

小型実験船の遠隔操船用周囲監視カメラシステム

小林 充*, 佐藤 圭二*, 仁木 洋一**, 平田 宏一**

Perimeter Surveillance Camera System for Remote Handling of Small Experimental Ship

by

KOBAYASHI Mitsuru*, SATO Keiji*, NIKI Yoichi**
and HIRATA Koichi**

Abstract

Assuming the construction of a system for remotely maneuvering unmanned small vessels, we have built a perimeter surveillance camera system to provide a field of view to the remote operator. The surveillance system was applied to an actual voyage to identify any development issues. The system is equipped with two fisheye cameras to provide an omnidirectional 360° field of view as well as a deep learning-based image detection function for detecting ships, and two cameras that pan, tilt, and zoom to capture detailed images with a narrower field of view.

The ship-side equipment of this system was installed on the small experimental ship "Shinpo" which is managed by the National Maritime Research Institute (NMRI), and the land-side equipment was installed in the remote ship-handling room in Building 5 of the NMRI in Mitaka, Tokyo. The experiment was conducted on remote ship-handling in the surrounding waters of Onomichi, Hiroshima Prefecture via cellular phone lines. After the experiment, we asked the participants for their feedback regarding the system's remaining issues.

This paper describes the configuration of the system on board and ashore, the feedback of the ship-handlers following the remote ship-handling experiment, and prospective solutions and considerations.

* 知識・データシステム系, ** 環境・動力系

原稿受付 令和4年7月22日

審査日 令和4年8月26日

目 次

1. まえがき	24
2. 開発目標	24
3. 設置機材と構成	25
4. 遠隔操船実験と操船者による意見	29
5. まとめ	31
謝 辞	31
References	32

1. まえがき

無人小型船を遠隔操船するためのシステムを構築することを想定して、遠隔操船者に視野を提供するための遠隔操船用周囲監視システムを構築し、実航海に適用することでその開発課題の洗い出しを行った。具体的には、2台の魚眼カメラと2台のパン・チルト・ズーム操作可能なカメラを搭載し、360°全方向視野と狭視野を拡大した詳細画像の提供、また深層学習による船影の検出機能をもたせた。

このシステムの船舶側設備を海上技術安全研究所が管理する小型実験船「神峰」に搭載し、東京都三鷹市の海上技術安全研究所5号館にある遠隔操船ルームに陸上側設備を設置し、携帯電話回線を通じて広島県尾道市の周辺海域を遠隔で操船する実験を行った。実験後に、本システムが解決すべき課題に対する意見を聴取した。

本論文では船上・陸上のシステム構成を説明し、遠隔操船実験を通じた操船者らの意見とそれに対する解決方法と考察を述べる。

2. 開発目標

操船乗組員は身体の感覚器官を通じて常に運航状態と周囲の状況を把握しながら運航している。運航に必要な情報としては次のようなものがある。

- 自船情報
航海情報（自船位置・方位・船速）、機関情報（主機回転数や舵角、異常動作に伴う振動や機械音、臭気）、船体動揺
- 他船・ブイ・障害物情報
位置、形状、他船については方位・船速・船名・形象物
- 気象海象
風向風速、波高波向、遠方の空の状態
- 離接岸作業に関する情報
甲板上・栈橋上の作業状態や音声、栈橋までの距離・速度、栈橋周辺の状況（異物や停泊中船舶など）
- その他周辺状況
甲板上作業員・乗客・貨物の状況、火災・異常警報、汽笛等

遠隔操船の場合はこれらの情報を可能な限り詳細・正確・リアルタイム・わかりやすく遠隔操船者に伝える必要がある。船舶によってそれぞれの情報の重要度は異なるが、本実験船をはじめすべての船舶に共通して安全運航のために重要な情報は自船航海情報と他船情報である。自船航海情報のように計測器で計測できるものや、AIS（Automatic Identification System）のように対象物が情報発信しているものについては、容易にこれらを読み取り遠隔操船者に伝達・表示することができる。しかし、内航船舶5,212隻のうちAIS搭載義務のない499GT以下の船舶は約78%を占める（2021年3月末時点）¹⁾。実験対象である小型実験船は瀬戸内海のなかでも因島の北側と

いう主要航路から外れた海域を航行し、周辺には漁船やプレジャーボート、小型定期旅客船が多く航行しているが、それらには AIS 搭載義務がなく、実際に実験船に AIS 受信器を搭載したがほとんどの周辺他船からは AIS 信号が発信されていないことが判明している。「基本は見張り」といわれているように、他船監視については AIS やレーダーのみならず視覚を駆使して情報収集することは極めて重要である。

そのため上に挙げた運航に必要な情報のうち、他船情報に関して操船者の目にとってかわる視覚的情報を遠隔操船者に提供することを開発目標とし、以下の必要な機能を搭載することとした。

本船は速力が 8knot 程度であり、ほとんどの場合で周辺他船より遅いため、前方視野だけでなく常に後方からの接近船を確認しながら航行する必要がある。そのため、視覚的情報は 360° 全方位視野を確保する。

一方で、周辺他船は主に小型船のためその船影を確認するためには高精細な画像が必要であるが、全方位視野の画像では相対的に画素が荒くなる。そのため、PTZ (Panoramic, Tilt, Zoom: パン, チルト, ズームが制御できる) カメラを装備し、簡易な操作で見たい視野を高精細に拡大することができる必要がある。

航行海域は島に囲まれ、また島には市街地もあるので船体と見分けがつきにくく、全方位画像から小型の他船を視覚的に見つける際に見落としが発生しやすい。そのため、全方位画像については船影やブイを検出する機能をもたせ、検出した船影やブイには画像に枠をつけて操船者が確認しやすいようにする。

画像転送は大きな通信帯域を必要とするため、通信容量の変化に応じて転送する画質を動的に変化させて伝送遅延を防ぐとともに、生命線である操船制御系に影響を与えないようにする。

3. 設置機材と構成

海上技術安全研究所が管理する小型実験船「神峰」の操舵席まわりの手すりに固定する形で、魚眼カメラおよび PTZ カメラを左右舷にそれぞれ 1 台ずつ、総計 4 台を設置した。各カメラの仕様を表 1 に、写真を図 1 に示す。また船上の機器構成と陸上の遠隔操船ルームでの表示とカメラコントロールをあわせた周囲監視カメラシステムの構成を図 2 に示す。

表 1 魚眼カメラ, PTZ カメラの型式, 主な仕様

	魚眼カメラ	PTZ カメラ
メーカー・型番	パナソニック WV-X4571L	ソニー SNC-EP580
画像形状と画素数	円形 直径 2992 pixel	平面 1920×1080 pixel
パン・チルト駆動範囲	なし	パン -170°～+170° チルト -15°～+90°
ズーム比	なし	光学 1～20 倍 (デジタルズームは本件では未使用)
画角	360° 全方位 半球状	水平画角 55.4° (ズームなし) 2.9° (光学 20 倍)
制御・画像取得方法	ONVIF (Open Network Video Interface Forum) 規格準拠 HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) による制御と画像取得	
画像容量	1MB/枚	0.4MB/枚
本件における撮影頻度	2 fps (frame per second)	2 fps



図1 カメラ設置状況 (右舷側. 左舷側も同様)

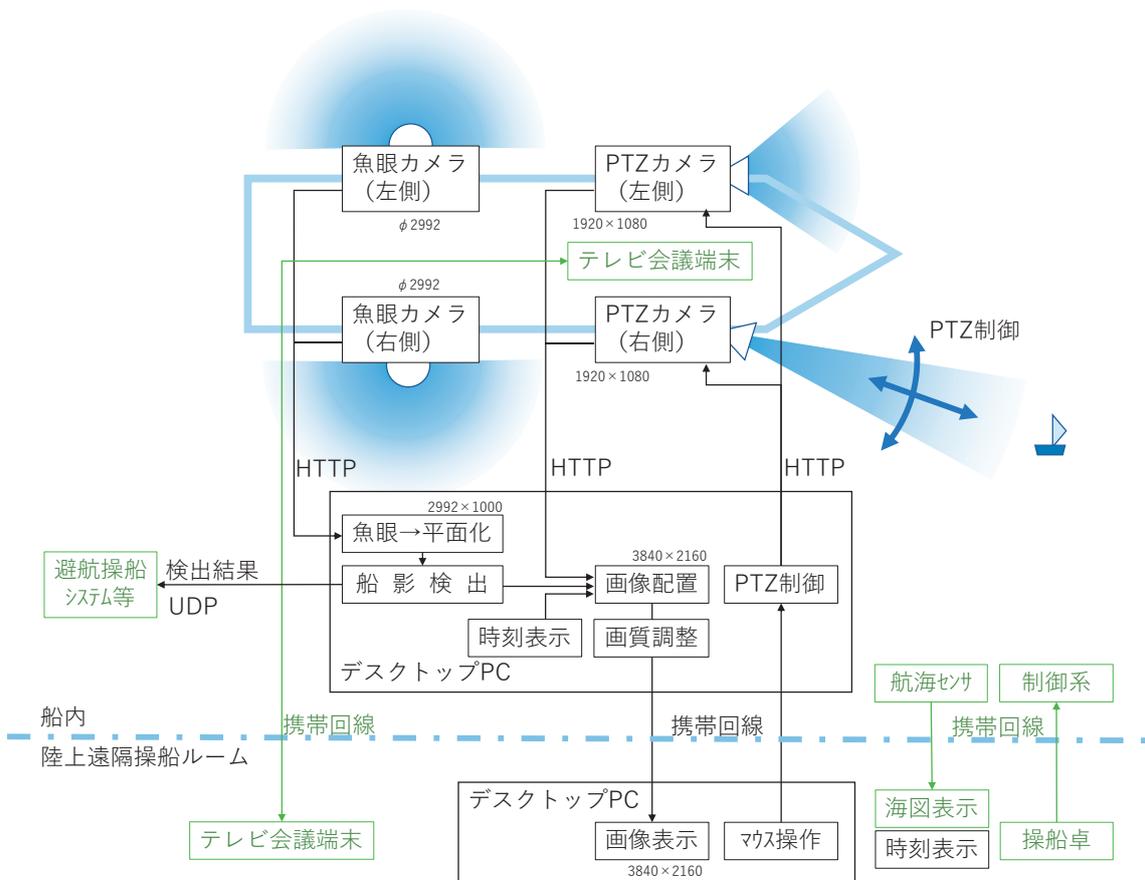


図2 船内および陸上での周囲監視カメラシステム構成
(数字は画像画素数. 緑部分は本稿の所掌外)

1対の魚眼カメラからの静止画魚眼映像(直径2992 pixelの円形画像)はそれぞれ円筒座標系に座標変換することで平面画像(画素数2992×1000 pixel)となり、深層学習(Faster R-CNN²⁾による船影検出を行い検出された船影に枠が描画される。1対のPTZカメラの静止画映像(画素数1920×1080 pixel)、および船上の時刻情報とあわせて1枚の画面表示用画像(画素数3840×2160 pixel)として陸上の遠隔操船ルームに携帯電話回線を通じて転送され、陸上遠隔操船ルームの大型液晶モニタに表示される。陸上では各PTZカメラの上下・左右姿勢角とズーム倍率をコントロールする目的でマウス操作を行い、マウス座標等の情報はそのまま船上のPCに送られ船上でPTZ制御コマンドに変換され、HTTPメッセージによってカメラに送信される。また、陸上での時刻情報を別途表示し、船からの時刻情報と比較することで、通信タイムラグを把握することができる。画像伝送は容量を必要とするため通信回線は操船系とは別回線とし、クリティカルな操船系に影響を発生しないようにするとともに、伝送の画質は通信速度に応じて必要な通信容量を動的に調整することのできる画質調整・通信制御の仕組みを導入した。

陸上の遠隔操船ルームでの遠隔操船実施状況を図3に示す。図中、中央のモニタが本システムである。このうち、カメラ画像を表示するウィンドウを図4に示す。ウィンドウが4分割されており、上の左右の写真がPTZカメラによる画像である。下の左右の写真は魚眼カメラの映像を円筒座標系に投射し平面化し、全方位画像としたものであり、ウィンドウ中央が船舶前方、左右端が船舶後方を表し、2枚の写真で360°の視野を確保している。全方位画像中に深層学習によって検出した船影やブイが赤枠で表示されている。全方位画像またはPTZカメラ画像の一点をクリックすると、対応するPTZカメラがその点を視野中央になるようにパン・チルトを駆動し、またマウスのホイールを回すとズーム倍率が変化する。全方位画像の左右それぞれの画像に黄色の枠として現在のPTZカメラの視野を表示することで、上下のカメラ映像の対応関係が把握できるようにしている。

図3の本システムの画面下方には船舶側すなわち送信元での時刻を表示しており、右側のモニタで別途現在時刻を表示することで、現在表示されている画像が何秒前の状態かを知ることができる。これにより先を予想しつつ操船を行い、また万一通信が途絶して画像送信が停止した場合にそれを知り船上の乗組員に対応を求める。

本稿の所掌外であるが、船陸間を接続するシステムとして、船上操舵室の乗組員と遠隔操船ルームの操船者の間で会話ができるテレビ会議端末、およびGNSS(Global Navigation Satellite System)等の航海センサからの運航情報表示や操船制御系のシステムがある。本システムやテレビ会議システムの画像伝送による大量のトラフィックが他のシステムに影響を与えることを避けるため、これらはそれぞれ独立の携帯回線で船陸を接続している。船陸の遠隔操船制御システム全体については本特集号の別稿「小型実験船の遠隔操船のリスク解析」にて説明しているので参照されたい。

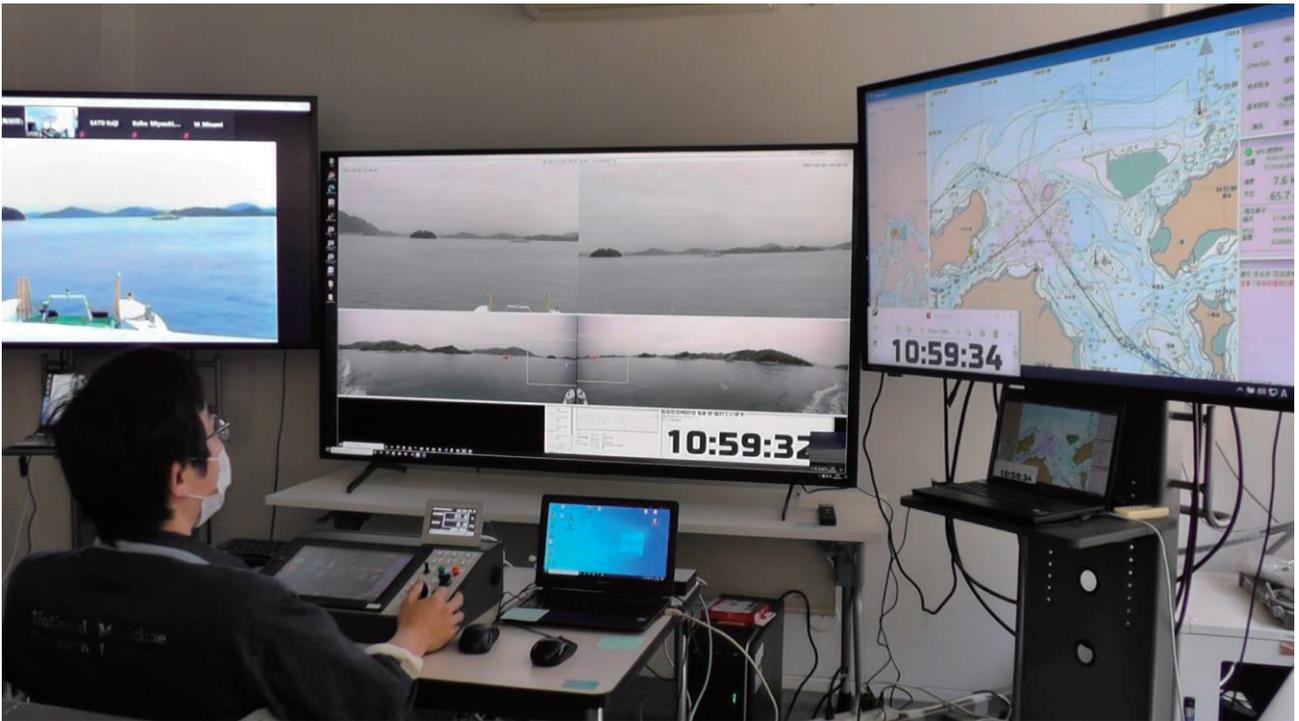


図3 陸上での遠隔操船実施状況
 (中央モニタが本システム、左はテレビ会議端末、右はGNSS電子海図上表示と現在時刻表示)

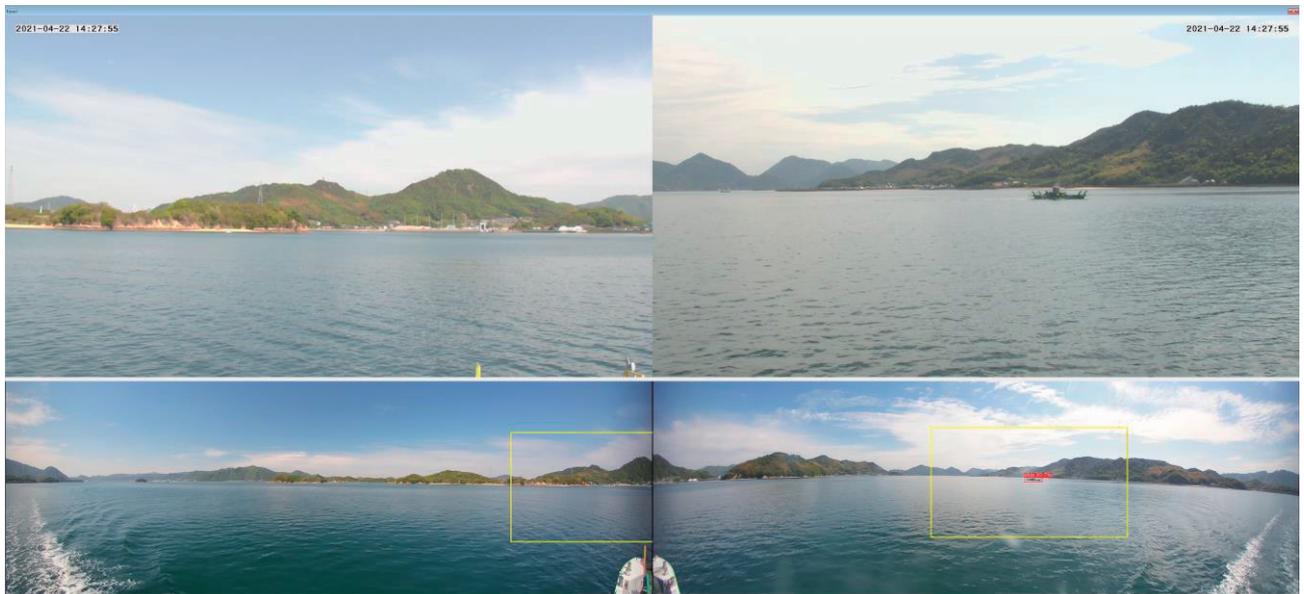


図4 カメラ画像表示ウィンドウ
 全方位画像で検出され赤枠で表示された他船(右下)をクリックして
 PTZカメラを向けさせることで拡大表示している(右上)

4. 遠隔操船実験と操船者による意見

2022年4月23日午前、小型実験船「神峰」が広島県尾道市の因島ドックを離岸した状態から小佐木島を左回りで周回し因島ドック付近に戻るまでの58分間の航路(図5)について、操船資格のある操船者が本システムを用いて海上技術安全研究所三鷹本所の遠隔操船ルームから操船を行った。また、実験船上には操船資格のある乗組員が操舵席に着座し、陸上操船者とテレビ会議端末で音声による連絡を取りつつ、危険を感じた際にはいつでも操船権を奪って操船を代行できる状態で航行を監視した。実際には乗組員が操船を代行することはなかった。ここで操船者をはじめ実験関係者から得られた意見と、想定できる解決方法について表2に示す。

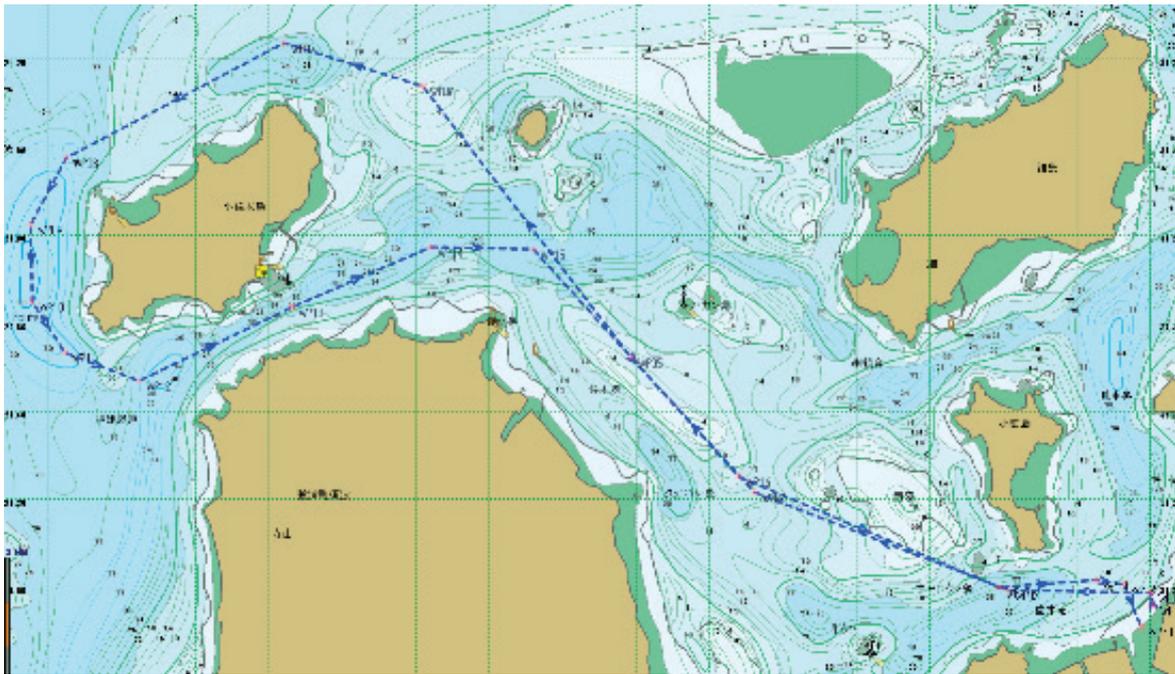


図5 遠隔操船実験の計画航路

表2 意見および想定される解決方法（重要度において降順）

No.	意見	現状	想定される解決方法
①	画像更新が一時停止することがあり、その間周囲の状況を確認することができない。	通常は1~2秒遅れ程度で船上から陸上に画像を転送できたが、5秒程度遅延する現象も確認された。航路上で著しく通信速度が低速になるなど接続が不安定になる海域がある。	基地局配置が異なる複数の通信事業者の回線を束ねるマルチSIM（Subscriber Identity Module）ルーターで解決できる可能性がある。
②	通信の遅れによって画像更新が停止していることを操船者が認識していない。	船上の時計と遠隔操船ルームの時計を見比べることで画像更新の停止は把握できるが直感的ではなく、操船者が気がつかない場合がある。	撮影時刻情報と遠隔操船ルームの時刻の比較から表示中の画像が何秒前のものかを一目でわかるようにする。
③	他船や漂流物の検出に見落としや誤りがある。	教師あり学習を用いて障害物とそうでないものを見分けている以上、教師データにない物体の検出は困難である。また20 pixel以下の小船影の検出もアルゴリズム上困難である。	時系列情報を用いた漂流物検出の手法を開発する必要がある。また、レーダー情報を電子海図等に重畳表示して提供する。
④	全方位画像やズーム画像の電子海図上の方位が分かりにくく、電子海図の地形と全方位画像の地形の照合がしにくい。	電子海図に船首方位が表示されているが見にくい。また電子海図で用いる船首方位のサンプリング時刻が撮影時刻と必ずしも一致しないため画像の方位と船首方位表示にずれが生じている。	各画像に、撮影時点での自船方位とパン角度、画角に基づく視野範囲をアイコンでグラフィカル表示して画像の示す方位が一目でわかるようにする。
⑤	全方位画像の更新が遅い。	全方位画像では船上にてGPU（Graphics Processing Unit）を搭載したデスクトップPCで深層学習による船影検出を行っており、撮影は2 fpsで行っているものの表示の更新は0.5 fps程度に落ちる。	GPU性能向上、船影検出モデルの精査（無駄な計算量の削減）による速度向上が期待できる。
⑥	船舶が動揺し、ズームによる拡大機能を使うと対象船を見失ってしまう。	光学ズームは20倍時では視野角2.9°しかなく、船の動揺ですぐに対象他船が視野から外れてしまうため、小型船にとってズーム機能は使われにくく、実験でもほとんど使用されなかった。	カメラをジンバルに搭載して動揺をキャンセルすることで、動揺する小型船でもズームが使いやすくなる可能性がある。
⑦	対象他船までの距離が分かりにくい。	単眼カメラによる画像では原理的に距離の計測ができない。単眼カメラでも、水平線と他船の喫水線の縦座標差で距離を測定するシステムもあるが誤差も大きく、本船の航行海域では水平線を見られる場所も少ない。	PTZカメラが2台搭載されているので、正面の物標に対しては立体視で測距できる可能性がある。

まず、2章 開発目標にあった遠隔操船者への全方位視野の提供は問題なく達成された。次に、拡大視野の提供についてはPTZカメラの操作についてはマウスでの画像クリック、ホイール操作という簡単な操作でPTZ制御を行うことができ、全方位視野のなかでどの部分が拡大表示されているのかもわかりやすく示すことができた。船体の動揺が大きかったのでズーム機能はあまり利用されず、対策が必要であることが分かった（表2⑥）。

安全な遠隔操船に脅威を与える最大の要因は通信の不安定さであった。通信容量の大きい画像伝送系と生命線である操船制御系の回線を分けることにより画像伝送が操船制御に直接に影響を与えることは解消されたが、同①のように画像の転送が遅れるために操船者が船舶の状態を把握できなくなる問題は依然として残っている。実際に航路上で携帯電話回線のスピードテストを行うと、海岸線から必ずしも遠いわけではないにも関わらず、著しく通信速度が低速になる特定の海域があることがわかった。海上における通信環境に関する国土交通省の資料³⁾によれば、障害物がなく見通しの良い場所では複数の基地局電波の干渉が生じ不安定になりやすいとされてい

ることから、原理上この現象は瀬戸内海や東京湾などの湾内で発生しやすいと考えられる。このような場合、異なる通信事業者の回線を複数用いることで対応する基地局配置も変わり、干渉が生じる海域も異なるため、お互いに補完しあえる可能性が考えられる。衛星回線と携帯電話回線間でシームレスに接続を切り替えるルーターや、複数の通信事業者の回線を制御し輻輳度に応じてパケットを振り分けるマルチ SIM ルーターが既に市販されており、これを搭載して運用試験を行うことを検討している。

船影の認識機能については、近傍他船を概ね検出することはできたが、同③のように、他船の見落としや背景の市街地を船舶と誤認識してしまうことがある。船舶やブイのように形状がある程度決まっていて、長辺 20 pixel 以上の影像の見落としや誤認識に関しては教師データを拡充することで改善されると考えられる。決まった形状のない漂流物については白波や曳波のような避ける必要のない影像との区別が必要であるため、静止画からの抽出はできず時系列情報を用いた検出アルゴリズムの開発が今後の重要な課題の一つであるといえる。また、レーザーや Lidar (Light Detection and Ranging) のような他のセンサとの組み合わせは有効である。

同⑦に関しては、筆者らは先行研究⁴⁾として、本件の PTZ カメラと同じ機種のカメラ (ズームを 3 倍に固定) を用いて立体視監視システムを 2 万トンの商船に搭載して正面の物標の検出および距離測定を行ったところ、1NM (Nautical Mile : 海里) 先の灯浮標に対して系統誤差を除くと概ね±2%程度の偶然誤差の幅内に納まっており、誤差の標準偏差は 1.2%であった。これはカメラの画素密度に基づく理論的誤差見込み (標準偏差 1.25%) とほぼ一致した。この誤差見込みはカメラ間距離とズーム倍率に反比例し、商船におけるカメラ間距離 25 m に比べ本船では 3.3 m しかとれないことと、動揺のためズームが使いにくいことを考慮すると、誤差見込みは約 23 倍となり、1NM 先の物標に対し推定距離誤差率が 30%程度になると見込まれる。また、カメラ撮影タイミングを同一または高精度に同期させない限り、本件で用いたネットワークカメラのように HTTP 通信による撮影コマンド送信での撮影では実際の撮影のタイミングがずれ (最小でも 30 ミリ秒程度のずれが発生する)、その間に船舶が動揺すると撮影タイミングのずれによる角度差が生じて距離推定誤差原因となる。動揺の大きい小型船ではこの影響が無視できないと考えられる。またこれの実施による制限事項として、同⑥のジンバルとの共用は困難なことから、画像解析のために画像更新頻度が下がることがある。

5. まとめ

無人小型船を遠隔操船することを想定し、遠隔操船者に視野を提供するための遠隔操船用周囲監視システムを構築し、小型実験船「神峰」に搭載して陸上の遠隔操船ルームから遠隔操船を行う実験で使用した。実験後に陸上操船者らから意見を聴取し、本システムが解決すべき課題を挙げてその解決方法について考察した。

当初の開発目標である全方位視野の提供、任意の方向の拡大画像の簡易操作での提供について目標通りに実施することができた。また、船影の検出機能も見落としや誤認識が発生するものの操船者にとって参考となるシステムを開発することができた。

一方、安全な遠隔操船に最も影響を与える課題は通信の不安定さであった。操船制御系通信と回線を分離し、画像品質を動的に制御するなど不安定性を緩和する構成をとり入れたものの無視できない画像伝送の遅延が確認された。これに対しては、複数通信回線を束ねるルーターの利用などの手段が必要であると考えられる。

謝 辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP20K04956 の助成をうけ実施した。関係各位に深く感謝申し上げる。

References

- 1) Japan Federation of Coastal Shipping Associations : About Coastal Vessels, https://www.naiko-kaiun.or.jp/about/about_naikou/ , Retrieved 2022.7.15.
- 2) Shaoqing Ren, et al.: Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks, <https://arxiv.org/abs/1506.01497>
- 3) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: About Maritime Communication Environment (In Japanese), <https://www.mlit.go.jp/common/001299753.pdf> (2019).
- 4) M. Kobayashi, K. Sato, E. Saito, Y. Niwa, J. Fukuto, K. Iwasaki: Study on Ship Detection and Position Estimation by Stereovision (In Japanese), Conference Proceedings, Japan Institute of Navigation, Vol.7 No.2 (2019), pp.142-145.