小型船舶の遠隔操船に向けた基礎実験

古谷 雅理¹・羽子田 哲弥²・清水 悦郎³・大島 浩太⁴

The Fundamental Experiment for Remotely Controlled Small Vessels

Tadasuke FURUYA, Tetsuya HANETA,
Etsuro SHIMIZU and Kohta OHSHIMA

Abstract

Under the circumstances of a shortage of sailors, aging of the labor force and measures of a human error, the study related to remote control of ship steering has attracted attention. Unlike an auto-pilot command, a remote control of ship steering need to transmit environmental information of a ship and that of the surroundings by a low delay as possible. In this study, we consider a requiring function of steering ship by remote control. We conduct a basic experiment using small vessel. As a consequence of the experiment, it was possible to steer the ship from remote places. However, through realization of a safe remote control of ship steering, some problems we have to solve reveal. The first problem is acquisition and providing of information about a tidal current, wind direction and wind speed. The second is ship direction toward all-round video image. The third is display of areas we have to focus on.

In the future, we need to consider a simple method of synchronizing and displaying for ship operators in a remote place.

Keywords : *information processing, information support, computer application*

キーワード : 情報処理, 計算機応用, 情報支援

1. はじめに

船員の不足、高齢化や人為的ミス対策を背景に、遠隔操船に関する研究が注目を集めている。遠隔操船は、船内からのオートパイロット命令とは異なり、遠隔地にいる操船者に船体および周囲の環境情報を可能な限り低遅延で伝える必要がある。

MUNIN プロジェクト⁽¹⁾では、自律船と非常時の遠隔操船に関する調査・検証を、Rolls Royce⁽²⁾は、遠隔操船の開発を進めている。本研究では、遠隔操船に必要な機能を検討し、実船を使った基礎実験をおこなう。人為的ミスによる小型船舶の事故率が高いこと、また河川の利用が見直されていることから、

都市部の河川での小型船舶の遠隔操船を対象に実施する。

2. 小型船舶の遠隔操船

小型船舶の遠隔操船には、操船に必要な機能、通信機能、非常時の緊急対応機能が必要と考える。操船に必要な機能は、操舵技術、船舶周囲状況の表示技術である。操船者が乗船中は、橋脚の高さ、距離、他船の速度、気象海象情報などの自船の周囲の環境が簡易に把握できる。遠隔操船者へも同様の情報を送信することが安全な航行につながるが、送信するデータ量が増大すると、通信遅延やデータ損失につながる恐れがある。また、各データ間の同期も考慮

¹ 正会員 東京海洋大学 (〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6)

² 学生会員 東京海洋大学 (〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6)

³ 正会員 東京海洋大学 (〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6)

⁴ 正会員 東京海洋大学 (〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6)

しなければならない。これらを考慮し、本研究では、見張りに必要な情報を処理する環境表示計算機、オートパイロット用の制御計算機を船内に設置、映像表示用計算機、船内の制御計算機と通信する制御計算機を遠隔操船側に設置する。制御計算機を遠隔地から制御することで遠隔操船実験をする。

3. 小型船舶の遠隔操船実験

3.1 実験概要

東京海洋大学の急速充電対応型電池推進船「らいちょう I」(図 1) を利用し、遠隔地からオートパイロット命令をやり取りすることで操船する。「らいちょう I」は、計算機によるオートパイロットが可能な電池推進船である。また、全長 10m、全幅 2.3m と小型であり、満載時速力 8.5knot、乗組員 2 名、旅客 10 名と河川交通に適している。

操船する場所は東京海洋大学越中島キャンパスとし、「らいちょう I」が航行する場所は、秋葉原-隅田川間の神田川とした。先行研究⁽³⁾⁽⁴⁾の電波強度調査、データ通信試験から、携帯電話の通信規格の一種である 3rd Generation (3G) 回線及び Long Term Evolution (LTE) 回線によるモバイル通信は衛星回線に比べ安価であり、高速で通信可能な結果を得ている。また、都市部ではモバイル通信網が整備されている。そこで、本研究では、通信に LTE 回線を利用する。LTE 回線は 3G 回線に比べて大容量かつ低遅延という特徴をもつ。特に、接続遅延 100ms、伝送遅延 5ms 以内という目標値が規定されている。

「らいちょう I」には、小型船舶免許保持者が緊急時の船長として 1 名乗船し、システムの管理者 1 名、見張り員 3 名の計 5 名が乗船した。システム構成の概略を図 2 に示す。

実験は、情報表示方法、遠隔操船者を変え 2 回実施した。また、遠隔操船していない状態での LTE 回線の通信状況を計測した。

3.1.1 操船

遠隔地からの操船には、「らいちょう I」用に開発されたオートパイロットシステムを利用する。このシステムは、汎用計算機上で動作し、Transmission Control Protocol (TCP) を利用した通信が可能である。TCP は、再送制御、輻輳制御を行うため通信の信頼性が高い。「らいちょう I」内の制御計算機からは、遠隔操船側の制御計算機に船体情報を送信、遠隔操船側の制御計算機からは、制御コマンドを送信

図 1 らいちょう I

図 2 全体構成図

図 3 (a) 2 式の魚眼レンズ一体カメラ
(b) 魚眼レンズ一体カメラとスタビライザ

することで遠隔操船を行う。同時に環境表示計算機から User Datagram Protocol (UDP) で映像を配信する。UDP は、信頼性は確保されていないが、処理が簡易で遅延が少ないため映像配信などに適している。

小型船側と遠隔操船側は、携帯電話を利用し音声通話で状況を伝達することで実験の準備と開始を行う。双方の準備が整い、遠隔操船側の実験準備開始の指示に従い、小型船内の環境表示計算機から全周映像を遠隔操船側の映像表示計算機に向けて配信する。映像受信確認後に船側、操船側の制御計算機上で稼働するオートパイロットシステムの操船ソフトウェア上で双方の接続を確認する。確認後、遠隔操船側の実験開始の連絡を受け、遠隔操船実験を行う。

3.1.2 船体周囲情報の表示

周囲の船舶の状況を把握するため自船周囲の映像、橋脚や停泊船などの障害物までの距離を遠隔地にいる操船者に伝える必要がある。本研究では、遠隔地への情報表示に2種類の手法を検討した。

最初の手法は、筆者らが報告している魚眼レンズ一体カメラ2式(図3(a))による距離計測、全周映像表示システム⁽⁵⁾を利用する。当該システムでは、全周を16分割し、矩形領域内の平均距離を求めることで、低遅延で周囲までの距離を計算している。本実験では、周囲の障害物までの距離を船舶内で計算し、遠隔地へ転送する。

2つ目の手法では、周囲の障害物までの距離表示を行わず、魚眼レンズ一体カメラ1式とスタビライザを利用し、撮影装置の揺れを除去する(図3(b))。

また、通信環境の悪化により映像を受信することが困難な場合を想定し、船から送られてくる位置情報を基に、事前にステレオカメラで作成した点群データによる3次元空間地図を操船側スクリーンに表示する。

3.1.3 遠隔地との通信

通信は、「らいちょう I」のルーフ上の外部アンテナ2式と接続したSIMカード搭載可能なRouterを利用する。船と遠隔操船場所はVPN(Virtual Private Network)接続し、接続が切れた場合は、回線復帰後自動的に接続する設定とした。回線はベストエフォート方式で、上り 50Mbps、下り 150Mbps である。操船側の制御用計算機に船体情報、映像表示計算機に小型船周囲の環境情報を、船内側の制御計算機に

図4 遠隔操船の様子(距離表示)

制御コマンドを送信する。

3.1.4 実験水域

遠隔操船場所から、直線距離で約 3.6km 離れた神田川を利用する。この水域では、3次元空間地図作成のため数回撮影実験を行っている。直線で見通しがよく、他船舶の航行量はそれほど多くはないが、川幅が約 20m と狭く、両側は商業ビルで囲まれている。この水域約 150m の距離を航行する。

3.1.5 実験準備

事前準備として、遠隔操船者に実験水域の安全が確保されたとの船長からの連絡後、遠隔操船者は、環境表示計算機、制御計算機との接続を確認する。問題がなければ、船長に遠隔操船開始を伝え、オートパイロットシステムを遠隔操船者の制御に切り替えて、遠隔操船を開始する。船長が危険と判断した場合、即座に船長の制御に切り替えることが可能である。航行中は目視による見張りをを行い、状況を逐次船長に報告する。

3.2 実験

実験水域において、遠隔操船実験を2回行った。

1回目は、著者らが報告した航行中に船舶周囲の物体までの距離計算するシステム⁽⁵⁾を利用する。2回目は1回目の実験結果を考慮し、表示方法を再検討する。

3.2.1 第1回遠隔操船実験(予備実験)

天候は曇り、遠隔操船時間は準備を含めて約 40分である。操船者は「らいちょう I」の操船経験があり、船体特性を理解している。実験時の様子を図4に示す。初めての遠隔操船のため、船、遠隔操船側とも相手側の様子が分からず、操船を始めているかわからなかった。船体が動き出してから、船側は見張り、遠隔操船側は船体情報、船体周囲情報の受信状態を確認した。実験後の遠隔操船者の評価は下記のとおりである。

図5 遠隔操船の様子（距離表示）

a. 操船に関して

- ・ スクリーンに表示されている映像からは障害物までの距離が把握し難い（周囲の障害物までの距離は表示されているが、注視できない）
- ・ 舵角、出力とも適切かの判断が困難
- ・ 気象・海象が分からず、予想以上の風力で船舶が流された（実験開始直後のためモータ出力が低かった）

b. 通信状況に関して

- ・ 実験中に船舶から遠隔地間までのデータ転送量を測定（通信に影響を与えないように帯域を最大 500kbps に設定し、10 秒間隔で UDP 通信の帯域を測定した結果、平均帯域は 500kbps となった。帯域とは、単位時間あたりにどの程度のデータ量が伝搬可能であったかを示す指標である）
- ・ 複数の橋下を通過、兩岸を建物で囲まれていたが、映像は途切れることなく転送された
- ・ 1 度だけ画面転送ソフトウェアの不具合で映像が途切れたが、すぐに復旧した

c. 船から

- ・ 風の影響を受けていることが遠隔地に正常に伝わっているか疑問

通信状況に関しては特に問題はないと考える。船内から操船する場合、船体の大きさ、動きを把握しやすいが、遠隔操船では全周映像を表示しても周囲の環境を把握し難い。そのため操船者の評価は不安を感じるような内容となった。本実験では、安心して遠隔操船できる状況ではない。舵をきる目安となり、船体の動きを把握可能な表示が必要である。これらの実験結果を基に遠隔操船側の円柱スクリーンの形状（水平方向 220 度）と映像の水平画角を揃え

図6 遠隔操船の様子（遠隔操船側）

図7 遠隔操船の様子（船側）

る、方位線の表示を検討し、再実験を行った。

3.2.2 第2回遠隔操船実験（本実験）

同水域において第2回遠隔操船実験を行った。天候は晴れ、遠隔操船時間は準備を含めて約 40 分である。前回と異なる操船者であるが、「らいちょう I」の操船経験があり、船体特性を理解している。

第1回の結果から、下記のように表示システムを変更した（図5）。

- ・ 電動機出力と目標船首方位の指令値を、制御計算機に接続したマウスにて制御パネル上のボタンをクリックする方法から、ゲームパッドのボタンを操作する形に変更
- ・ 船首方向、船尾方向を示す線を描画

- ・ 舵角を指定しやすいように 30 度毎に方位線を描画
- ・ 船速を表示画面（スクリーン）に表示

遠隔操船実験時の様子を図 6、7 に示す。実験後の遠隔操船者の評価は下記のとおりである。

d. 操船に関して

- ・ 大型スクリーンへの表示のため距離感がつかみやすい
- ・ 船速表示が操船時の参考になる
- ・ 船尾の映像は、橋や狭水路を通る際に船体の位置を理解するのに有用
- ・ 船舶の動きを予測できないので船首が映るようにすべき
- ・ 映像の状態がとてもよく、水面の反射、建物の影が障害物に見える場合がある
- ・ 船速に応じた船体の予測位置の表示(数秒先)
- ・ 船体情報把握のための環境音（ドライブ音、ラダー音）
- ・ 急激な明るさ変化への対応（橋の下の通過、直射日光など）
- ・ 水深（特に浅い部分）情報の表示（映像上に重畳）

e. 通信状況に関して

- ・ 操船時のタイムラグがなくてスムーズに操船可能

第 1 回の実験結果を基に船体の動きを把握しやすいように映像上に方位などの情報を追加したため、安定した遠隔操船であった。撮影機材の調整など今後検討しなければならない問題、予測移動位置、水深の表示などの操船支援機能の検討が必要だが、良好な結果であると考ええる。

3.2.3 船・遠隔操船地間通信状況計測

実験 1 回目、2 回目とも LTE 回線を利用した。これは携帯電話網の一種のため、通信状況は環境に依存する。基地局の数と設置位置、基地局に接続している利用者数などにより通信状況が変わる。転送量が通信帯域を下回っていれば、遅延なく、各地の情報を送受信できると判断できる。そこで、遠隔操船実験を実施した水域がどの程度の帯域を利用できているのかについて電波状況を調査した。調査は、遠隔操船実験に用いた回線を対象に、遠隔操船実験の通信機能による通信が生じない状態で実施すること

図 8 遠隔操船場所の通信帯域

図 9 電波強度（隅田川から秋葉原）

で、計測時点でどの程度の TCP 通信による通信帯域が確保できていたのかを示す指標である。他の通信が発生しない状況で行うことで、最大値を計測することができる。計測は、航行水域である隅田川－秋葉原間において、5 秒間隔で 10 分間測定した。30 秒毎の平均値を図 8 に示す。測定には遠隔操船側をサーバ、船側をクライアントとし、通信帯域の最大帯域幅を測定可能なツールである iPerf3⁽⁶⁾を利用した。通信帯域は、平均 4.6Mbps、最大 6.0Mbps、最小 3.3Mbps である。船から遠隔操船側への最大送信データは全周を撮影した映像データであり、約 50KB のデータを 1 秒間に 7 枚送信しているため約 3Mbps 程度利用する。遠隔操船コマンドは数 Kbps であるため遠隔操船には十分な帯域が確保されていることがわかる。

また、同水域の LTE/3G 通信の通信状況を地図にプロットしたものを図 9 に示す。電波強度は、開発した強度受信プログラムを Android 携帯電話 Nexus5 上で動かし、測定した。電波の強さは、青、緑、黄、橙、赤色の順で弱くなるように表現している。色分けの基準は、先行研究⁽³⁾⁽⁴⁾で用いた携帯電話のアンテナピクトで使われる 5 段階と同様にしている。この測定結果から、電波状況はかなり良好であることがわかる。

携帯電話網を用いた電波伝搬は、周波数や使用機材のアンテナ特性によって実測値は変化する⁽⁷⁾。また、周囲の建物の状況によっても伝搬特性は変化する

図10 Lidarによる距離情報の取得（河川航行時）

図11 Lidarによる距離情報の取得（着岸時）

る⁽⁸⁾。そのため、実測が重要であり、スマートフォン等を用いたユーザ参加型の電波状況調査サービス⁽⁹⁾も存在する。しかしながら、ユーザ参加型では、使用端末の特性等の計測条件が異なる結果を集約することから、本調査のように、単一の端末で実際の水域における電波状況の実測調査の意義は大きい。

4. 考察と今後の課題

操船に必要な機能である操舵に関しては、本実験で利用した「らいちょう I」専用のオートパイロットソフトウェアを利用している、小型船内からのオートパイロット操船実績がある、電池推進のため低速での制御が容易であることから特に問題はなかった。ただし、ネットワーク設定上の問題で船・遠隔操船側の制御計算機が接続できないことがあった。

船舶周囲状況の表示では、操船者自身による船舶周囲の視認が評価に影響したと考える。練習船汐路丸の航海機関情報の遠隔表示に関する研究⁽¹⁰⁾では、船首方向 220 度分のカメラ映像を表示したが、小型船が航行する狭い水路では、同航線、反航線などの他船舶との距離が短いため後方視界も船首方向と同様に確保する必要がある。操船者が見る円柱スクリーンの角度 220 度にあわせて、全周映像から船首、船尾それぞれを中心に 220 度分切り出し、2 段で全周表示することで頭部の移動を減らし、障害物、他船との衝突回避の見張りを可能とした。これにより

操船者に十分な情報を提供できたと考える。撮影装置の揺れが操船者に影響を与えたと考え、2 回目の遠隔操船時に撮影装置を 3 軸スタビライザ上に設置した。船体動揺時は撮影装置が水平方向に移動するためスクリーン中心と船首方向が重ならなく、舵角指定に影響した。撮影映像に船首が映るようになるなどの対応が必要である。

非常時の緊急対応として、通信帯域が狭くなった場合に船体の位置情報を基に予め作成した 3 次元空間地図を映像の代わりに利用することを検討した。3 次元空間地図作成時と航行時の環境に相違がなければ地図を基に航行は可能だが、他船の航行情報が取得できないため避航できない。そこで、撮影装置を利用したステレオ距離計算よりも高速に距離情報が取得可能な簡易 Lidar を利用し、周囲の障害物等の位置関係が高速表示可能か検証した。実験時の様子を図 10 に示す。30m までの範囲であれば距離を取得可能なため、狭水路の低速航行であれば有用である。着岸時の距離測定の様子を図 11 に示す。

完全に通信が切れた場合は、位置情報の入手は不可能なため安全な場所に小型船を停止させなければならない。今後このような場合の対応を検討する必要がある。

本遠隔操船で送受信するデータ量と実験水域の通信環境から十分に操船可能であることが計測によりわかったが、一時的に通信帯域が狭くなる、通信

回線の切断、再接続が考えられる。避航状態でなければ船側の制御計算機で速力を落とすなどの処理を、避航状態であれば、相手船舶に状態がわかるような表示を船体につけるなどを検討しなければならない。また、送受信データの遅延に関しては計測が出来ていない。遅延の測定方法も含めて今後検討していく必要がある。

遠隔操船者にとって重要なのは遠隔地の情報表示である。小型船舶ではあるが、予備実験と本実験を通じて、実験水域を実際に航行した経験のある操船者に遠隔で操船してもらい、乗船時と遠隔操船時の操作感を比較してもらった。これにより、操船者が操船時に求める情報と表示方法に関して示すことができたと考える。

5. まとめ

本研究では、小型船舶の遠隔操船に向けた基礎研究として、LTE 回線を利用した自船周辺の映像配信、オートパイロットによる操船実験をおこなった。遠隔操船に必要な最低限の機能ではあるが、遠隔地からの操船は可能であった。ただし、実務運航現場の環境に近づけるためのシステム開発を目指すには、相手船舶、障害物までの距離、気象、海象などの多くの情報を操船者に示す必要があり、通信量を減らす処理を検討しなければならない。同様に、緊急時の対応に関しても再検証する必要がある。

今後は、運航現場において実務者が安全航行を実現するための意思決定に必要な情報を正確かつ確実に提供できるようシステムを再検討し、システムの信頼度向上を目指す。また、社会実装に向けて、技術的側面だけでなく、法的側面⁽¹¹⁾に関しても検討を進めていく。

参考文献

- (1) MUNIN Project
<http://www.unmanned-ship.org/munin/>
- (2) Rolls Royce Ship intelligence
<https://www.rolls-royce.com/products-and-services/marine/ship-intelligence.aspx#section-overview1>
- (3) 大島浩太, 古谷雅理, 竹本孝弘, 庄司るり: 東京湾・浦賀水道海上の航路における 3G 電波強度調査, 日本航海学会論文集 Vol. 132, pp. 78-85, 2015. 7.
- (4) 大島浩太, 古谷雅理, 北川直哉, 庄司るり: スマートフォンと生体情報センサを用いた小型船舶向け海難通報システム, 日本航海学会論文集 Vol. 136, pp. 72-79, 2017. 7.
- (5) 羽子田哲弥, 大石浩世, 古谷雅理, 竹本孝弘: 小型船舶の狭水路航行支援に関する研究 -河川交通に向けて-, 日本航海学会講演予稿集, Vol. 4(2016)No. 1, K134-27, p. 102-105, 2016.
- (6) iPerf
<https://iperf.fr/>
- (7) 総務省, 携帯電話基地局周辺の電界強度測定方法に関する調査,
<http://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/e/e/body/report/pdf/19-2.pdf>, 2008. 3
- (8) 佐々木元晴, 猪又稔, 山田渉, 鬼沢武, 高周波数帯の無線アクセスシステム構築を支える伝搬損失モデル, NTT 技術ジャーナル, 2016. 8
- (9) 3G and 4G LTE Cell Coverage Map - OpenSignal,
<https://opensignal.com/> (accessed 2017. 11. 11).
- (10) 大石浩世, 古谷雅理, 羽子田哲弥, 櫻田 武嗣: モバイルデータ通信を利用した遠隔地における航行情報表示システム, 日本航海学会論文集 Vol. 135, pp. 159-165, 2016. 12.
- (11) 梅田綾子, 清水悦郎: 自律運航実現に向けた法的課題, 日本航海学会論文集 Vol. 136, pp. 153-159, 2017. 7.