

半自律型水中ビークルによる 係留装置の模擬点検作業試験

TANK TEST OF MIMIC MAINTENANCE EXAMINATION FOR MOORING FACILITY BY USING SEMI-AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE

田中敏成¹・吉江宗生²・小野寺美昭³
Toshinari TANAKA, Muneo YOSHIE and Yoshiaki ONODERA

- ¹工修 (独) 湾空港技術研究所 施工・制御技術部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)
²正会員 工修 (独) 湾空港技術研究所 施工・制御技術部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)
³東北地方整備局 酒田港湾事務所 (〒998-0061 酒田市光ヶ丘5-20-17)
(前 東北地方整備局 仙台港湾空港技術調査事務所)

ROVs are often used to underwater observation and research mission. However, the operation of conventional ROVs under disturbances such as wave and current conditions are often problem. If the target object is moving by disturbances, the operation will not be able to continue. Therefore, we are aiming at realization of smart and secure in situ operations onboard. Especially, objective of our project is maintenance examination for swinging mooring facility of GPS buoys by our developed underwater vehicle. The buoys were deployed for survey hydrographic phenomena. Our key methods for semi-autonomous underwater vehicle are optical navigation and smart operational interface. In this paper, mimic mission of maintenance examination for the mooring facility in large tank was mainly described. The mimic mission was carried out by using developed tank test model with image measurement system.

Key Words : *Semi-autonomous underwater vehicle, optical navigation, Image measurement system, GPS wave height meter, mimic maintenance examination for mooring facility*

1. はじめに

国土交通省により日本各地に整備が進められている GPS 波浪計は 2008 年 7 月より順次本格運用が開始されている。それらの安全かつ確実な運用のためには装置の点検作業は不可欠であり、既に計測器類の点検は定期的実施されている。一方、係留装置の健全度については、設置からの経過期間や設計余裕の観点から現段階では特段の点検は実施されていない。しかしながら、中長期にわたる運用においては係留装置についても相応の経年変化が想定されることから、その損耗量が常に許容範囲にあることを把握しておく必要がある。図-1 に本格運用が開始された岩手県南部沖 GPS 波浪計を示す。

一般的な灯浮標などの係留装置の点検作業では、潜水士による直接寸法計測や陸揚げによる点検作業が実施されている。しかしながら、GPS 波浪計においては設置海域の厳しい海象条件から人力による潜水作業は容易でなく、また設置された浮体や係留装置の規模から陸揚げによる点検作業も現実的ではない。一方、人力に拠らない手法としては ROV 等の水中機器を利用した点検作業が考えられるが、波浪や

潮流などの外乱条件下で対象物や自身が不安定な状態である場合、一般的な小型 ROV では操作や作業を安全に継続することが困難なケースが想定される。また、通常これらの ROV は原位置で得られる情報のみから点検対象物の寸法を計測・推定する機能を具備していない。

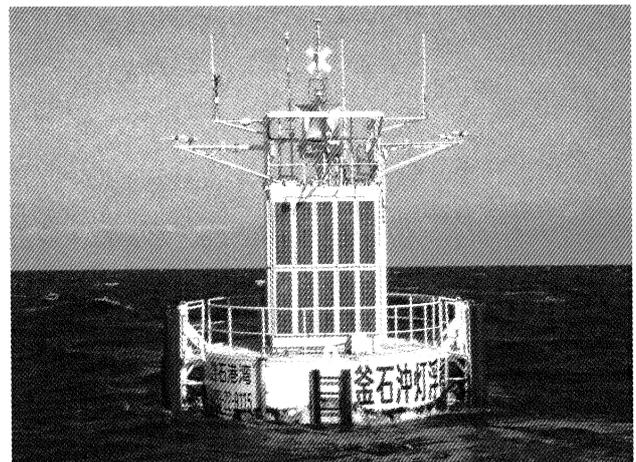


図-1 岩手県南部沖に設置された GPS 波浪計

そこで本研究開発では、浮体が設置されている原位置において水中部無人でその係留装置の点検作業を実施する点検システムを提案するものである。本点検システムは遠隔操作を補助する自律機能を有する半自律型水中ビークルをその核とするものであり、前述のような外乱条件下であっても母船上からの簡便な操作のみで水中での点検対象物の捕捉から寸法計測までの一連の作業を安全かつ確実に実施することを目指すものである。ここでの自律機能としては深度保持や方位保持に加え、自身が水中で取得する点検対象物のリアルタイム画像に基づく光学誘導機能を具備し、この自律制御と遠隔操作を複合した操作インタフェースによって点検対象物の捕捉と追尾にかかる煩雑な操作の軽減を図るものである。同時に、取得画像を利用した点検対象物の画像計測機能の導入により、一連の点検作業を水中部無人で実現しようとするものである。なお、筆者を含む研究グループではこれまでも水中画像を積極的に利用した ROV のオペレーションに関する研究開発を実施してきた^{1) 2)}。

本稿では、遠隔操作と自律制御を複合した操作インタフェースを有する半自律型水中ビークルからなる点検システムの水槽試験機について報告するとともに、本試験機による係留装置の模擬点検作業試験について報告する。模擬点検作業試験では水槽内での係留装置の捕捉からその寸法計測までの一連の作業を実施するとともに、外乱条件下における係留装置の捕捉試験を実施した。

2. 水槽試験機

水槽試験機的主要システム構成は、水中で点検作業を行う「水中ビークル」、取得画像からターゲットを捕捉しその位置を算出する「画像処理用 PC」、遠隔操作と自律制御の重ね合わせを行う「制御用 PC」で構成されている。図-2 に水槽試験機のシステム構成を示す。

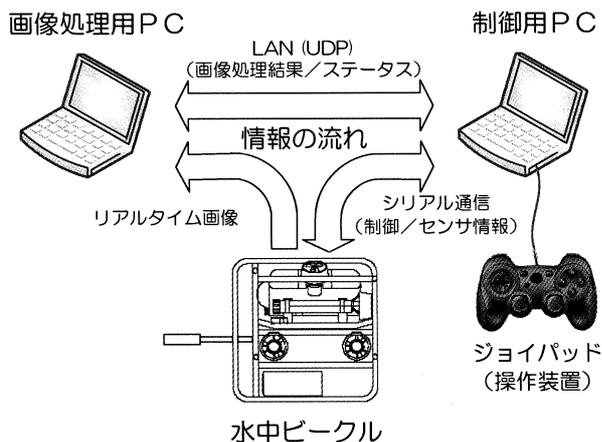


図-2 水槽試験機のシステム構成

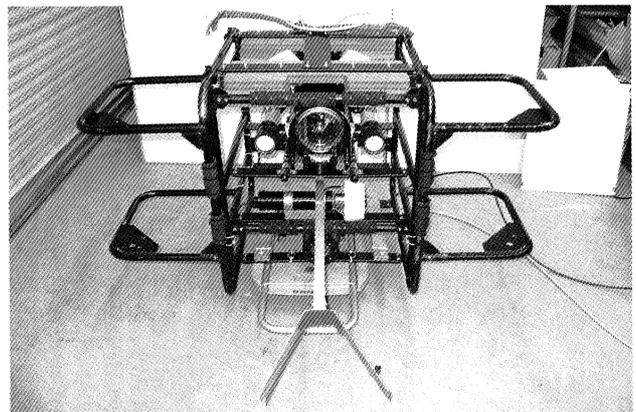
「水中ビークル」部は市販の小型 ROV をベースとし、その操作系に「制御用 PC」を割り込ませる形で種々の拡張機能を実現している（詳細後述）。また、「画像処理用 PC」は「水中ビークル」から送られてくる画像を逐次処理し、その処理結果のみを「制御用 PC」に渡している。このことにより、大きな計算負荷である画像処理が、制御のリアルタイム性に影響することはない。

(1) 水中ビークル

水中ビークル部は、市販の小型 ROV に艀装を施すことで構成されている。ベースとした ROV は前方カメラと、水平スラスト 2 基、斜めに配した垂直スラスト 2 基を有する 4 自由度（前後、左右、旋回、上下）の ROV である。なお、本機は前方カメラ方向への移動を主としていることから、横移動は斜めに配した垂直スラストの差動により限定的な推力を確保したものであった。

ここでは任意方向の並進運動性能の向上のために独立したサイドスラスト 2 基を増設するとともに、前方カメラとは独立の画像処理専用のカメラを増設した。また、さすまた状の固定アームを装備し、これを点検対象物に押し当てて利用することで、撮影距離を一定に保つこととした。

図-3 に水槽試験機の水中ビークル部を示す。



a) 正面



b) 側面

図-3 固定アームを装備した水槽試験機の水中ビークル部

(2) 制御用 PC

制御用 PC 上では周辺装置との通信制御と水中ビークル自体の自律制御を司るソフトウェアを導入している。ここでの通信制御とは、水中ビークルからのセンサ情報、画像処理 PC からの対象物の位置情報等の受信、および水中ビークルへの操作指令の送信などである。

一方、自律制御は水中ビークルの水深計と磁気方位計に基づく深度制御と方位制御、画像処理 PC からの対象物の位置情報に基づく捕捉と追尾機能である。この自動追尾機能は主に水中ビークルのヨー制御により実現される。

図-4 に補償器を含むヨー運動の制御系を示す。

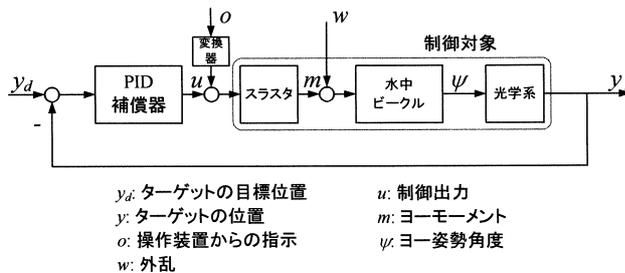


図-4 ビジュアルフィードバック（ヨー制御）による対象物の自動追尾

ここでの制御手法は、現在値のフィードバックを受けて目標値に達するよう制御する比例制御に加えて、定常偏差を軽減する積分制御、予測的な動作が期待できる微分制御を加えた PID 補償器を適用した。比例制御だけの場合では、定常偏差と応答性を改善するためには比例ゲインを上げざるを得ないが、その増大は質量を無視できない系では振動や発散の要因となってしまうためである。ただし、水槽試験においては定常偏差の要因となる定常的な外力が存在しないことから、積分ゲインを 0 とした。その結果、ここでの PID 補償器は次式で示す PD 補償器と等価となっている。

$$u(t) = K_p \{y_d(t) - y(t)\} + K_D \{\dot{y}_d(t) - \dot{y}(t)\}, \quad (1)$$

t : 時刻
 u : 制御出力
 y_d : 目標値
 y : 現在値
 K_p : 比例ゲイン
 K_D : 微分ゲイン

また、水中ビークルの運動状態をオペレータに提示するナビゲーション画面を用意した。ここで提示される運動状態は、磁気方位計、ジャイロ、加速度計などのセンサ情報と推定値を利用して描画されるものである。なお、現状で搭載されているセンサ情報のみでは位置の累積誤差をキャンセルできないことから、測位用途には用いていない。

図-5 に制御用 PC ソフトウェアの実行画面を示す。

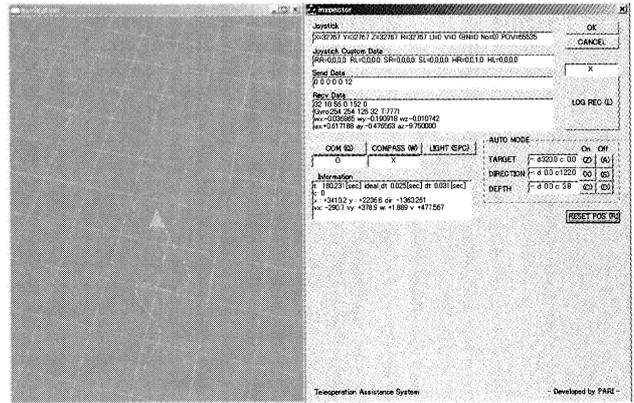


図-5 制御用 PC ソフトウェア

(3) 画像処理用 PC

画像処理用 PC は、取得した画像を逐次表示すると同時に、画像を解析して点検対象物を抽出し、その画面内での位置情報を算出してそれを制御用 PC へ送信することが主な役割である。

対象物の抽出方法として、色情報を利用する方法と、輪郭情報を利用する方法の 2 種類を導入した。色情報を利用する方法では照度変化を考慮して色相情報を利用して対象を認識するものであり、距離変化による色情報の変化が少ない用途に適用可能である。一方、輪郭情報を利用する方法では画像中で対象物のコントラストが設定した閾値以上に確保されている限りにおいて、色情報の変化の影響をほとんど受けることなく、対象物を認識可能である。そこで次章以降に示す試験では、全て輪郭情報を利用して対象物の認識を試みた。なお、ここでのアプリケーションは Microsoft Visual C++ 上から MVTEC HALCON の画像処理ライブラリを利用して構築した。

なお、ソフトウェアのダイアログ上には画像の記録ボタンを配置し、これを押下することで日付と時刻のファイル名を付けた画像ファイルを記録する。画像計測はオフラインでこの画像を利用して行う。

図-6 に対象物を認識中の画像処理用 PC ソフトウェアの実行画面を示す。

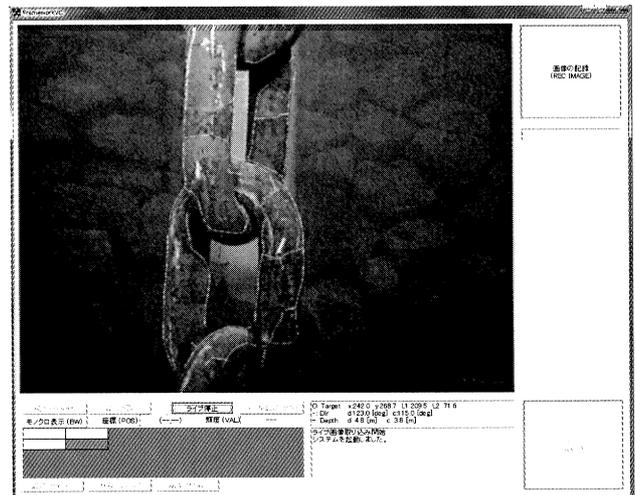


図-6 画像処理用 PC ソフトウェア

画像中の細かな縁取りラインがブロー解析によって抽出された局所的な輪郭情報である。これら各々の輪郭情報だけでは対象物の位置を正確に示せないことから、これらの集合を1つの領域として取り扱うことで対象物の認識を試みた。自動捕捉や追尾の際はこの領域の重心位置を常に撮影画像の中心に来るように水中ビークルのヨー運動を制御することとした。

(4) 光学系のキャリブレーション

水槽試験機に搭載された画像処理専用のカメラは640×480画素のUSBカメラである。ここではまず、このUSBカメラの気中および水中におけるキャリブレーション試験を実施し、「撮影距離 L 」,「撮影画素数 N 」,「実寸 D 」の関連付けを行った。具体的には、撮影距離200mmから1000mmの間で50mmごとに直径100mmの円を撮影してその直径に相当する画素数から1mm相当の画素数を算出し、その逆数と「撮影距離」の1次の比例関係を利用して最小二乗近似によりパラメータを推定した。

図-7に水槽試験機の画像処理専用カメラの水中キャリブレーションの実施状況を示し、その際に計測された実測値を図-8に示す。

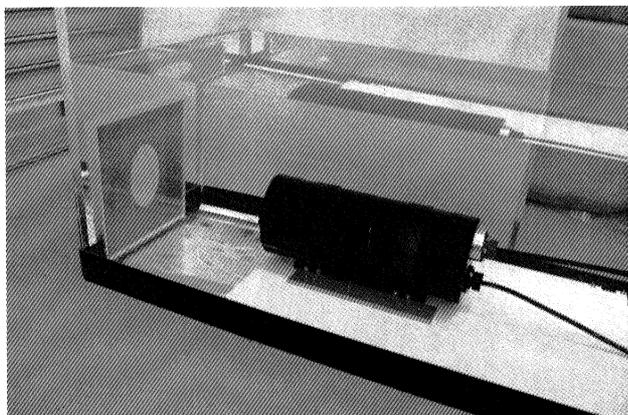


図-7 水槽試験機の画像処理専用カメラにおける光学系の水中心キャリブレーション試験

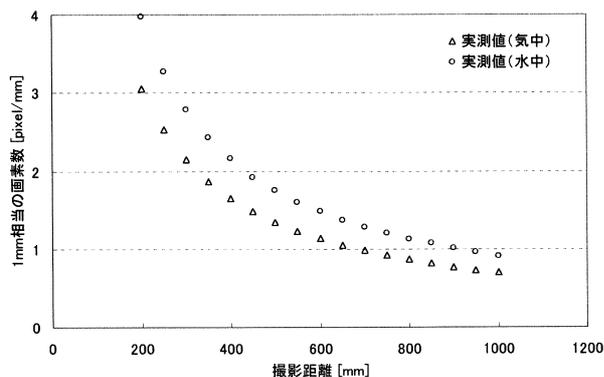


図-8 実寸1mmに対応する撮影画素と撮影距離の関係

「撮影画素数」の逆数と「撮影距離」は1次の比例関係となることから、これらに対して最小二乗近似を適用すると、気中、水中のそれぞれの関係は図-9および式(2), (3)に示す関係となった。ここで求められた a , b は最小二乗近似でもとめられたパラメータであり、点検対象物の画像計測に際しては式(3)を利用して実寸を推定する。

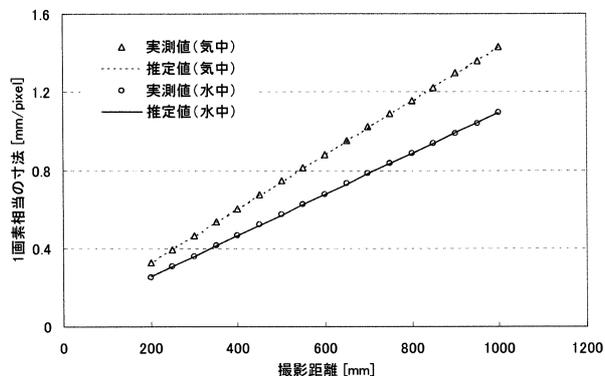


図-9 気中と水中における画像処理専用カメラの最小二乗近似によるパラメータ推定

$$\frac{1}{N_{D=1\text{mm}}} = aL + b \text{ [mm/pixel]} \quad (2)$$

$$D = N \cdot (aL + b) \text{ [mm]} \quad (3)$$

$$\begin{cases} a_{\text{air}} = 1.381224 \times 10^{-3} \\ b_{\text{air}} = 5.1780325 \times 10^{-2} \end{cases} \begin{cases} a_{\text{water}} = 1.049454 \times 10^{-3} \\ b_{\text{water}} = 4.5130513 \times 10^{-2} \end{cases}$$

3. 水槽試験

これまでに示したシステムを利用して、浮体模型による模擬点検作業試験を当研究所の水中作業環境再現水槽で実施した(全長30m×幅10m×水深6m)。浮体模型は、市販のフロートからなる浮体部、規格チェーン二種類(線径50mmおよび40mm)とシャックル一種類からなる索で構成されており、鎖の線径は実物の約1/2に相当するものである。なお、この模擬点検作業試験における点検対象物は、これらの二種類に規格チェーンのリンク部の寸法である。

図-10に係留装置を有する浮体模型を示す。

ここでは、「点検対象物(索)の認識と捕捉による遠隔操作補助」,「索の画像撮影」,「画像計測による索の実寸推定」までの一連の作業を模擬点検作業試験として実施するとともに、造波による外乱条件下における対象物の捕捉試験を実施した。

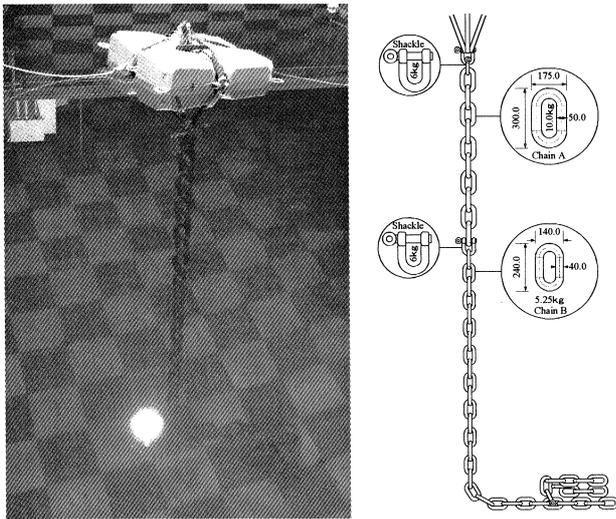
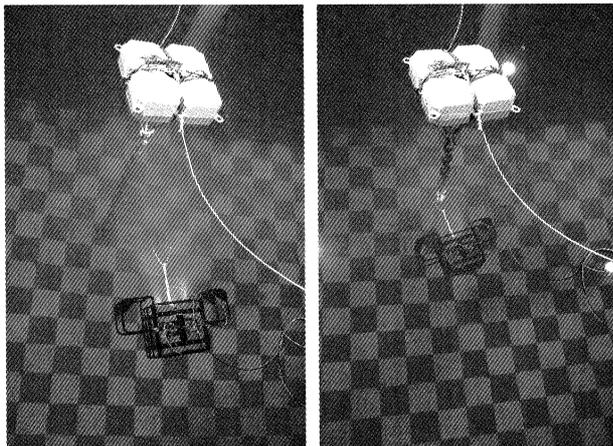


図-10 模擬点検作業実験に用いた浮体模型

(1) 模擬点検作業試験

水中作業環境再現水槽において、「索の認識と捕捉による遠隔操作補助」, 「索の画像撮影」, 「画像計測による索の実寸推定」までの一連の点検作業を想定した模擬点検作業を実施した。実験時の水深は6.0mである。

図-11 に点検対象物の認識と捕捉しながら対象物に接近してゆく水中ビークルの様子を示す。



a) 接近中の様子 b) 計測用画像撮影中

図-11 対象物の自動捕捉機能を利用した索への接近と撮影

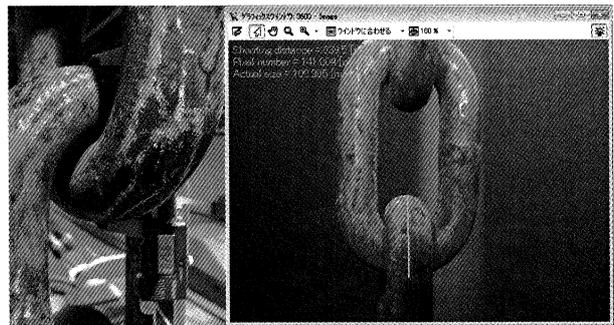
水中ビークルはターゲットである点検対象物を認識すると、前章で述べたようにそれを画像の中心で捕らえ続けるようヨー運動の自律制御を開始する。このヨー運動の制御量は操作装置からの遠隔操作量との重ね合わせで生成される。このため、自律制御中であってもオペレータの操作は一定量反映可能であり、非常時にはオペレータの判断で緊急回避等の操作が可能である。

水中ビークルが点検対象物に到達した後は、微小な推力でアームの先端を点検対象物に押し当て続け、

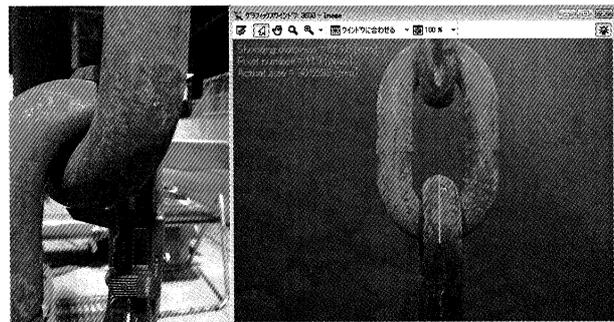
この間の点検対象物とカメラ間の距離は一定のため、ここで寸法計測用の画像を撮影し記録した。その後、ここで撮影した画像をオフラインで利用し、画像計測アプリケーション上で画素数をカウントして式(3)の推定式に代入することで点検対象物の実寸を推定した。

本手法で推定を試みた結果、誤差はリンク大部で+1.715mm, リンク小部で-0.0308mmであった。今回、画像計測等の画像処理専用カメラとして適用したUSBカメラの解像度(640×480)と対象物の大きさを考慮すれば十分な精度を有していると判断できる。

図-12にリンク大とリンク小それぞれの実寸を取得画像から推定した結果を示す。



a) 実寸法: 99.28[mm] (リンク大50mm×2の代表位置)
推定値: 100.995[mm] (撮影距離: 639.5[mm])



b) 実寸法: 80.59mm (リンク小40mm×2の代表位置)
推定値: 80.5592mm (撮影距離: 624.5mm)

図-12 画像計測による実寸法の推定結果

(2) 外乱条件下における対象物の捕捉試験

水中作業環境再現水槽において、水深6.0m, 周期2.4sec, 波高0.1mの波浪環境下で、対象物の捕捉と自動追尾試験を実施した。実環境で想定される条件(水深200m, 波高1.0m以下, 周期5~8sec程度)と水槽実験の条件が異なることから、水槽実験では浮体と索の運動は総じて水平方向の運動周期が短く動きの激しいものとなった。

図-13に波高0.1m, 周期2.4secの波浪環境下において対象物を捕捉し、索を追尾しながら対象物まで到達する水中ビークルの様子を示す。この結果から、図に示すように外乱環境下であっても対象物を捕捉して追尾し続けて対象物まで到達できることを確認した。

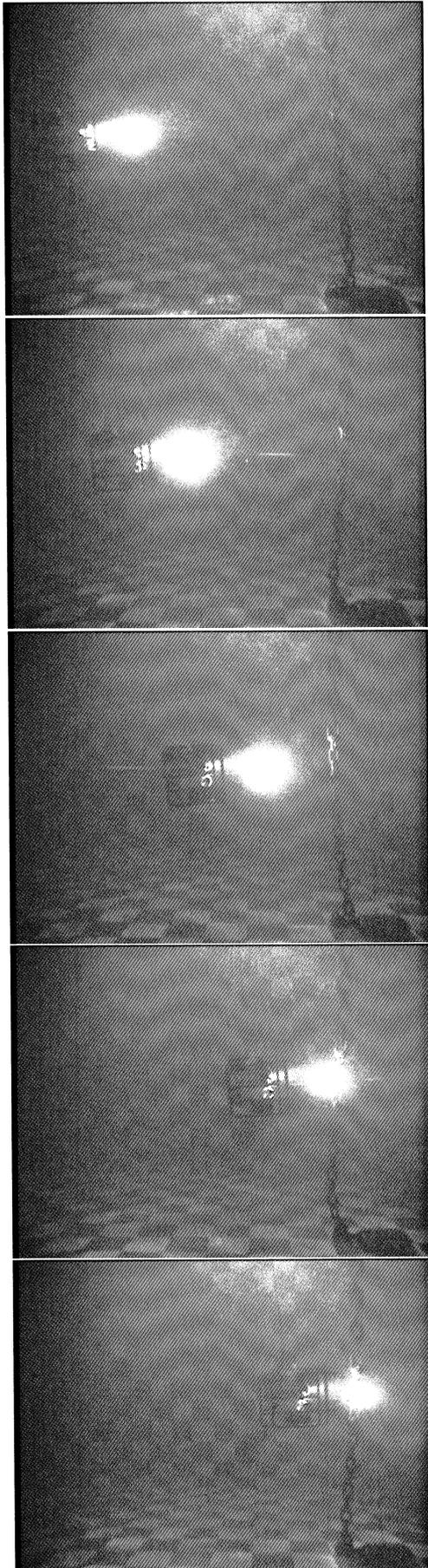


図-13 波浪環境下における対象物の捕捉と水中ビークルの誘導状況

(3) 水中画像を利用した光学誘導の効果

周期約 10sec の対象物の動揺に対して、経過時間約 94sec から光学誘導を開始したところ、その開始前と比較して画面上での対象物の横位置の振れ量が 50%以下にまで減少したことを確認した。

図-14 に光学誘導の開始前と開始後のターゲットの追尾状況を示す。本ケースにおいても対象物を捕捉し続け、固定アームで捉えることができた。

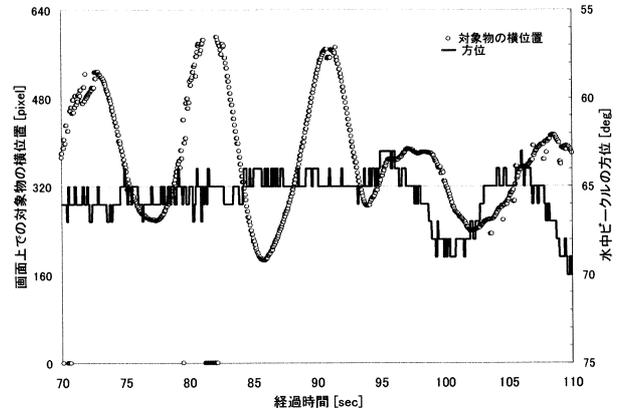


図-14 光学誘導による振れ量の低減効果

4. おわりに

本研究開発は、GPS 波浪計を陸揚げすることなく水中部無人でその係留索の点検作業を実現することを目的としている。本稿では、提案手法の水槽試験機の構成と模擬作業試験の結果について報告した。

本研究で得られた主要な結果を以下に要約する。

- 1) 光学誘導と画像計測機能を有する水槽試験機を構築し、水中での画像計測手法を示した。
- 2) 対象物の認識から対象物の寸法計測までの一連の作業を水槽内で模擬的に再現し、提案手法の妥当性を示した。計測精度はカメラ性能、点検対象物の寸法を勘案すれば十分なものであった。
- 3) 光学誘導による横振れ量の低減により、造波による外乱環境下においても対象物を捕捉可能であり、対象物まで到達できることを示した。

今後は、水槽試験機を利用したソフトウェアの改善作業と平行して実海域試験機の開発に取り組み、現地試験による検証と評価の実施を予定している。

参考文献

- 1) Sakai, H., Tanaka, T., Ohata, S., Ishizuka, M., Ishii, K. and Ura, T.: Applicability and Improvement of Underwater Video Mosaic System Using AUV, *Proceeding of Oceans 2004*, Vol 2, pp 659-664, 2004.
- 2) Sakai, H., Tanaka, T., Ohata, S., Mori, T., Ishii, K. and Ura, T.: Underwater Video Mosaicing Using AUV and Its Application to Vehicle Navigation, *Proceeding of Underwater Technology 2004*, pp 405-410, 2004.