

研究成果報告書

日本財団 会長 笹川 陽平 殿

報告日付: 2022年 3月 31日
事業ID: 2020562810
事業名: 既存小型旅客船の無人運航
化技術の開発(2年目)
団体名: 丸紅株式会社
代表者名: 柿木真澄 印
TEL: 03-3282-2111
事業完了日: 2022年 3月 31日

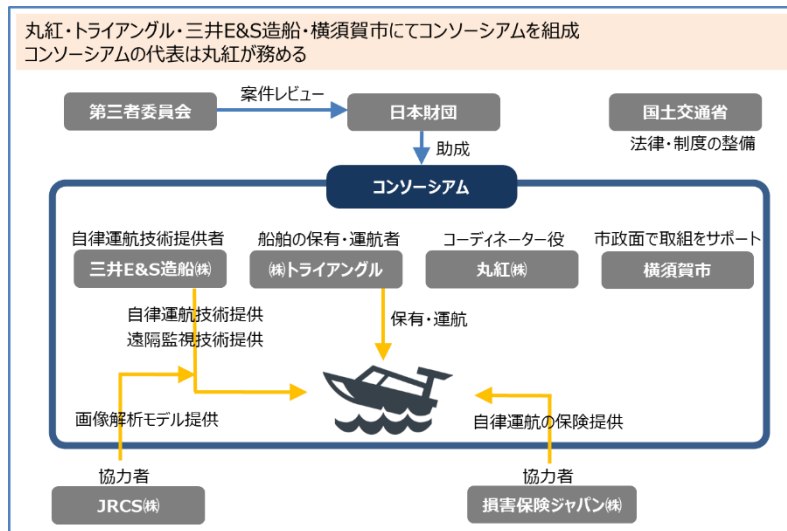
以下の通り、研究成果について報告いたします。

1 研究開発体制について

1.1 体制表

事業者名	本事業での役割	備考
丸紅(株)	コーディネーター役	・プロジェクトマネジメント、ビジネスモデル構築の実績豊富 ・受容性の高いレトロフィットでの自律運航化モデルを開発
(株)トライアングル	船舶の保有・運航	・時代に合った船舶の保有・運航に積極的 ・無人船の観光コンテンツ化が可能 ・神奈川県と防災協定を結んでおり、災害時に省人化した船で安全に物資を輸送したいというニーズあり ・既存船を自律運航化し安全に運航する運航技術を開発
三井E&S造船(株)	自律運航技術の提供	・日本における自律運航技術開発のトップランナー ・制御が難しい小型船におけるレトロフィット可能な自律運航システムを開発
横須賀市	市政面でのサポート	・”ヨコスカ X スマートモビリティ・チャレンジ”(*1)の一環として本件に参画 ・無人運航技術による船舶の安全運航の実現で、市民の安全や横須賀市を訪れる人の安全に繋がりたい (*1)スマートモビリティの開発・実証の推進及び関連産業・周辺産業の集積を図ることで、新規ビジネスの創出、社会課題の解決及び地域の活性化に資することを目的としている

1.2 体制図



1.3 スケジュール(提案時)

実施項目	2020年2月 ～ 2020年6月	2020年7月 ～ 2020年12月	2021年1月 ～ 2021年6月	2021年7月 ～ 2022年3月
自律制御モジュールの開発	→			
画像解析システムの開発	→			
陸上監視システムの開発	→			
機器の購入並びに据付・ 改造工事	→			
実船を用いた検証・調整作業		→		
予行試験			→	
実証試験			→	
プロジェクトマネジメント	→			

1.4 四半期別の報告概要

2020 年度第 1 四半期	システム構成検討、実験に必要な機器搭載に向けた調整の実施
2020 年度第 2 四半期	システムの基本設計および詳細設計の実施、搭載工事の最終調整の実施
2020 年度第 3 四半期	実験に必要な機器の搭載工事実施
2020 年度第 4 四半期	船に搭載した各機器の調整実施
2021 年度第 1 四半期	実船を使った自動操船システムの検証・調整作業の実施
2021 年度第 2 四半期	リスク評価および対策の実施、広報イベントへの協力実施
2021 年度第 3 四半期	実船を使った自動操船システムの検証・調整作業の実施、予行試験の実施
2021 年度第 4 四半期	実証実験およびメディア公開デモンストレーションの実施

2 研究概要及び成果

2.1 研究の目標

既存小型観光旅客船の既存機器をコンピュータ制御できるように改造した上で自律制御モジュール等を搭載し、実際に自律運航することで、既存小型船の無人運航化に関する技術を開発する。2022年3月までに自動離着桟を含めた一航海を無人運航にて実現することを目標とする。

2.2 自動化する対象船



船名	シーフレンド ZERO	
船種	小型観光旅客船(双胴船)	
船舶所有者/運航者	株式会社トライアングル	
造船所	形原造船株式会社	
起工	2013年8月6日	
竣工	2014年4月26日	
総トン数(トン)	19トン	
満載排水量(トン)	31トン	
搭載車両数	0	
旅客定員数	236名	
船の寸法	L(長さ) = 19.8 (m) B(幅) = 7.10 (m) D(深さ) = 1.9 (m)	
計画速度(ノット)	14.5 ノット	
主機	メーカー	ヤンマー
	型式	6CXBP-GT x2 台 (302KW410PS/2616rpm)
	航海中の使用燃料	軽油
備考	固定ピッチプロペラ 2 基 バウスラスター 2 台	



2.3 自動操船システムの仕様検討

既存の小型観光旅客船「シーフレンド ゼロ」を供試船として、“新三笠棧橋から猿島棧橋までの一航海の自動操船が可能なシステム”とするための仕様を設定しました。

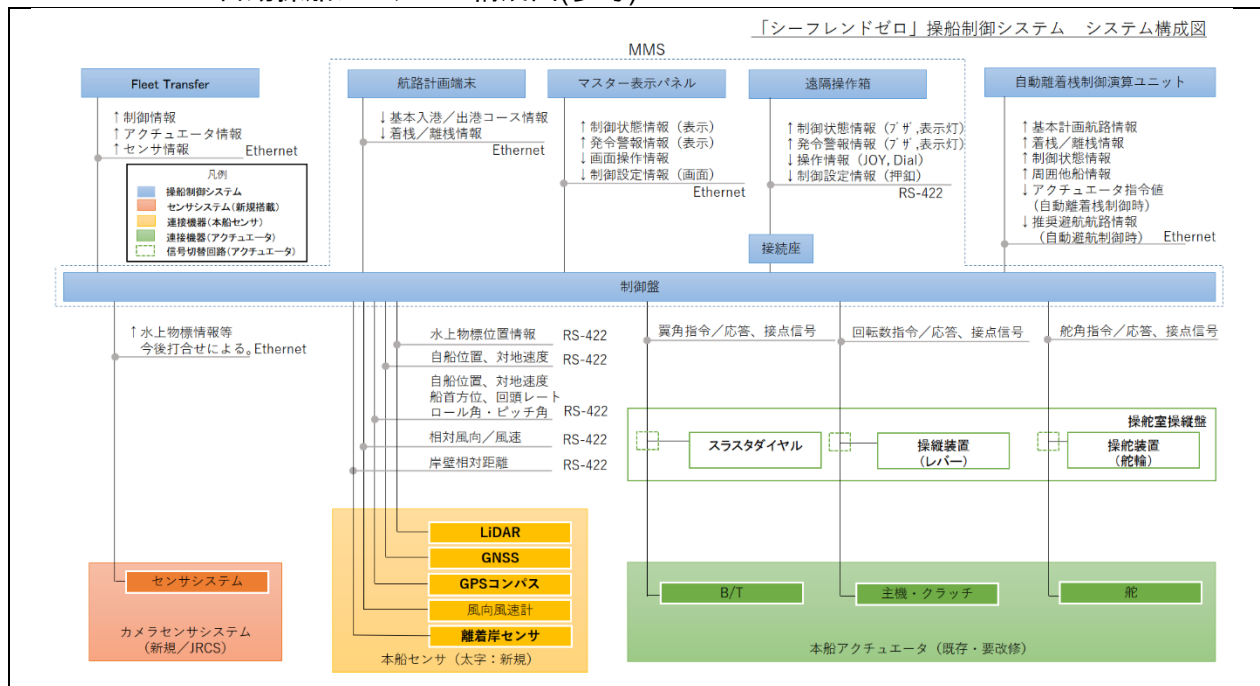
- 離棧、着棧、航路トラッキング、および避航を含めた操船を自動化すること
- 自動避航では画像認識等による他船検知が行えるようにすること
- 自動操船中の船の状態を陸上で監視可能にすること
- 安全かつ速やかにフォールバックに移行可能なシステムであること

2.4 各自動化機能の構成および概要

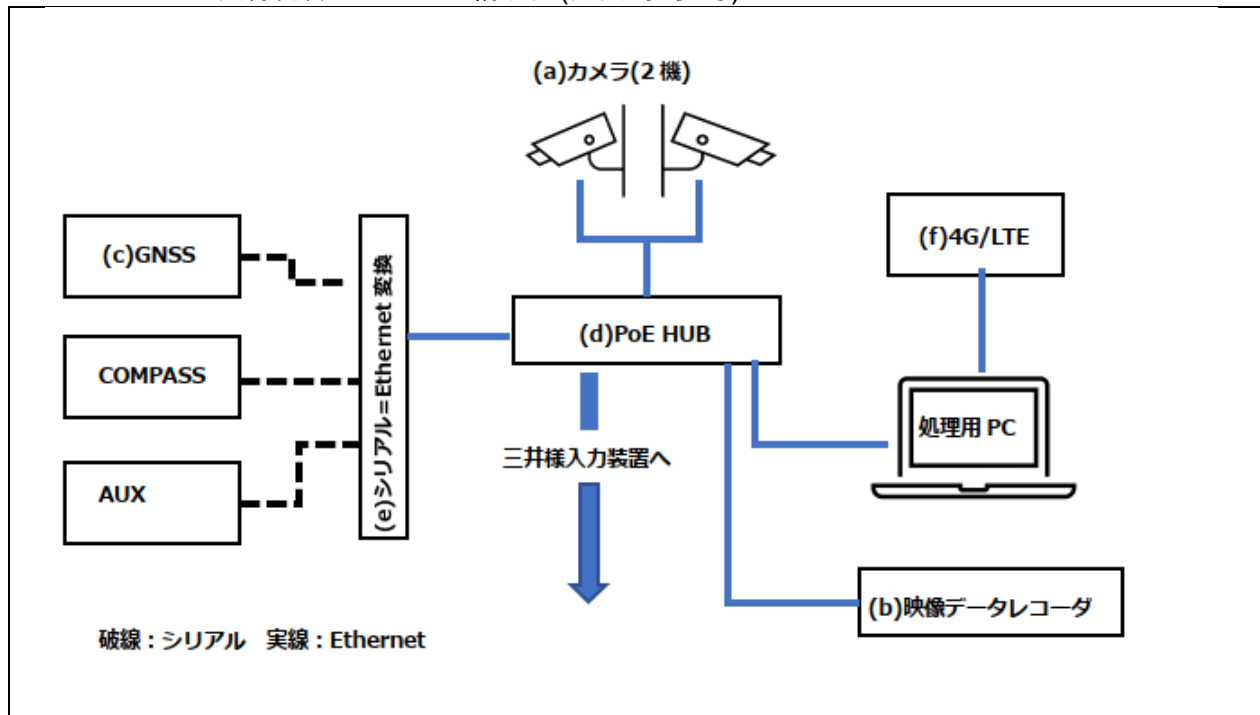
機器名	機能	概要
自律化モジュール	自動離棧機能 	事前に設定したウェイポイント情報(座標)に沿って操船制御を行う ① 計画部 対象船の運動特性を考慮した航路計画、目標船速、目標方位を立案し、それらを実現するための舵角、主機回転数等の指令値を演算する ② 離棧制御部 岸壁基準位置(離棧モード開始位置)から特定の位置(終了位置)まで、船体に作用する定常力を推定し補正を与えながら制御を行う
	自動着棧機能 	事前に設定したウェイポイント情報(座標)に沿って操船制御を行う ① 計画部 対象船の運動特性を考慮した航路計画、目標船速、目標方位を立案し、それらを実現するための舵角、主機回転数等の指令値を演算する ② 着棧制御部 アプローチ終点位置(着棧モード開始位置)から岸壁基準位置(終了位置)まで、船体に作用する定常力を推定し補正を与えながら制御を行う
	航路トラッキング機能 	シューティングメソッドおよびフィードバック制御を組み合わせることによる設定した航路に対するトラッキング(船速制御を含む)を行う
	自動避航機能 	① 避航リスク演算 航海計画・侵入不可領域・他船情報を考慮したリスクポテンシャル場を生成する ② 避航経路計画 作成したリスクポテンシャル場を使い複数の経路演算を行う ③ 避航経路評価 作成した複数の経路から候補として表示(人間による選択)する航路を抽出・評価する

統合操船システム (MMS)	姿勢制御機能	対象船の運動特性を考慮した方位保持または定点保持の制御を行う
	アクチュエータ・センサ情報入出力	接続したアクチュエータ・センサからの情報(警報)を表示する、また必要に応じて制御に使用するためのデータ処理を行う
	ジョイスティック操船機能	ジョイスティック(およびダイヤル)による対象船の制御を行う
	フォールバック機能	回路切替により強制的に制御権を特定のアクチュエータへ切り替える
陸上監視システム (FleetTransfer)	リアルタイム運航監視機能 	MMS に入力されている各センサー値ならびに各アクチュエータの指令・応答値を 4G 回線経由で陸上局にリアルタイムで送信・表示する
画像認識システム	画像入力・画像認識・信号処理 	比較的安価で汎用的なカメラを複数台使用し、機械学習による画像認識技術で自動的に他船・障害物を検知する。検知した情報を MMS 経由で避航モジュールに受け渡す

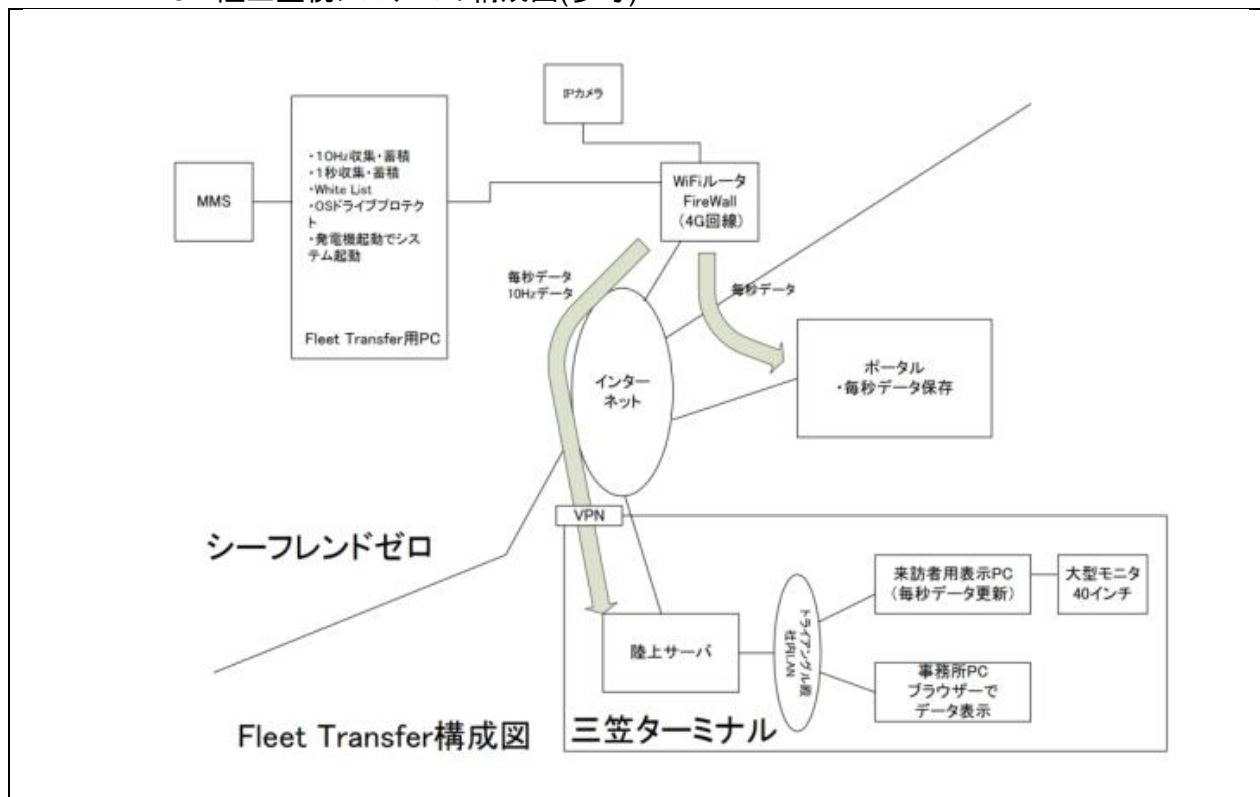
2.4.1 自動操船システムの構成図(参考)



2.4.2 画像認識システムの構成図(計画時・参考)



2.4.3 陸上監視システムの構成図(参考)



2.5 安全評価

検討した自動操船システムの安全性を確認するため、海の安全技術の専門家である海上技術安全研究所(海技研)殿および日本海事協会(NK)殿にご協力頂き、SWIFT(Structural What-IF Technique)手法を使ったHAZID(HAZard IDentification)会議による安全評価を実施しました。

会議では自動化された各自動化機能が使用される場面をフェーズとして分け、想定されるハザード(類似を含め約900件)への対策について約2日間の議論を行いました。議論の結果として、従来の対策に加えて追加の対策を織り込むことにより、許容できないリスクは0件、実行可能な範囲でリスク低減が必要とされる(ALARP領域)リスクは31件となりました。それ以外のリスクについては全て許容可能なリスクとして自動操船システムの安全性を確認しました。



HAZID会議の様子

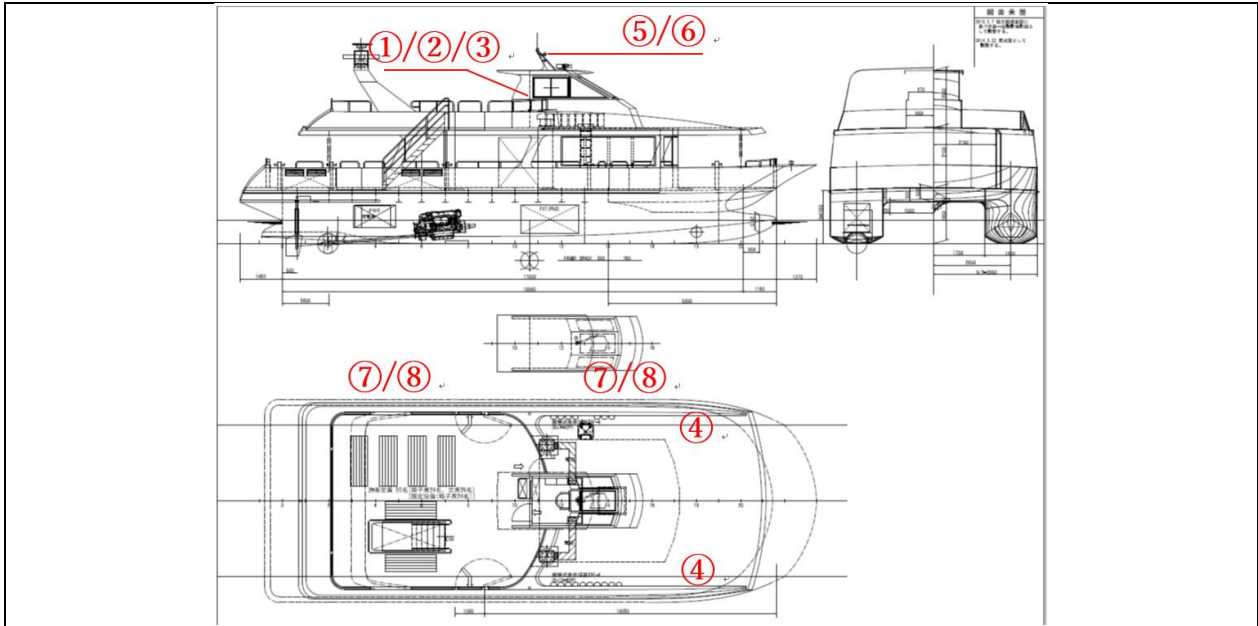
2.6 搭載工事

既存の小型船を自動化するためには船の制御方法を電子化することや、自船とその周囲の情報を出来る限り正確に把握するためのセンサーが必要になります。

今回、「シーフレンドゼロ」の自動化に必要な機器を搭載するため、愛知県蒲郡にある形原造船株式会社のドックにて船の改造を実施しました。



①	MMS 制御盤およびタッチパネル	操舵室内
②	陸上監視用 PC および通信用 4Gルーター	操舵室内
③	MMS 操船用 JOY スティック(操作箱)	操舵室内
④	GNSS(2 基)	船首側(左舷・右舷)
⑤	風向風速計および AIS	コンパスデッキ(操舵室屋根)
⑥	画像認識用カメラ	コンパスデッキ(操舵室屋根)
⑦	離着棧センサー(2 台) (※実験時のみ設置)	左舷船側(前後部)
⑧	LiDAR(2 台) (※実験時のみ設置)	左舷船側(前後部)



実証実験用の機器設置箇所



操舵室内(後方側面)



操舵室内(前方正面)



コンパステッキ



左舷船側

2.7 実船での検証・調整

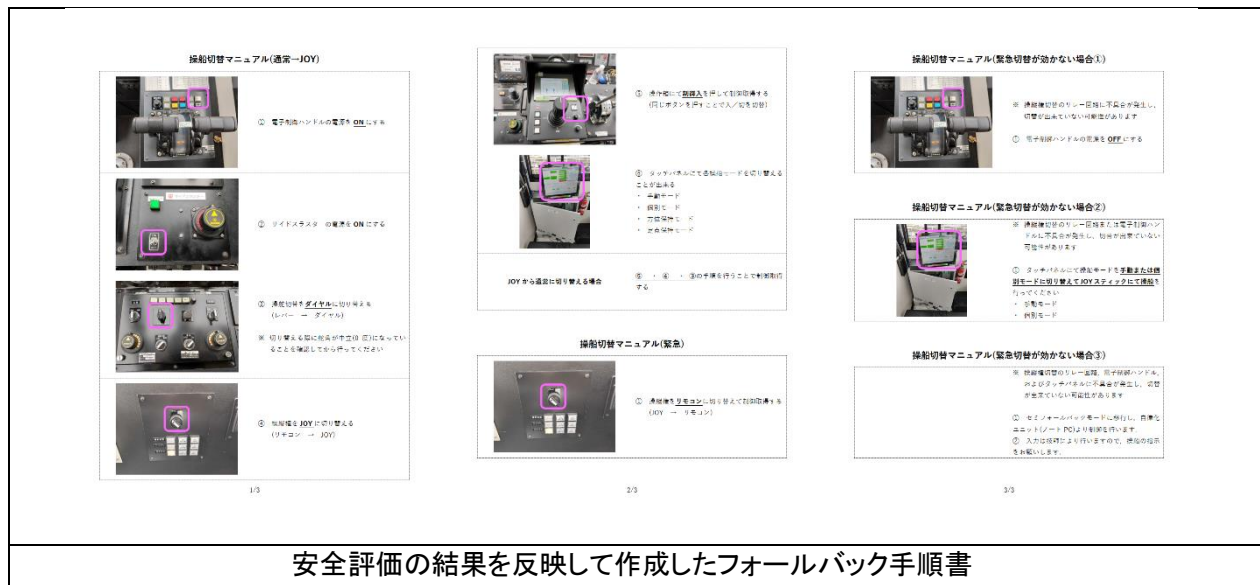
自動化に必要な機器の搭載完了後、各機器の動作確認と自動化システムの調整のため、実際に航路上でのテストを行いました。搭載した機器や自動化システムの動作は事前に陸上で確認を行っていますが、想定した通りの動きに近づけるためには、実際に動いている船の上でテストを複数回重ねながら各パラメータを調整することが必要となります。

今回の実証実験を行う猿島航路は約1.7km(約1マイル)と比較的短い航路であるため、1回のテストが最大でも15分程度で済むため試行回数を多く確保できる点と、小型船特有の応答性の良さ(加減速や変針が早い)から危険を感じた際にフォールバックにより安全状態へ素早く移行し易いため、テストを行うには良好な環境条件です。

また、実際の航路上でのテストだけでなく、シミュレーションにより仮想的に再現した船と環境でもテストを繰り返し行うことで、実際の岸壁を使っての自動離棧や自動着棧を試す前に安全確認を含めたテストや、航路上を通過する他船を避けるための適切な航路パターンの検討等に活用しました。

2.7.1 実船での検証・調整@2020 年度

2020年度は主に搭載した機器の動作確認と自動操船と手動操船の切替確認(フォールバックを含める)を実際の船上で実施しました。



2.7.2 実船での検証・調整@2021 年度

2021年度は自動着棧・自動離棧・航路トラッキング・および自動避航の各機能についてそれぞれモードの切替や事前に陸上で実施したシミュレーション結果との比較を行う検証・調整作業として計9回(約9日)、そのほかにも画像認識システムやセンサー単体のテストを計10回(約10日)実施しました。(※1回(1日)につき約10~12本走行しています)

- 自律化モジュール

小型船の特徴としては中～大型船と比較して加減速が容易であること、旋回性能が高いことが挙げられます。しかしながら、これらは言い換えれば少しでも制御を間違えると唐突に加速・減速が起きてしまう、予期せぬ方向を向いてしまうとも言えます。そのため、安全かつ安心できる自動操船制御を考える上では繊細な制御が求められます。今回対象となる「シーフレンドゼロ」では離棧から着棧までの操船を全て自動で行うことを制御の目標として開発を実施しました。

安全かつ安心できる操船制御を実現するためにはやはり人間の操船を真似ることだと考え、猿島航路を運航している船員さんの意見を訊きながら、岸壁を上手に利用した離棧方法・風向きや潮流に対応した着棧手前での回頭位置・猿島棧橋への進入角度など、試行錯誤の調整を行いました。特に、猿島航路は航標ブイや岩礁地帯に囲まれた狭い航路であることから、航路上を通過する相手船との避航関係が発生した際に避けるためのスペースを十分に確保しづらい環境です。そのことから、船員さんと意見交換を行いながら小型船の特徴である船の応答性の良さを生かした避航方法として、減速を含めた避航方法をシステムが演算・提案するように開発を行いました。結果として、離棧・航路トラッキング・避航・着棧の全ての機能を自動化することが出来ました。

- 画像認識システム

画像解析システムについては、船舶に搭載した汎用カメラにより検出した 1~10m 程度の小さな障害物の情報を自律制御モジュールに送信し、障害物の回避を実現することを当初の目標に設定しました。

目標に対して、実証実験では障害物として停船した全長5m の小型ボートを、市販の汎用カメラと独自の AI による物体認識技術を用いて検出し、障害物の位置情報を限定して自律制御モジュールに送信することで、自律航行中における避航が可能なることを確認しました。

実証実験に至る過程および実証実験中の課題として、検出した障害物の正確かつ安定した位置情報を自律制御モジュールに送信することが求められました。解決策として、①カメラ画像を常に水平に保つためのスタビライザーの追加、②位置情報の精度を上げるための AI アルゴリズムの改良、③自律制御モジュールに出力する情報を平滑化させるための信号処理ソフトウェアの実装、を行いました。この結果、停船中の障害物の限定した情報を自律制御モジュールに送信することが可能になりました。

- 陸上監視システム

自動化されたシステムの状態を監視するために、4G回線を通じて運航データを陸側に送信し、リアルタイムで船上と陸上のそれぞれで状態監視できるシステムを目標として開発を実施しました。今回開発した陸上監視システムは自動操船中以外でも船のデータを陸に送ることが出来、2021年2月に搭載してから約1年間の間、船の運航データを陸上に送信し続けました。

また、試験運用下での改修点として、実証実験の際に避航した際など従来の航路からの変更が行われた場合、航跡が見えないため本船の状況が把握しづらい点があったことが挙げられました。それ以外にも運用者からの視点として、本船運航下での遅延の有無、不具合が発生した(尚且つ本船との連絡が難しい)場合に早急な位置の把握、あるいは航路・主機のログをもとにした航路最適化(船員教育含む)に利用できるようなシステムが望ましいとのご意見を受け、追加の改修作業を行い、自動化された船舶に対して安全かつ実用的な監視システムを構築しました。



船上での検証・調整作業の様子①



船上での検証・調整作業の様子②



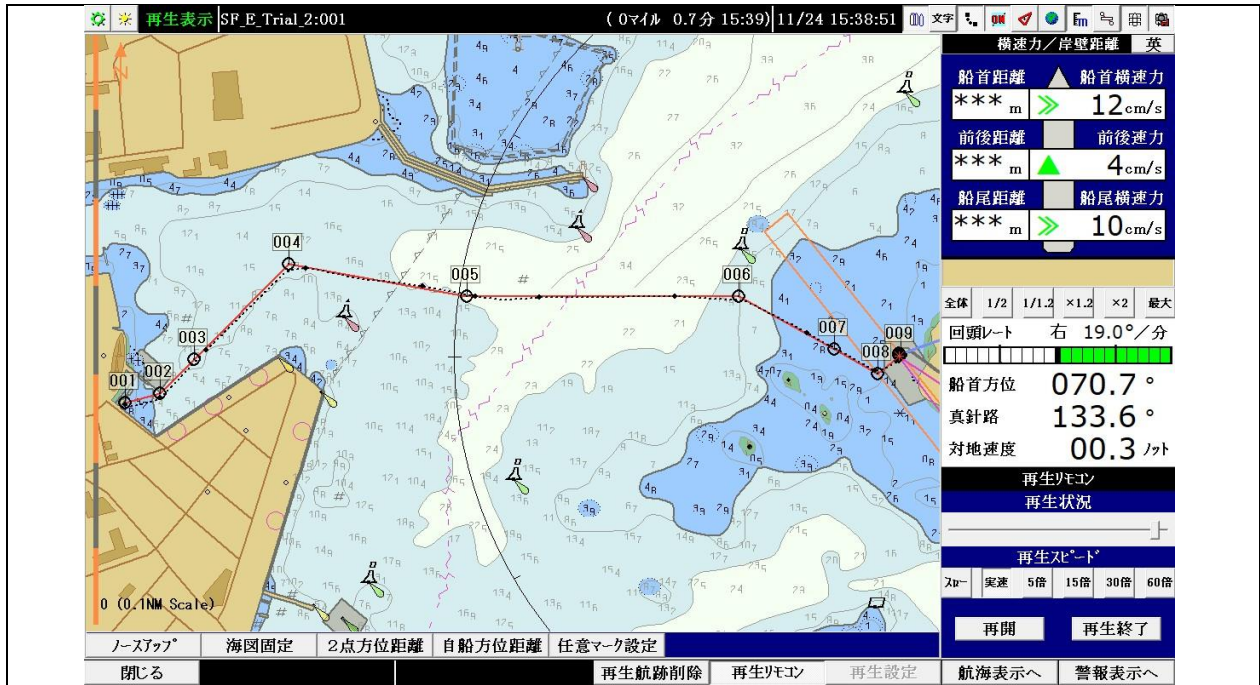
陸上監視システム調整作業の様子

2.8 実証実験

開発した各自動化機能を使い、猿島航路での離棧から着棧まですべての操船を自動化できることをテストするため、2021年11月24日(水)に無人運航の実証実験を行いました。

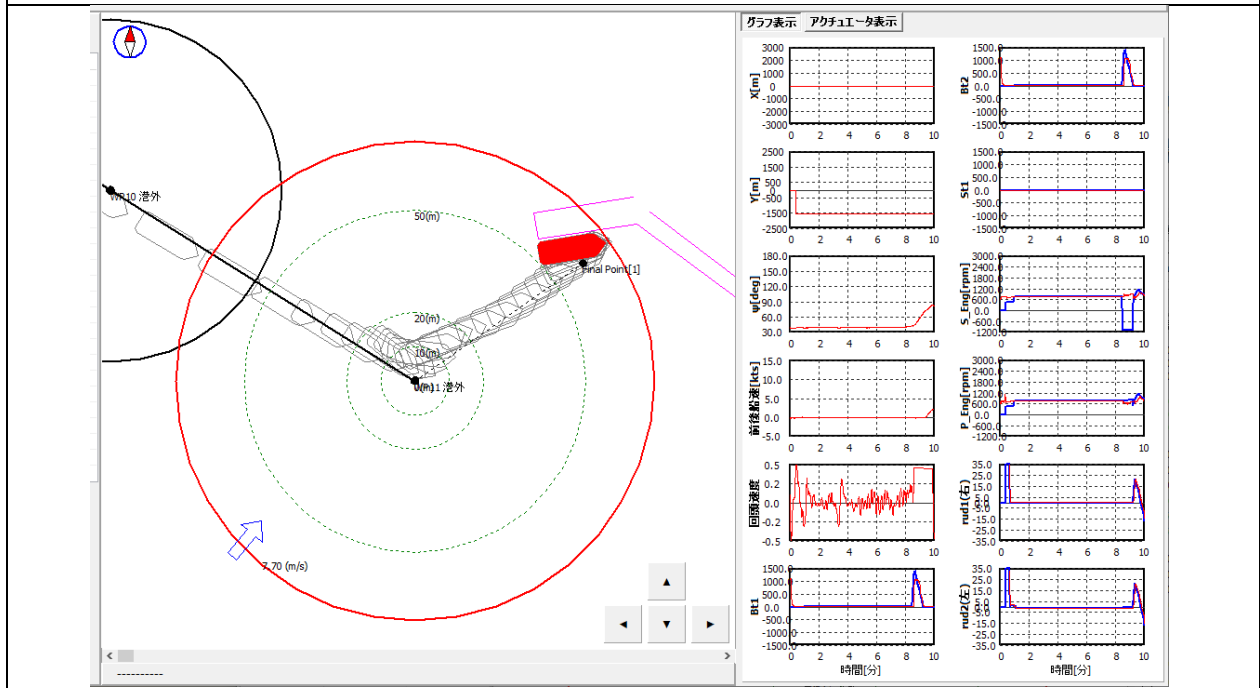
安全に実験を行うための準備として、事前に実験について航路の周辺関係者や公共機関とも十分な協議を行いました。また、実験中に自動モードで走ることが出来る条件として実験実施基準を定め、それらの基準を超過した場合は船長の判断により中止(フォールバック)できるように技術者が同乗することを含めて万全の態勢で実験に臨みました。

実験当日は午前中に各機能と安全対策について最終確認を行い、午後の実験を実施しました。実験は合計5回行い、結果として避航を含めて離棧から着棧までの操船を全て自動操船で3回成功することができました。成功に至らなかった2回については、着棧直前での突風による実施基準超過による中止判断、他船を避航中に更に別の他船が航路に進入したことにより避航ルートの再演算を行うも船長による安全を優先した中止判断としました。



実証実験の航跡

(実線が想定した航路、破線が実際の航跡、ほぼ想定通りに制御が出来る)



南西から風を受けながらの自動着岸機能の航跡@猿島棧橋

2.9 メディア向け公開デモンストレーション

実証実験の結果をもとに、2022年1月11日(火)に日本財団様と共同でメディア向けの記者会見およびデモンストレーションを実施しました。安全に実験するための実験実施基準や体制は2021年11月に実施した実証実験時と変更ありませんでしたが、当日の天候条件や航路に進入してくる可能性がある他船の有無などはその時々条件により異なります。こうした様々な条件であってもシステムが自動で対応できることが出来れば、実用的な無人運航船の技術開発が着実に進んだことを証明できると考えられます。

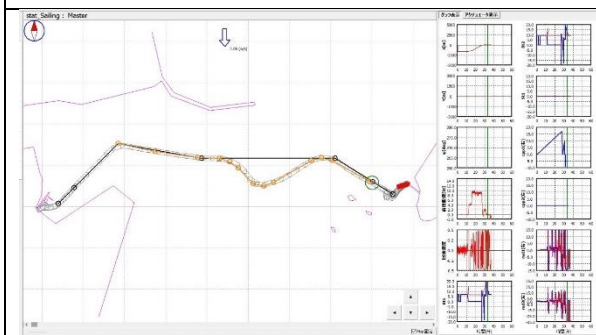
公開デモンストレーション当日はやや雨模様となりましたが、午前中は技術関係者向けに2回、午後は記者会見後のメディア関係者向けに2回それぞれ実験を行い、いずれも離棧から着棧まで避航を含めて成功しました。これは2021年11月に実施した実証実験と合わせると、7回成功したこととなります。



当日の「シーフレンド ゼロ」

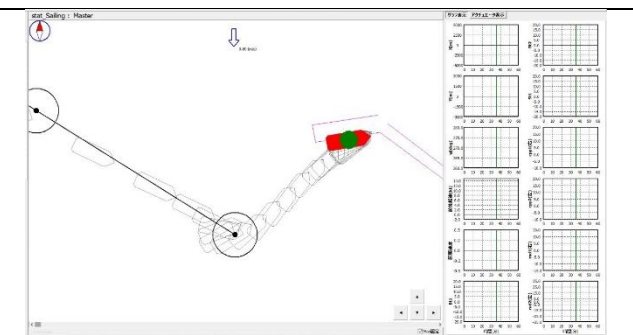


記者会見の様子



航跡図

(実線が想定した航路、破線が実際の航跡、途中で他船を避けるため航路を変更している)



自動着棧機能の航跡@猿島棧橋

(11月の実験とほぼ逆方向の風でも安定して着棧出来ている)

2.10 成果と今後の課題

【成果】

今回の事業を通じて、「小型船における無人運航船の技術」を確立する、という大きな成果を上げることができました。具体的には、小型船を無人運航化するためのシステム設計、安全性評価、関係各所との調整、シミュレーションや実船でのテスト等、様々なノウハウを積み上げることができました。

技術面では、横須賀市の新三笠棧橋と猿島間の1.7kmの定期航路にて、トライアングルが運航する既存小型旅客船「シーフレンドZERO」において、離棧・航行・避航・着棧を含めた航行の全ての操船を自動化することに7回成功し、目標を達成しました。

技術面以外では、日本財団様と協力し、2021年夏に小学生対象に実施した猿島での「無人運航船謎解きマップ」配布イベント、2022年1月11日にメディア向けに実施した実証実験公開・記者会見を通じて、無人運航船の社会認知活動も行いました。また、事業期間を通じて、安全評価等実施委員会、オープンデータプラットフォーム検討委員会当の活動にも参加、国土交通省とも意見交換する等、無人運航船のルールや規則策定に向けて、建設的な協力が行えたとも考えます。

【課題】

今回の事業では、事業期間中に開発した自律制御モジュール等を既存船にレトロフィットすることで無人運航化を実現しましたが、既存機器と新たに搭載した機器の接続に多くの時間と労力を割きました。

- この課題を解決するために、自動運航制御システムをオープンプラットフォーム化することで機器メーカー等のプレイヤー間の連携を容易にし、操船デバイス・センサー・情報系デバイス等の開発が促進するような仕組みづくりに取り組んでいきたいと考えています。
- 今回開発したシステムをより実用的にするためにも、更に多くの試行を行いながらユーザーからの意見を反映することが必要であると考えています。そのためにも今回のような小型船かつ比較的短距離航路での実験実施は、試行回数の面からも安全性の面からも非常に有益なテスト環境であると考えられます。

事業期間中を通じて、国土交通省や日本船舶技術研究協会等の関係者と相談を重ね安全に実証実験を行うことができたが、今後安心して無人運航船を走らせることができるように、ルール・制度の整備の必要性は非常に感じました。

- 今回の事業で得られた知見を還元・共有することで、ルール・制度の策定に貢献したいと考えています。

各自動化機器の課題については以下の通り:

- 自律操船モジュール
 - 着棧アプローチ時にロープが確実に届く位置で停船できるように制御パラメータおよび制御アルゴリズムについての調整が必要です。加えて、外乱への対応として猿島棧橋での向岸風(南風)および離岸風(北風)のいずれの環境下でも安定して停船制御を出来るように制御アルゴリズムを改良していく必要があります。
 - また、着棧アプローチ時に船首側のロープを繋いだ後に、ロープの力を利用した接舷が出来るように制御アルゴリズムを改良することで、より安定した自動着棧を実現できると考えられます。
 - 複数隻の他船が航行する条件下での避航や、狭い航路では航行の規則に沿わない避航ルートを提示する必要があるといった課題があることから、実用化に向けて広い海域でも狭い海域でも避航をそれぞれ両立できるような避航経路演算部の改良が必要です。

- 陸上監視システム
 - 今後の課題としては、本船に対しての安全状態をより正確に把握することが重要と考え、画像または動画の表示間隔の短縮化(通信能力やマシンスペックに依存)、周囲船舶の表示(検知可能な船舶に限られる)や本船上で発生したアラート(表示される項目は選択可能であることが望ましい)の通知といった機能を織り込むことを考えています。

- 画像認識システム
 - 次のステップとして、移動中の障害物の回避には、画像解析システムが提供する位置情報に、より高い正確性と安定性が求められます。これらを実現するために、AI アルゴリズムの更なる改良による位置情報の正確性向上と、信号処理ソフトウェアによる平滑化および安定性の向上を行い、移動する障害物に対する避航に要求される制度の高い情報にも対応可能なシステム開発を目指します。
 - また、本プロジェクトでは、小型船にも搭載可能な汎用性の高いシステムを実現するために、カメラ画像のみで状況認識を行ったが、現在では自律運航船における状況認識の在り方はカメラ、レーダー、赤外線システム等のセンサーフュージョンが主流となっています。カメラ画像に加えて、他のセンサーで状況認識の精度を補完していくのも、正確性と安定性向上の一つの方向性であるとも考えます。

3 学会発表及び論文発表

3.1 毎日新聞様からの取材@6/30

2021年07月28日付の朝刊にて掲載されました

3.2 猿島での広報イベント協力@7/22~11/30

<p>お知らせ</p> <p>Release No. 20-30 2021年7月14日 日本財団</p> <p>報道関係各位</p> <p>THE NIPPON 財団 FOUNDATION</p> <p>夏休みの小学生へ、「無人運航船」から“謎解き”の挑戦状 -7月22日より横須賀市・猿島で、楽しみながら学べる「謎解きMAP」を配布-</p> <p>日本財団（代表取締役：会長 田中康平）は、無人運航船の実用化を目指す「MEGURI2040プロジェクト」の一環として、夏の日である7月22日(水)より、横須賀市・猿島にて小学生を対象に「謎解きMAP」を配布いたします。</p> <p>日本財団は、2020年2月より世界に先駆けて「MEGURI2040プロジェクト」を実施してまいりました。今回の「謎解きMAP」は、夏休みの子ども達に最先端技術である無人運航船について知ってもらうことを目的に、家庭した小学生を対象に配布します。無人運航船の実証実験の舞台である横須賀市・猿島を巡りながら謎解きを通して楽しく、無人運航船やそれを支える最先端の技術・仕組みや、猿島の取り組みなどについて学ぶことができます。</p>  <p>●実施概要 神奈川県横須賀市の無人島「猿島」に滞在した小学生を対象に、「謎解きMAP」を配布。島内を巡りながら謎解きに繋がった3つの謎を解いてもらい、全く知らない方にプレゼントを当選します。</p> <p>【開催期間】2021年7月22日（水・祝） 海の日 ～ 8月31日 ※ただし、期間中、参加費が20,000円に達し次第終了となります。</p> <p>【開催場所】神奈川県横須賀市猿島 猿島ビジターセンター：横須賀市小田町2-16 ※猿島にはビジターセンターで乗船券（猿島公無人渡料を含む）を購入し、船で渡ります。</p> <p>【配布場所】三ツタミナル・猿島ビジターセンター 「小学生」の猿島船運乗船申請書に配布します。ご希望の場合はお母様の「大人」の乗船申請書と一緒にご持参ください。1日1名まで配布。</p> <p>【特典】全ての謎が解けた人にはプレゼントを当選 ※プレゼントには数に限りがございます。あらかじめご了承ください。</p> <p>【主催】日本財団 【協賛】横須賀市 【協力】丸紅、トライアングル、三井 E&S 造船</p> <p>1/3</p>	
<p>2021年7月14日 日本財団様 プレスリリース</p>	<p>猿島ビジターセンターに設置した展示パネル</p>

3.3 FMヨコハマ様からの猿島現地取材@8/4


<p>取材の様子</p>

3.4 テレビ東京「モーニングサテライト」様からの取材@11/20



取材の様子①



取材の様子②

3.5 SeaJapan での成果発表

2022 年 4 月に予定している SeaJapan にて成果発表を予定しています

4 特許取得状況の実績及び予定

特になし