自由にできる構造とした。

#### 4. 新旧の撤去装置

旧型の撤去装置は、数々の模型実験や実機による海上実験を行い、安全で効率よく撤去できる装置を開発したが、実際に第三海堡の撤去作業を行ってみると、ある条件下では作業上いくつかの問題点が発生している。

しかし、実作業上、旧型は基本的な機構等は特に支

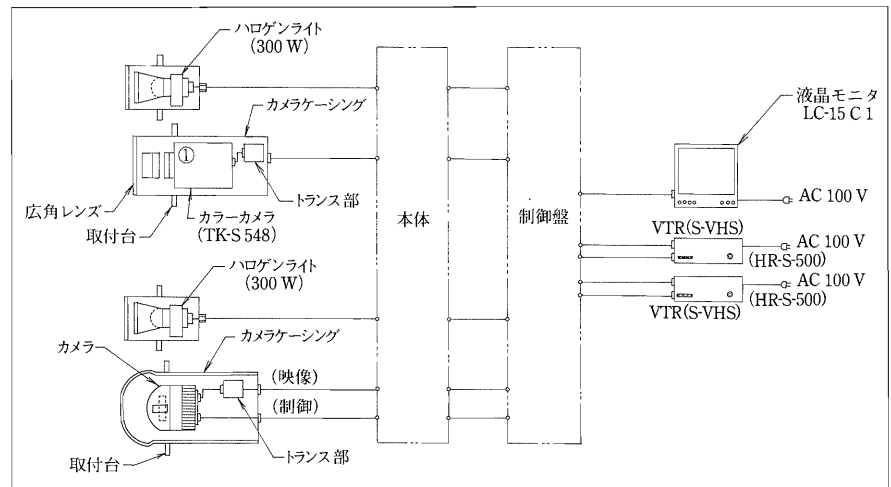


図-4 水中監視カメラシステム系統図

障がないため、新型の撤去装置は、旧型の改良型として製作された。

また、旧型で発生した個々の問題点は全てクリアされた撤去装置となっている。

現在、実海域で新型の撤去装置が活躍しているが、作業性や操作性の面で使い勝手が非常に良いと聞いている。

#### 5. 遠隔操作型把持システムの開発

独立行政法人港湾空港技術研究所では、バイラテラル制御を用いてブロックを掴んだ時の反力のオペレータへの提示やグラブとブロックとの位置関係及び掴んだ時の反力情報をCGで描画するなど、オーグメンティドリアリティ（augmented reality）を視覚の補助として用いる遠隔操作型把持システムを開発しており、将来は第三海堡の撤去工事などに活用することが期待される。

一般に、水中構造物やブロックの撤去及び移設は、クレーン船と潜水士の誘導、玉掛けより実施されているが、安全性向上のために機械化を図ることが必要となっている。しかしながら、濁りなどの影響で水中では視覚情報が乏しく、水中カメラの情報だけでは、つかみ位置や吊下げ構造物の重心位置などの確認は困難である。そこで、当所では、視覚情報を別の情報で補完し、操縦者に対して対象物の把持や、物体との接触、対象物の位置、形状、重心といった作業状況を提示する手法を考案し、実験を行っている。

本研究では、港湾工事での把持作業において汎用性が高いと考えられるバックホウアタッチメント型把持装置とグラブ型把持装置を開発の対象としている。遠隔把持システムの全体的なイメージを図-5に示す。

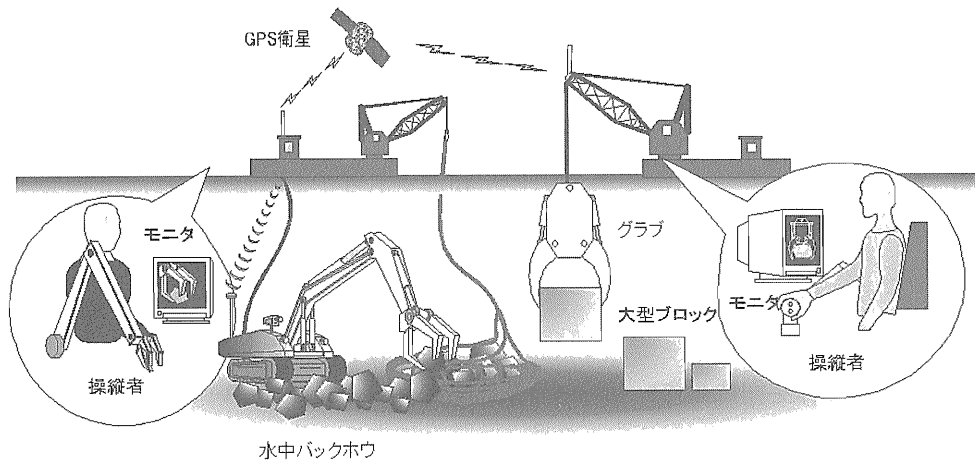


図-5 遠隔操作把持装置のイメージ

(1) バックホウアタッチメント型把持システム

水中バックホウのアタッチメントを想定した把持装置模型を開発した。これは、ロボットアームに近い機能を有するもので、図-6に示すように、把持装置(スレーブ)、操作装置(マスタ)と仮想画像提示モニターからなる。操作装置と把持装置は相似形の構造であり、把持装置は操作装置(操作者)の動作に追従して動作する、位置指令-位置帰還バイラテラル制御を用いている。

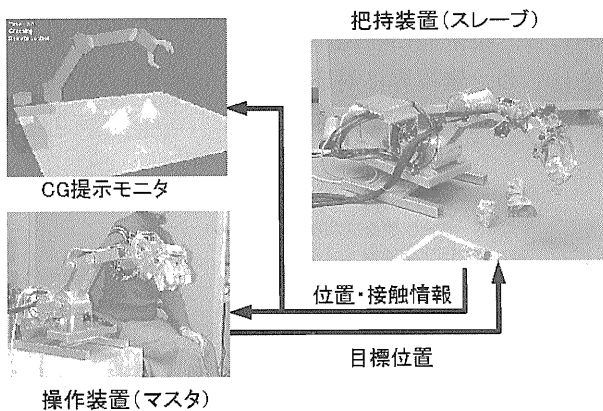


図-6 把持システムの構成

また、把持装置が物を掴むときの感覚を操作装置のモータを介して操作者に伝達することにより、操作者は自分の手で行う場合に近い感覚で作業が可能となる。さらに、視覚情報を補完する情報として、把持装置と把持対象物や地形の状態を操作者にCGとしてモニター提示するシステムを開発した。

モニターには把持装置から取得した関節角を元に把持装置のCG画像や触像の視覚化を行うための平面を描画する。操作者はこのモニターを見ながら円滑に操作を行うことができる。

表示方法は、把持装置が接触するたびに、接触点の高さ情報からフィールド(地形)の高さを更新し、実

際の地形の様子を表していくもので、ある程度、地形の様子が理解できたら、この触像をもとに把持を行う。この時、掴み装置の指に作用する反力の大きさによってCG上の指の色を赤に変化させており、把持状況の確認を容易にしている。

本装置を用いて、把持対象物が目視できる場合と仮想画面のみの場合について作業実験を行った結果、作業に要する時間は増加するものの、本システムを用いた作業が可能であることを実証することができた。

図-7に操作装置による把持作業の様子を示す。

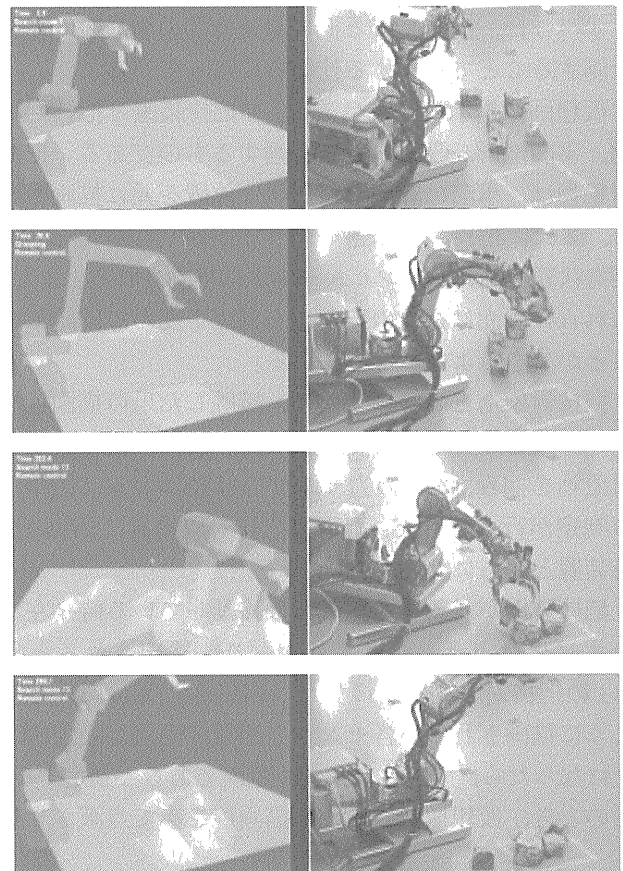


図-7 把持作業実験の様子

## (2) グラブ型把持システム

東京湾第三海堡撤去工事をはじめとするグラブ型把持装置へ本システムを適用するため、油圧駆動のグラブ型把持装置模型を開発し実験を行っている。

実験模型は、図-8に示すように、

- ・グラブ型把持装置模型、
- ・クレーン装置、
- ・操作装置、
- ・仮想画像提示モニタ、

で構成されている。また、物体を把持している時に発生したすべりを検出するため、本体の左右にすべり検出センサが取付けられている。

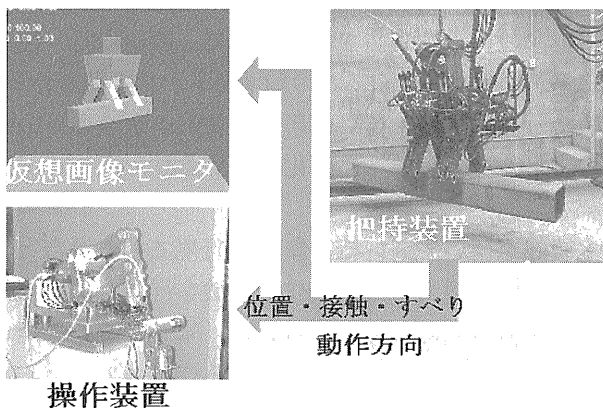


図-8 グラブ型把持システムの構成

すべりは、把持装置と把持対象物間の距離の変化を計測することで検出する仕組みになっている。

仮想画像提示モニタは、CGで把持装置と把持対象物、平面地形、設置領域を描画するものである。把持対象物は、事前に計測した形状と位置を元に描画される。また、把持装置は各センサで取得した情報を基に姿勢状態を計算しコンピュータ上に描画される。また、これらの画面は種々の方向から視点を変えて確認することができるようになっている。

把持対象物との接触時には、接触した爪の描画色を反力の大きさに応じて変化させる。また、把持装置が対象物を掴み、4つの力センサの接触による“把持”の判定が行われると、CGの把持対象物も、CGの把持装置とともに移動する。

把持装置が対象物を掴みあげ移動している時、左右のすべり検出センサによりすべりが検出されると、CGの把持対象物もその分だけ移動もしくは傾斜したように描画される。各センサの距離の変化が設定値以上になったら、すべりが大きく危険であると判定する。このとき、仮想把持対象物の描画色を赤で点滅させる

ことにより、操縦者に危険を知らせるシステムになっている。

把持対象物を掴みあげ、別の場所に移す実験を行った結果、仮想画像の支援により把持作業を行うことが可能であることが確認された。

## 6. おわりに

第三海堡の撤去作業は、益々厳しい条件の中での結果を求められてきているが、新型の掴み機を投入することにより、その機能性を十分に発揮し、より安全で効率のよい撤去作業ができることを期待している。

また、本研究では、濁りのある水中において、目視やTV画像といった視覚を用いない把持作業を想定して、オーグメンティドリアリティを活用したバックホウのアタッチメントとグラブ型の把持システムの遠隔操作手法を開発している。これまでの実験により、実際に視覚を用いなくとも把持作業が可能であることが明らかとなった。

今後、本把持システムを実用化するには、防水型装置の開発など、実際の作業に近い状態で実験を行い、より細部の条件を詰めるとともに、全体システムについても詳細な検討、実験を行うことが必要である。将来的には、東京湾口航路事業における第三海堡撤去工事を始め、難視界に対応した水中遠隔操作把持システムが実用化すると考えられる。

JCM/A

### 【筆者紹介】

竹田 康雄 (たけだ やすお)  
国土交通省  
関東地方整備局  
横浜港湾空港技術調査事務所  
前任建設管理官



酒井 浩 (さかい ひろし)  
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



内海 真 (うつみ まこと)  
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  
特別研究員

