

研究成果報告書

日本財団 会長 笹川 陽平 殿

報告日付：2022年 7月 13日

事業ID：2020562759

事業名：大型カーフェリーの無人化にかかる技術開発(2年目)

団体名：三菱造船株式会社

代表者名：取締役社長 北村 徹

TEL：045-200-6611

事業完了日：2022年 6月 30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

メンバー	本事業における主な役割
三菱造船	コンソーシアム代表、コーディネーター、開発全体計画、システム要件設定、機関室監視遠隔モニタリング・故障部位可視化による認知支援開発、システム搭載・調整、実証実験実施
MHI-ME(*1)	自動操船システム (SB-X) 開発・調整 *1：MHI マリンエンジニアリング
大阪公立大学	自動離着岸操船システム (ABMS) 開発・調整
川崎重工	操船統合制御装置 (KICS) メーカー
パイオニア SSI(*2)	岸壁測距システム開発・調整 *2：パイオニアスマートセンシングイノベーションズ
ブレインズ	物標画像解析システム開発・調整
三菱重工グループ	燃料油漏れ監視システム開発・調整、 電動機状態監視システム
アイディア	陸上監視システム開発・調整
大阪大学	離着岸シミュレーション手法開発・調整

メンバー	本事業における主な役割
新日本海フェリー(*3)	海事知見提供、システム要件設定支援、実証実験実施 *3：供試船「それいゆ」所有者・運航管理実務者
東京九州フェリー(*4)	実証実験実施 *4：供試船「それいゆ」運航者
日本海事協会	リスク評価における HAZID 事務局、規則専門家の立場で助言
海上技術安全研究所	リスク評価においてリスク評価専門家として助言

 : コンソーシアムメンバー、
 : 共同開発・実証実験メンバー、
 : メーカー、
 : 協力者

2. 研究概要及び成果

以下に、2020年度助成契約書に添付の「2020年度事業計画」に記載の目的・目標・事業内容から要旨を転記する。

(1) 目的

既存航路に就航する船を対象に、無人運航に必要な各種システム・装置の仕様を定め、開発し、試作機を設計・製作して実船に搭載し、さらに実際に運航する中で各種調整を行い、無人運航を可能にする技術を確立する。

(2) 目標

開発した自動化システムを実船に搭載して、有人監視(シャドー)での自動操船の実証実験を行う。また機関室内機器状態の無人監視を強化するシステムを実証実験期間中に実際に運用し、故障の予兆検知のためのデータ蓄積を行う。

三菱造船は、コーディネーターとして新日本海フェリー様と各種調整を図るとともに、実証実験で開発委託先とともに以下開発した各システムの機能の確認と有用性の検証を実施する。

1. 離着岸シミュレーターによる航路作成。
2. 離着岸操船システム(ABMS)による自動離着岸操船(計画航路のトレース)。
3. 自動操船システムによる離岸から着岸までの一連の自動操船。
4. 物標画像解析システムによる物標までの距離・相対方位・相対速度ベクトルの測定。実海域でのIRカメラの画像撮影機能の評価。
5. 機関室監視システムによるデータ蓄積とトレンド表示。トレンド表示については、故障予知につながるトレンド表示方法の各種試行。
6. FO 漏れ検知システムの実際の環境での検知機能の確認。
7. 電動機状態監視システムの運用と有用性の検証。

8. 機関室アラームの3D表示機能を含む陸上監視システムの有用性の検証。
また、実証実験後の開発に繋げるため、課題を明らかにする。

(3) 事業内容

三菱造船は、コーディネーターとして新日本海フェリー様と各種調整を図るとともに、開発委託先とともに以下を実施した。

1. (2)項に記載の各システムの要件設定、開発、試作機を設計・製作、搭載前試験と本船への搭載。
2. 搭載後のコミッショニング、試運転での作動確認。
3. 実証実験において、新日本海フェリー様による操船を、開発委託先と共に支援。また実験時の各種データを収集。
4. 実験時に取得したデータをもとに、改善点については実証実験期間中に改修可能なものについては改修し、その後の実証実験で確認。実証実験期間中に改修できないものについては、課題として記録。
5. 本船の営業運転航路の一部にて、出港～港外航行～入港の自動操船を有人監視(シャドー)の下で実証。
日本財団様、新日本海フェリー様との合同記者会見で、実証実験結果を公開。
6. 実証実験の結果を含め、本開発に係る報告書の作成。
7. 本事業で取得し、実験船に搭載または陸上に設置した機器の撤去と保管。

(4) 成果概要

【総括】

操船自動化については、本船の営業運転航路の一部である新門司～伊予灘～新門司の航路において、港内では横移動、後進や回頭を伴う高度な出入港、港外では高速運転(最速26ノット)でのルートトラックング／避航の自動操船実証実験を行い成功した。

機関室監視強化については、本船に搭載後、実際の営業運転状態を監視、或いは本船上の環境下で異常を模擬した試験を行い、各システムの有用性を検証した。

【各開発成果概要】

1. 離着岸シミュレーション手法 [開発委託先:大阪大学]

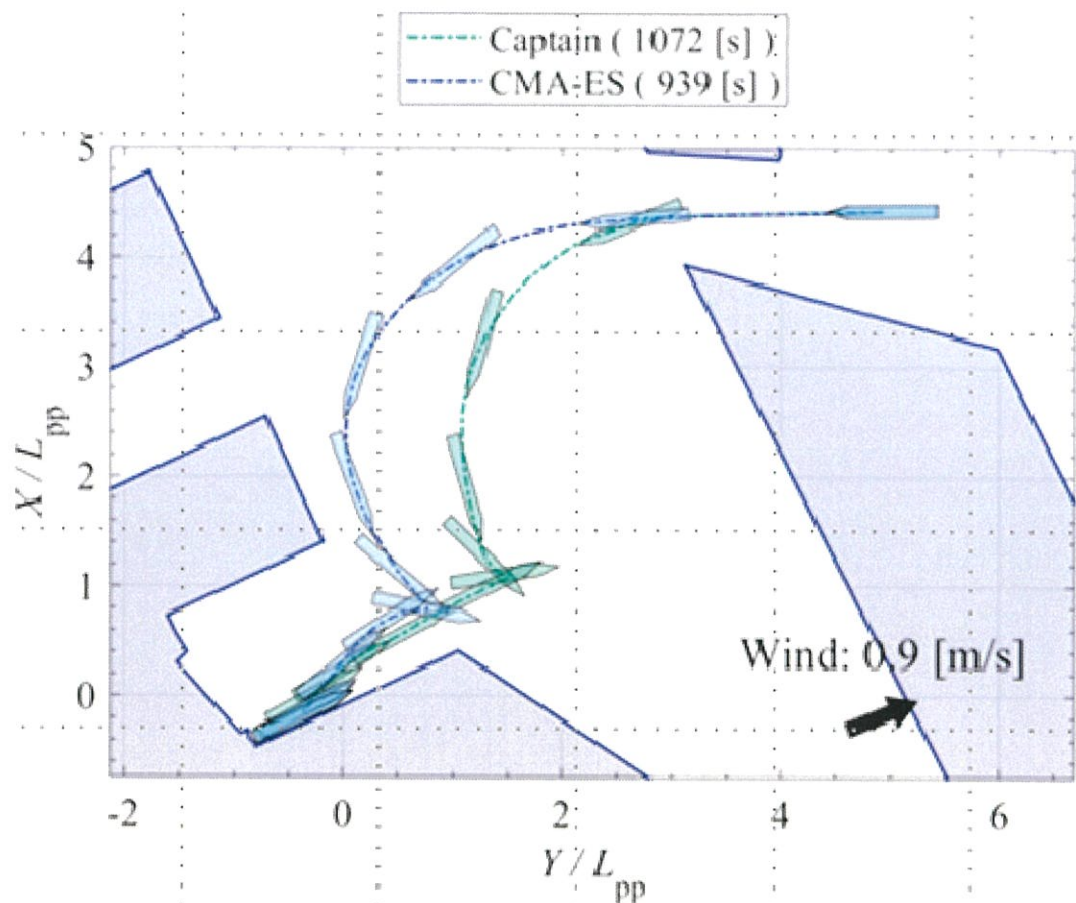
(目標)

進化計算法(CMA-ES)を用いた操縦性シミュレーションによる入出港最適航路の作成手法を開発。作成された航路について①船長経験者による計画航路、②実船航路との比較・検証を行う。

(成果)

対象船(サイドスラスト付き二軸二舵船)について入出港経路を最適化するプログラムを開発。船長による計画航路(①)に対し違和感のない航路が作成できた。また外乱下の条件でも経路の作成可能であることが確認できた。

実船の航路(②)との比較では実船より短時間で入出港する航路が作成できた。



プログラムによって作成された航路(青:プログラム作成航路 緑:船長実績航路)

2. 離着岸操船システム (ABMS: Automated Berthing Maneuvering System) [開発委託先: 大阪府立大学]

(目標)

予め設定した離着岸の計画航路にAIによる自動操船にて追従する離着岸操船システム (ABMS) の開発および本システムにて自動離着岸が可能であることを実証実験で実証する。

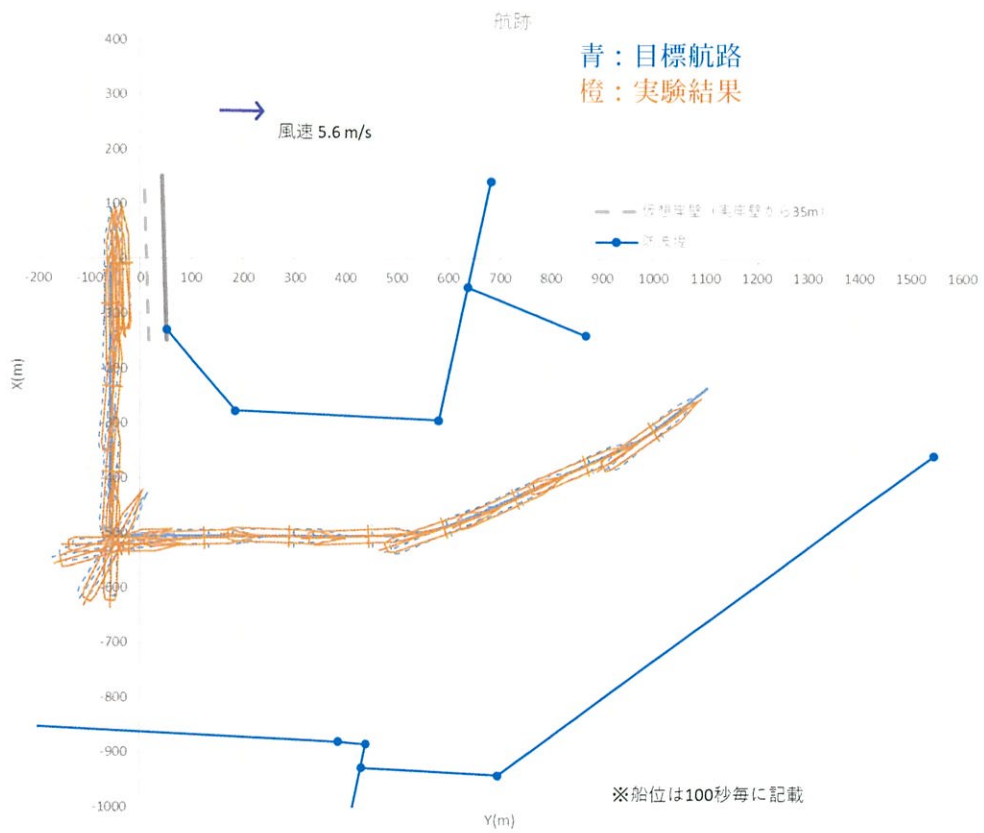
(成果)

本船用に開発した運動モデルを用いた航路トラッキングのAI学習アルゴリズムを構築し、実船搭載前にシミュレーターおよび水槽試験にて有効性を確認。

実船搭載後、障害物のない外洋での機能確認試験により実船に合わせた調整を行い、2022.1.17に実際の港内にて実証実験を行い、自動操船による離着岸操船を実証。



離着岸水槽試験状況



実証実験結果航跡 1月17日離岸

3. 操船統合制御装置(KICS) [発注先:川崎重工]

(目標)

外部システムからの操船指令を各アクチュエータへの制御指令に変換し、アクチュエータ統合制御を実現する。

(成果)

海上試運転にて操船統合制御装置を用いて、各アクチュエータへの指令値とフィードバック値を確認し、実証実験にて外部システムからの操船指令による統合制御の動作確認を実施した。

4. 物標画像解析システム [開発委託先:ブレインズ]

(目標)

IRカメラにより、船舶とその他の物標を検知し、物標までの距離・相対方位・相対速度ベクトルの測定するシステムを開発する。実海域において物標の検知ならびに測位が可能であることを実証し、性能を評価する。

(成果)

海上試運転および実証実験において、IRカメラ画像を用いた物標検知ならびに測位が可能であること実証した。IRカメラの映像により、日中のみならず夜間も物標の検知および測位が可能であることを確認した。物標は概ね2km先までは検知が可能であり、位置算出結果についてもAISデータに近い精度が得られた。一方で、物標の速度ベクトル(進路、方位)の算出精度や安定性については、課題も確認された。

5. FO(燃料油)漏れ検知システム [開発委託先:三菱重工]

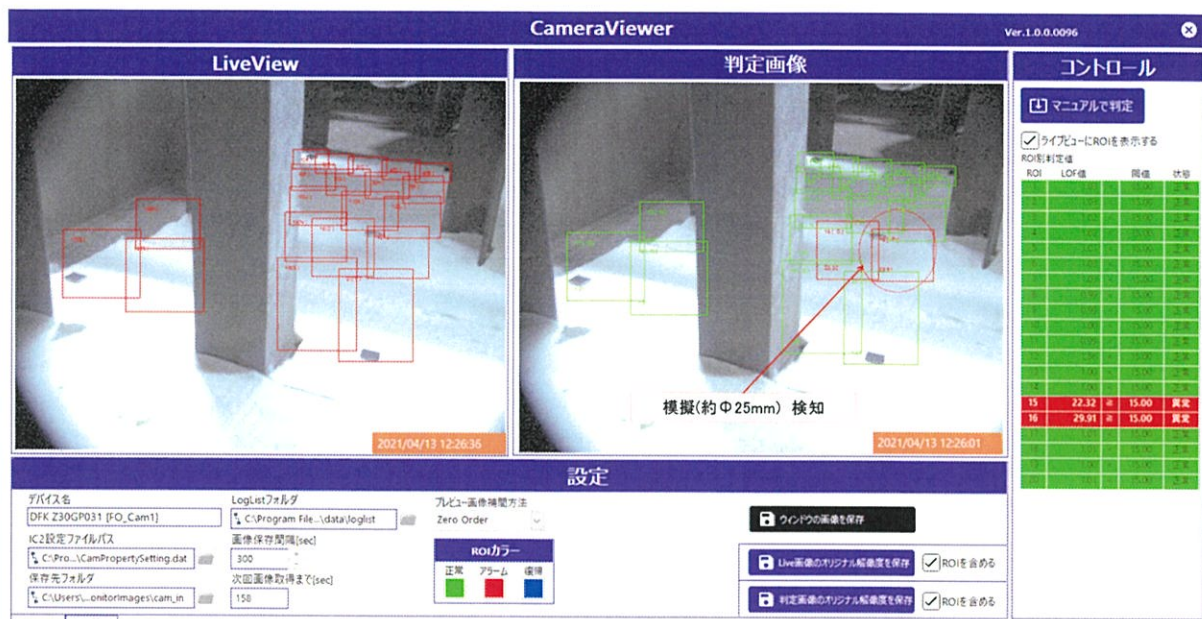
(目標)

機関員の点検の代わりに、FO(燃料油)の微量な漏れを検知し、機関室火災等の極めて危険な事故を未然に防ぐシステムをカメラと画像処理技術を用いて開発する。

(成果)

微量なFO(燃料油)漏れ(絵の具で模擬)に対して、異常検知可能なシステムを開発した。

正常画像の学習に加え、正常画像を平行移動させた画像の追加学習を行うことで、航行中の振動や主機関の振動による誤検知に対して、強いシステムとなった。



FO(燃料油)漏れ模擬検知画像

6. 電動機状態監視システム [開発委託先:三菱重工]

(目標)

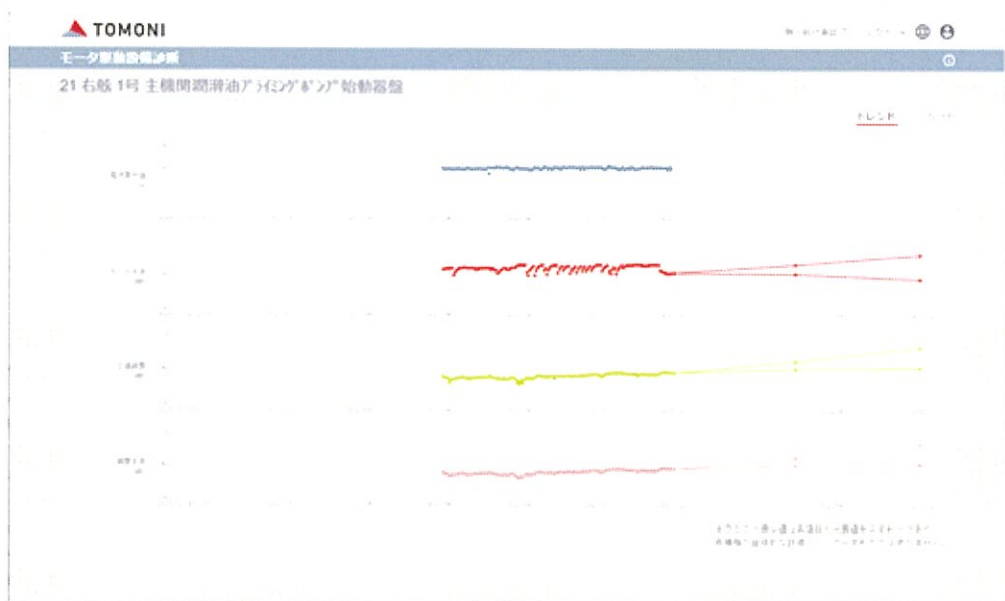
将来的に故障に繋がる兆候を早い段階で検知する事で、本格的な異常発生前段階に点検やパーツの交換を行うことを可能とし、航海中の故障を防ぐシステムを開発する。

(成果)

就航後から約半年間電流情報を取得し、将来的な異常兆候の検知が可能となった。実際にポンプの異常兆候を検知し、本船上でポンプの異音・振動を認め、その有用性が確認できた。

設備	0 該当なし(NA) 1 良好 2 軽微故障 3 注意 4 警告 5 点検推奨								
	観測			6か月後予測			12か月後予測		
	モータ本体	伝達装置	装置本体	モータ本体	伝達装置	装置本体	モータ本体	伝達装置	装置本体
19 主冷却海水ポンプ	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20 No.1 操縦機室冷却海水ポンプ	0	0	0	1	1	1	1	1	1
21 右舷1号 主機架原動機アイシングポンプ始動装置	1	1	1	1	2	2	1	5	5
22 右舷2号 主機架原動機アイシングポンプ始動装置	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23 No.1 ボイラ水船水ポンプ	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24 No.1 ボイラ水船水ポンプ	0	0	0	1	1	1	1	1	1
25 No.3 ボイラ水船水ポンプ	0	0	0	1	1	1	1	1	1

設備ステータス一覧



電動機電流トレンド・モータ/伝達装置/装置本体評価値トレンド

7. 陸上監視システム [開発委託先: アイディア]

(目標)

無人運航に必要な航路・運航・機関データをクラウドサーバへ送信し、陸上からリアルタイムで監視可能とするシステムを開発する。クラウドサーバに集約して蓄積した本船のトレンドデータは、航行データ解析や運航支援に利用可能とし、将来的には本船機器の故障予知技術開発につなげることを目論む。本システムは堅牢なサイバーセキュリティを有するシステムとして開発する。実証実験を通し、本システムの有用性を検証する。

(成果)

- (1) 下記データを船陸間通信で陸上へ送信し、Web上で監視可能とするシステムを開発した。トレンドデータについては、グラフ表示画面やCSVファイル出力機能を開発し、傾向解析を容易とした。
 - ・航海装置データ(自動操船システム[含む航路データ]、GPS、レーダー、AIS、風向風速計 等)
 - ・エンジンロガーデータ(機関トレンドデータ、警報・イベント履歴)
 - ・M0チェックリスト入力データ
 - ・機関室カメラ画像(※通信データ量の観点から、ユーザ要求時のみ送信)
- (2) 機関室の警報発生箇所を可視化(3D Viewer 上に表示)し、遠隔からも警報発生場所の特定を容易にする技術を開発した。
- (3) M0 チェックリストについて、入力用タブレット向けのアプリを開発し、入力データをクラウドサーバに集約する技術を開発した。直近だけでなく過去のチェックデータもグラフで表示可能とした。
- (4) ネットワーク負荷に軽量な、高度に完全性・真正性を確保したアプリケーションレイヤプロトコルを開発した。セキュリティテストおよびペネトレーションテストを実施し、開発したシステムのセキュリティの有効性を確認した。

8. 自動操船システム(SB-X: Super Bridge-X) [開発委託先: MHIマリンエンジニアリング]

(目標)

計画航路の自動保持および自動避航操船を実現するシステムの開発。

実証実験を通して、自動航路保持の性能および避航航路の妥当性を確認する。

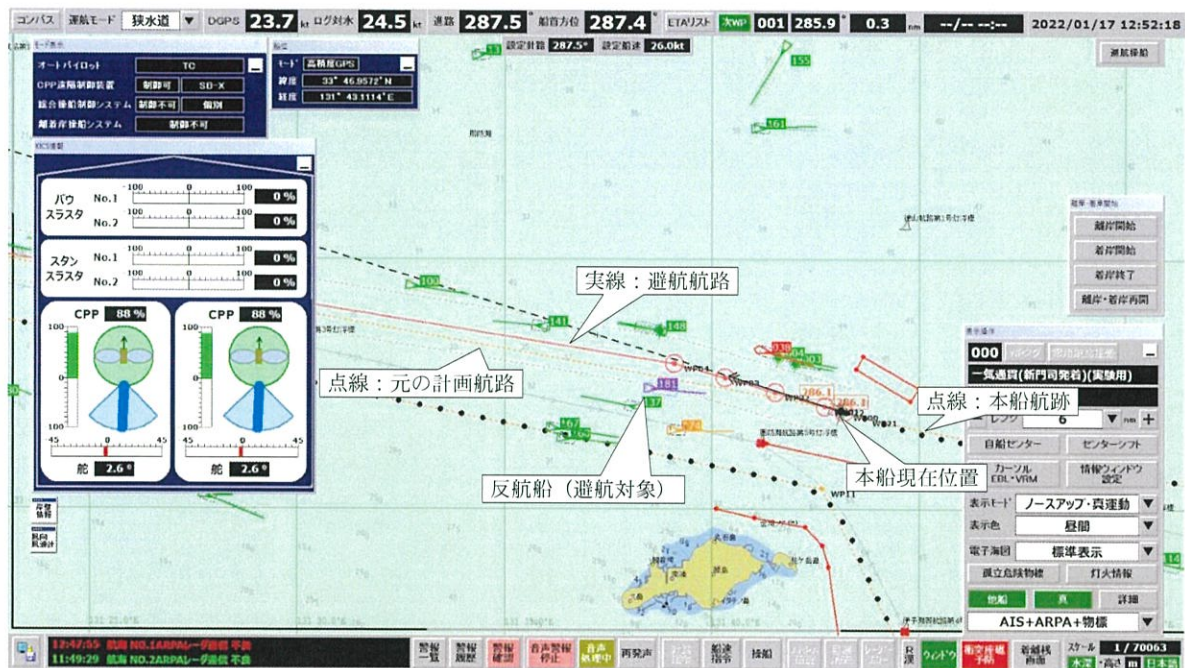
(成果)

実証実験を繰り返し実施することで、自動変針のタイミングを調整し、少しのオーバーシュートやアンダーシュートのみで航路保持することが可能となった。



計画航路トラッキング(オレンジ実線:計画航路、黒点:本船航跡)

また、自動避航に関しては、閉塞区域による衝突危険船を判定する手法を取り入れることで、より安全で適切な判定を実施する事が可能となり、避航航路候補(避航時の選択肢)を増やすことによつて、船舶が輻輳した海域でも柔軟に避航操船が可能となった。



輻輳海域における自動避航操船

(オレンジ点線:元の計画航路、オレンジ実線:避航航路、黒点:本船航跡、紫△:避航対象)

9. 岸壁測距システム [開発委託先:パイオニアスマートセンシングイノベーションズ]

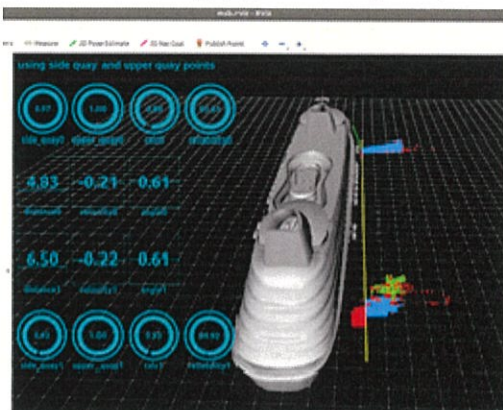
(目標)

本船側壁から岸壁までの距離を高精度で計測可能なシステムを開発する。

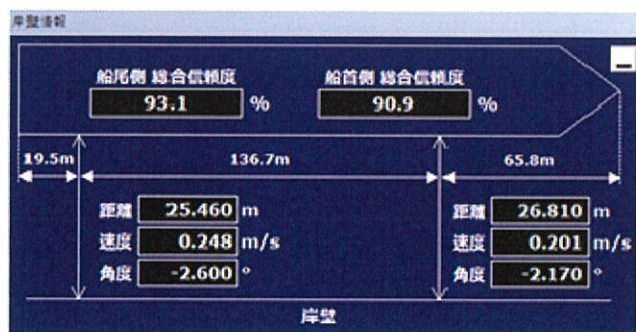
将来的には計測した距離を元に自動離着岸制御の出力決定並びに自動緊急停止のための安全装置の一つとして使用する。

(成果)

3D-LiDARを使用して岸壁形状を認識し、本船船側と岸壁間距離を測距するシステムを開発し(距離情報は3項「自動操船システム」モニター上に表示)、実際の港で測距できることを確認した。



3D-LiDAR点群データ表示



岸壁測距情報表示(自動操船システム)

10. リスクアセスメント [アセスメントメンバー: 海上技術安全研究所、日本海事協会、新日本海フェリー、MHIマリンエンジニアリング]

(目標)

設計段階でのリスクアセスメントをNKに依頼し、リスク評価(HAZID)にて安全対策が十分か確認する。

(成果)

- ・ 2020年10月にリスク評価会議を実施。
- ・ 実施済みの安全対策を考慮に入れた場合、洗い出された全てのリスクは許容される領域又はALARP領域に分類されることを確認。
- ・ 実施済みの安全対策に加え、リスク評価にて提案された追加安全対策案および今後の検討事項について可能な項目を実施。

11. 機能確認、特性把握、実証実験 [操船監視(自動操船前後の操船を含む): 新日本海フェリー、自動化システム操作・記録等・結果評価: 三菱造船他各システム開発委託先]

(目標)

本船の営業運転航路の一部の航路において、港内では横移動、後進や回頭を伴う高度な出入港、港外では高速運転(最速26ノット)でのルートトラック／避航の自動航行を実証する。

(成果)

以下の実験(機能確認、特性把握、実証実験(※))を実施した。

2021年 5月18日-21日 機能確認(五島沖、建造中)

2021年 5月25日-29日 機能確認(五島沖、建造中)

2021年 6月25日 機能確認(長崎沖、引渡後回航中)

2021年 7月26日-28日 特性把握(横須賀→新門司／新門司→横須賀、営業運転)

2021年 8月21日-22日 特性把握(新門司→横須賀、営業運転)

2021年 8月30日 機能確認(相模湾、休航日)

2021年 9月13日-15日 特性把握／実証実験(横須賀→新門司／新門司→横須賀、営業運転)

2021年 9月20日 機能確認(相模湾、休航日)

2021年10月25日 実証実験(新門司～下関南東水道No.4ブイ、休航日)

2021年11月22日 実証実験(新門司～下関南東水道No.4ブイ、休航日)

2021年11月22日-24日 実証実験(新門司→横須賀／横須賀→新門司、営業運転)

2021年12月13日 実証実験(新門司～伊予灘、休航日)

2022年 1月17日 実証実験(新門司～伊予灘、休航日)

※: 機能確認 障害物がない海域で休航日に実施。

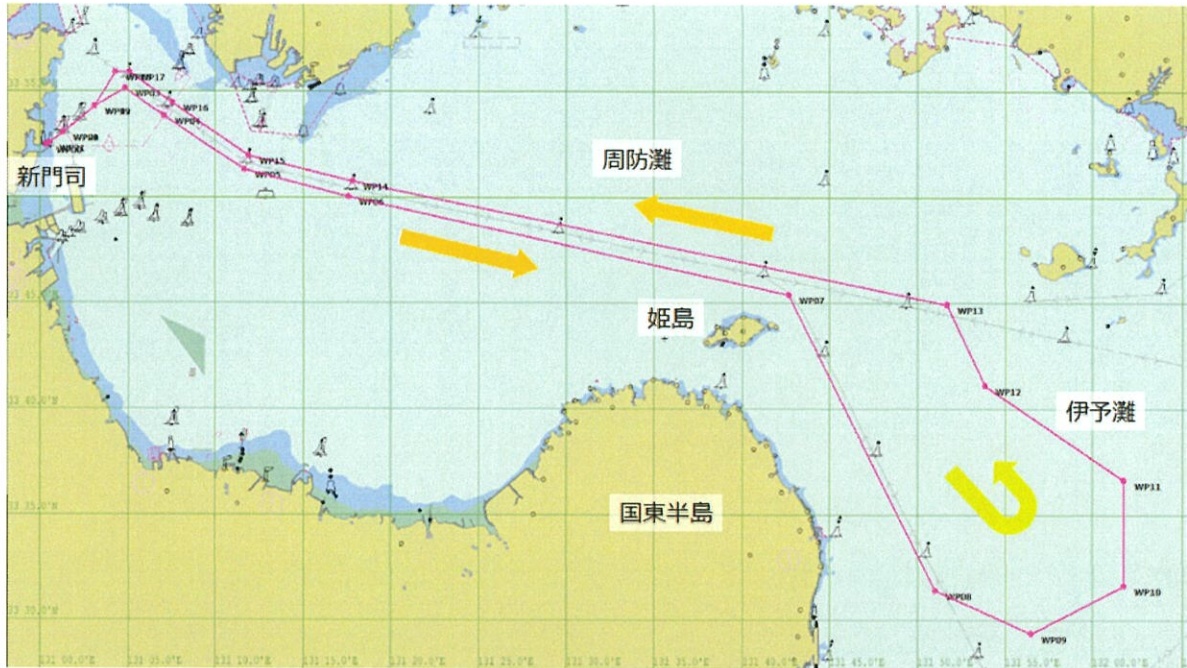
機能確認のため、認知・判断に加え、制御(避航操船)まで行う。

特性把握 本船就航航路の一部において実施。

自動避航操船機能の内、認知(他船の認知)、判断(危険船判定、避航航路作成)までを行い、妥当性を検証する。制御(避航操船)は行わない。

実証実験 本船就航航路の一部において実施。
認知・判断に加え、制御まで行う。

2022.1.17の実証実験では、本船の営業運転航路の一部である新門司～伊予灘～新門司の航路において、港内では横移動、後進や回頭を伴う高度な出入港、港外では高速運転（最速26ノット）でのルートトラッキング／避航の自動操船実証実験を行い成功。



実証実験計画航路



出港計画航路



入港計画航路



3. 学会発表及び論文発表

No.	題名	発表者	発表媒体
1	自動運航技術の開発 -MEGURI2040 無人運航実証実験 プロジェクト-	三菱造船株式会社 井上 総一郎 森 英男	ClassNK 技報 No.3, 2021(I) ClassNK Technical Journal No.3, 2021(I)
2	三菱造船の無人運航船プロジェクト について -MEGURI2040 無人運航実証実験 プロジェクト-	三菱造船株式会社 平山 拓央 森 英男	日本船舶海洋工学会誌 KANRIN(咸臨)第100号 2022 年2月
3	MEGURI2040 スマートフェリーの開 発 -大型高速フェリーによる無人運航 の実証実験報告-	三菱造船株式会社 森 英男	日本船舶海洋工学会 令和4年 春季講演会 講演論文集 第34号
4	大型高速フェリーによる無人運航の 実証実験	三菱造船株式会社 森 英男	日本航海学会誌 「NAVIGATION」7月号(予定)
5	Automation of ship berthing/unberthing maneuver based on target tracking control using Double Deep Q-Network	公立大学法人大阪 大阪公立大学	Applied Ocean Research (投稿予定)

No.	題名	発表者	発表媒体
6	Ship trajectory planning method for reproducing human operation at port	国立大学法人 大阪大学	Ocean Engineering (投稿予定)

4. 特許取得状況の実績及び予定

No.	文献番号 出願番号	出願日 公知日	発明の名称	出願人／権利者
1	特願2020-212424	2020/12/22	漏洩検知システム、漏洩検知方法及びプログラム	三菱造船株式会社
2	特願2021-147415	2021/9/10	操縦パターン特定装置、制御装置、操縦パターン特定方法及びプログラム	三菱造船株式会社、公立大学法人大阪
3	特願2021-168974	2021/10/14	情報処理装置、対象物検知装置、情報処理方法およびプログラム	三菱造船株式会社、株式会社ブレインズ

5. 活動を通じて明らかになった新たな課題と対応案

(1) 技術面の課題と対応案

シーン／ タスク	具体的な課題と対応案
離着岸シミュレーション手法	<ul style="list-style-type: none"> ・具体的な課題 <ul style="list-style-type: none"> - 航路最適化の結果、操船の短時間化はなされたが、実船と異なり大きな加減速を繰り返す経路となった。 ・対応案 <ul style="list-style-type: none"> - 他船の存在を考慮して速度を絞るなど、条件の高度化の検討。
自動離着岸操船	<ul style="list-style-type: none"> ・具体的な課題 <ul style="list-style-type: none"> - 実証実験ではタグラインを取るなど十分な安全対策を実施したが、実用化に向けては、さらに安全性の検証と改善の必要がある。 ・対応案 <ul style="list-style-type: none"> - より多くの外乱に対する計画航路への追従性の検証と改良。

シーン/ タスク	具体的な課題と対応案
物標画像解析	<ul style="list-style-type: none"> ・具体的な課題 <ul style="list-style-type: none"> - 検知範囲[BR1-1] - IRカメラの対候性(雨、雪、霧により画質が低下)[BR1-2] - 遠方や小さな物標の識別[BR1-3] - 高速で移動する物標や複数の物標が重なって映る場合の追尾処理[BR1-4] - 遠距離物標の測位精度[BR1-5] - 物標に対する移動ベクトル(進路および速度)の安定性[BR1-6] ・対応案 <ul style="list-style-type: none"> - 広角高解像度カメラ採用(ただし、高解像度の赤外線カメラは非常に高額であるため、可視光カメラも含めたカメラ構成の再検討が必要。カメラの性能・コスト、および画像処理の計算負荷増大が課題。)[BR1-1, BR1-2, BR1-3, BR1-4, BR1-5, BR1-6] - AI 学習データの見直しや、新たな追尾・測位手法の検討(ただし、画像処理の計算負荷増大や学習データ生成のコスト増大が課題)[BR1-4, BR1-6] - 測位データ変動をフィルタ処理等で更に強化[BR1-6]
陸上監視	<ul style="list-style-type: none"> ・具体的な課題 <ul style="list-style-type: none"> - Web 画面表示遅延[AM1-1] - Mac OS 不具合(メーカー要望により本PJでは iMac を通信用 PC として採用したが、OS 起因の不具合も多く、PC のフリーズやシャットダウン等が散見された。)[AM1-2] ・対応案 <ul style="list-style-type: none"> - 大量のデータを扱うのに適した仕様として、データベース構造および Web 表示処理を見直し[AM1-1] - PC の機種変更検討[AM1-2]
自動操船 (離着岸以外)	<ul style="list-style-type: none"> ・具体的な課題 <p>避航操船時に操船者の感覚や経験、プラクティスによる操船と合っていない局面がある。</p> ・対応案 <ul style="list-style-type: none"> - 条件や係数の最適化 - AIによる操船者の操船方法学習

シーン/ タスク	具体的な課題と対応案
岸壁測距	<ul style="list-style-type: none"> ・具体的な課題 <ul style="list-style-type: none"> - 実際の埠頭の岸壁認識 - センサーに塩が付着する事により測距が出来なくなる。 ・対応案 <ul style="list-style-type: none"> - 岸壁形状に適した設定 - 起動前のセンサー部の拭き取り
FO 漏れ検知システム	<ul style="list-style-type: none"> ・具体的な課題 <ul style="list-style-type: none"> - 検出エリアの環境によっては、平行移動による正常画像学習が正常な検知を妨げる場合がある。 ・対応案 <ul style="list-style-type: none"> - 画像学習時の平行移動量は必要最小限とする。(航行時の船体や主機の振動による画像のブレ度合いを確認の上決定する必要がある)

(2) データ面の課題と対応案

シーン/ タスク	具体的な課題と対応案
電動機状態監視システム	<ul style="list-style-type: none"> ・具体的な課題 <ul style="list-style-type: none"> - 将来的な故障診断を実施するため、予め大量のデータを収集しておく必要がある。船舶の場合は間欠運転を実施している電動機が多く存在しているため、データ収集期間が長くなる。 ・対応案 <ul style="list-style-type: none"> - 姉妹船や類似電動機が搭載されている船舶からのデータを流用

(3) 事業面(開発コスト等)の課題と対応策

シーン/ タスク	具体的な課題と対応案
物標画像解析	<ul style="list-style-type: none"> ・具体的な課題 <ul style="list-style-type: none"> - ハードウェアのコスト[BR3-1] ・対応案 <ul style="list-style-type: none"> - カメラ、画像処理サーバ等、性能とコストのバランスを取った、システム構成の再検討[BR3-1]
陸上監視	<ul style="list-style-type: none"> ・具体的な課題 <ul style="list-style-type: none"> - VSAT 通信費[AM3-1] - ハードウェアのコスト[AM3-2] - システム運用コスト[AM3-3] - セキュリティ開発費用コスト[AM3-4] ・対応案 <ul style="list-style-type: none"> - 廉価な衛星通信の新サービスに期待[AM3-1] - PC、タブレット等、性能とコストのバランスを取った、システム構成の再検討[AM3-2] - メーカーのサービス費、クラウド利用料等、今後の努力・検討に期待[AM3-3] - メーカーのセキュリティ開発費、セキュリティベンダーのテスト費用が高額であるため、今後の努力・検討に期待[AM3-4]
岸壁測距	<ul style="list-style-type: none"> ・具体的な課題 <ul style="list-style-type: none"> - センサーに付着したゴミや潮の自動拭き取り ・対応案 <ul style="list-style-type: none"> - センサーへのワイパーやウォッシャータンクの装備

(4) 安全面の課題と対応案

シーン/ タスク	具体的な課題と対応案
外部との通信	<ul style="list-style-type: none"> ・具体的な課題 <p>有人航行では、他船との船間連絡が頻繁に行われ、互いの意思を確認の上避航操船を行っており、また東京湾内では東京湾海上交通センターからの無線指示がある。</p> ・対応案 <p>今回のシステムでは他船または陸上からの指示には対応できない。 対応案としては、遠隔操縦による外部(他船、陸上)との通信、指示への対応が考えられる。</p>

(5) 制度面(ルールや規制等)の課題と対応案

・具体的な課題

※可能な限り、どのようなシーン、どのようなタスクの無人化に係る課題であるかも記載
(シーン例)各種無人化システムの認証 等
(タスク例)見張りシステムの評価方法、自動操舵システムの評価方法 等

・対応案

シーン例/タスク例に記載の項目は、いずれも課題の認識有るも、対応案はありません。

(6)上記の観点以外の課題と対応案

上記(1)~(5)の観点以外の課題と対応案はありません。

以上