

1 自動運航船の実用化に向けた当所の取組み

國分健太郎*, 南 真紀子*, 伊藤 博子*, 小林 充*

NMRI's Actions Toward Realizing MASS

by

KOKUBUN Kentaroh, MINAMI Makiko, ITOH Hiroko and KOBAYASHI Mitsuru

Abstract

Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) have been studied all over the world, including in Japan, where the goal is to develop and implement MASS by 2025. In March 2020, the National Maritime Research Institute (NMRI) established a team dedicated to studying MASS. Our team is evaluating the risks associated with MASS. The safety of each voyage will be evaluated with our fast-time simulation system and navigation risk simulator. The fast-time simulation system will verify the safety of automated collision avoidance using an arbitrary algorithm. The navigation risk simulator will verify the safety of an override from a computer system to the crew and also check the safety of automated pier-docking. Devices used for automated pier-docking as well as machine vision also have been studied at NMRI and will continue to be studied by our team to be implemented in MASS by 2025.

* 自動運航船プロジェクトチーム

原稿受付 令和2年5月14日

審査日 令和2年6月11日

1. はじめに

人間の主要な乗り物で、ワンマン・オペレーション、所謂ワンオペが実現されていないのは船舶だけであると言われるが、実は欧州のフェリーではワンオペ操船及び離着岸が20年も前から実施されており、欧州において自動運航船の実証実験が一昨年度に一早く実施された^{1),2)}のには、そのような土壌があったからと言える。

日本でも昨年度に日本郵船グループが与那国島一足摺間での自動運航技術の実証実験に成功し³⁾、続けて今年の1月には、西宮から東京湾のタグボートの遠隔操船に成功している。

一方、シンガポール⁴⁾、中国⁵⁾でも昨年度に、韓国⁶⁾でも今年度に自動運航船の実証実験を開始しており、自動車同様船舶でも、遠隔操船、自動化、自律化、無人化に向けた研究開発が世界の潮流となっている。

本稿では、自動運航船の実用化に向けた展望と、それに對する当所のこれまでとこれからの取組みについて報告する。

2. 将来展望と当所の目指すところ

異常事態からの復帰も含めた完全な自動化を自律化と呼び、無人化は遠隔操船もしくは自律化で達成される。船舶の分野で、このような遠隔操船、自動化、自律化、無人化の技術が実用化されるのはいつか。国土交通省は2016年からi-Shipping (Operation) として、IoT技術やビッグデータ解析を活用した船舶、船用機器に対する技術開発支援を開始し、2025年までに自動運航船の実用化を目指している⁷⁾。当所もその目標に標準を合わせて研究開発を進めていきたいが、残されている時間はそう多くない。

我が国の自動運航船の開発に当たっては、当所は国立研究開発法人として、近い将来作成される自動運航船安全ガイドラインに基づく、安全性評価を実施する第三者機関の役割を期待されている。一方、自動避航、自動離着岸及び立体視による他船検出システム（以下、マシナビジョンという）の各技術においては、2025年までに社会実装し、開発者としても社会へ貢献したいと望んでいる。

現代は情報化かつグローバル化の時代であり、革新的な技術で一国が一人勝ちするのは難しい。我が国の技術が世界標準として広く認められ、使用されるのが重要であり、それには先行している国と協調して仲間を増やし、世界標準を共に作るという作業が必要になる。つまり、この分野で先行する欧州に追い付き、歩調を同じくして協力して課題を解決していけるよう、日本の自動運航船の技術発展に貢献していきたい。

3. 自動運航船プロジェクトチーム

当所は、自動運航船を実現する上で不可欠なリスクベースの安全性評価技術を確認すると共に、自動避航、自動離着岸

等の関連技術を開発して社会実装すること目的として、自動運航船プロジェクトチーム（以下、本PTという）を立ち上げた。

安全性評価技術の確認では、未知の複雑なシステムとして開発される自動運航船のリスク解析手法を開発するとともに、多様な対象船に適用して重要な要素を取りまとめ、自動運航船安全ガイドラインの作成に取り組む。さらに、許容できないリスクへの安全対策の有効性を評価する手法を、シミュレーション技術と人間による主観的な評価手法を組み合わせ、構築する。

操船のモードは、離岸から着岸までいくつかの操船モードがある。本PTでは、避航操船及び着離岸操船に注目し、センサー、状況認識、操船判断等必要な要素機能の開発を行うとともに、これらを統合したシステムの構築を進め、シミュレーションや実海域での実験を進め、パートナーを募りながら、実用化に向けて研究を進める。

こうした状況を考慮して、以下の5つの研究テーマをメインに研究を進めることとした。

- 自動運航船の安全性評価技術の確認
- 操船リスクシミュレータの開発
- 自動運航船の機能評価のためのファストタイムシミュレーション技術の確認
- 自動離着岸技術の開発
- マシナビジョンの調査検討

ここで、ファストタイムシミュレーション技術とは、実時間よりも十分に短い時間で、数多くの数値計算を実施して現象を模擬・解明する技術である。

これらの研究テーマに対応した本PTの主な任務は次のとおりである。

「国土交通省は2016年からi-Shipping (Operation) として、IoT技術やビッグデータ解析を活用した船舶、船用機器に対する技術開発支援を開始し、2025年までに自動運航船の実用化を目指している。この事業に国立研究開発法人として貢献するため、下記にあるような、自動運航船を実現する上で不可欠なリスクベースの安全性評価技術を確認すると共に、自動避航、自動離着岸等の関連技術を開発して社会実装すること。また、PT内の取り組み、又は、PT外の取り組みを統合した戦略とビジネスモデルを立案することで、成果の社会実装を駆動すること。

1) 自動運航船の安全性評価技術の確認

実証実験用に開発される自動運航船の安全性評価を実施して、自動運航船の離岸から航海、着岸までの一連の航行過程におけるリスクベースの安全性評価技術を開発し、自動運航船の実現に貢献すること。

2) 操船リスクシミュレータの開発

上記1)の安全性評価において、操船リスクシミュレータをツールとして活用するために必要な機能を洗い出して同シ

ミュレータに追加・更新すること。また、同ミュレータを活用した事前検証を実施して、自動運航船の実現に貢献すること。

3) 自動運航船の機能評価のためのファストタイムシミュレーション技術の確立

上記1)の安全性評価において、自動運航船の機能のうちファストタイムシミュレーションを通して検証する必要があるものについて、検証方法についての知見を集め、必要なファストタイムシミュレーション技術を整備すること。また、整備したファストタイムシミュレーション技術を活用して実際に機能を検証することで自動運航船の実現に貢献すること。

4) 自動離着岸技術の開発

2019年度に開発した自動着岸技術をさらに進化させ、AIを活用した着岸ルートの自動探索技術とルートに沿った自動着岸制御技術を確立すること。また、船用機器メーカー等の協力を得て自動離着岸装置を試作するとともに、内航船への搭載試験を実施して自動離着岸装置の社会実装を行うこと。

5) マシンビジョンの調査検討

自動車等で行われているマシンビジョン障害物検知システムの調査を行うとともに、2019年度に開発した立体視他船検出・位置推定システムをさらに進化させ、他船候補画像検出後の処理によって、船舶画像のスクリーニング、前後左右画像中の同一船舶の対応付けを精査することにより船舶のトラッキング性能を向上させ、自律運航システムへの信頼性のある他船情報出力を行うアルゴリズムを検討し実装すること。」（令和2年3月1日海上技術安全研究所運営会議資料より抜粋）⁸⁾

4. 自動運航船の安全性評価技術の確立

安全性を評価するにあたり、安全とは何かを確認しておく。国際標準化機構（ISO）及び国際電気標準会議（IEC）が発行した安全側面に関する指針によれば⁹⁾、安全とは「許容できないリスクがないこと」と定義される。また、リスクとは「危害の発生確率と危害の程度の組み合わせ」とされ、これらは安全に関する基礎として広く参照されている。従って、安全性評価では、人や財産、環境などに対してどれだけの危害を与えるかを推定し、その許容可否について判断を行う工程、すなわちリスクアセスメントを行うこととなる。

リスクアセスメントの手順も同指針に示されている。ごく簡単にいえば、ハザードと呼ばれる危険源を特定し、それらに伴うリスクを推定、結果が許容できるかを判断、許容できなければリスク低減対策を考え効果を推定、これらの内容を文書化することである。この考え方は、海事分野でも国際海事機関などにより導入され、FSA（Formal Safety Assessment）をはじめとする安全性評価手法が定着している。

さて、このような評価技術を自動運航船に対して確立する場合、技術的な壁は多くあるが、以下の三点が重要とされている。

第一に、対象となる自動運航船が現存しないため、そのリスクが未知なことである。そこで、リスクが既知の既存船と、想定する新規船で異なる部分—おそらくは新たな機能—を明確化し、差異に伴うリスクの増減を算出することで新規船のリスクを推定する方法などがある。差異だけとはいえ定量的に算出することは難しいため、半定量的な方法を含め対象に応じた推定手法を選定する必要がある。

第二に、対象船と既存船の差異が主にソフトウェアに関連することである。リスクアセスメントの手法は技術の発展に即して開発された経緯から、主に機械などのハードウェアを想定している。ハードウェアでは、対象システムの構成や故障などを直接観察でき、理解や整理を行いやすい。一方、ソフトウェアが中心のシステムでは、各モジュールの役割やモジュール間の相互作用が複雑で、直接の観察もできず直感的な理解に基づく解析が難しい。現在では、このようなシステムを対象とする解析アプローチも導入されつつある。当所では、自動運航船に適した解析手法について、様々な事例を通して研究、開発を行っている^{10),11)}。

第三に、結果に対する許容可否の判断が難しいことである。新規船のリスクを精緻に算出することが難しい中、ハザード毎のリスクを指標などで半定量的に推定する場合、これらを総合して既存船と比較することは困難である。その場合、新しい機能ごとにリスクの増減を確認し、増加の際は低減策をとることなどが考えられる。ここで、対策による効果を推定するためには、対策後を想定したリスクの推定が必要となり、前述のソフトウェアを中心とする自動運航船の役割や相互作用に関する解析技術がさらに重要となってくると考えている。

5. 操船リスクシミュレータの開発

自動運航船の技術レベルは、システムが情報収集の一端を担い、判断及び操船は乗組員が行う現在のようレベルから、どのような条件においてもシステムが判断し操船を行う完全な自律自動運航船のレベルまで、いくつかの段階に分けることができる。そして、完全な自律自動運航船のレベルに到達するまでの過渡期においては、乗組員とシステムの関りを考慮した安全評価を行うことが必要となる。例えば、運用範囲が定められているシステムでは、範囲外となった場合乗船している乗組員（バックアップ要員）、もしくは遠隔による操船に移行することになる。

操船リスクシミュレータの開発は、このように、システムの制約や不具合のため乗組員が制御を引き継ぐ場合、安全評価では適切な意思決定に必要な情報や時間が確保されていることを確認するために必要である。また、実海域実験では再現が難しい環境やトラブルを含め、様々な条件を検証するために必要である。

本PTでは安全評価に操船シミュレータを活用するのに必要な機能を検討し、既存の操船シミュレータの拡張及び新規操船シミュレータを整備する。

自動運航船の機能のうち、操船シミュレータの評価対象と

なるのは次の機能である。

- A) 自動操船（離着棧，航行，荒天下操船，避航）
- B) 遠隔監視及び操船
- C) 非常時操船
- D) 係船支援

また、シミュレータに必要な機能としては、下記が考えられる。また、構成を図-1に示す。

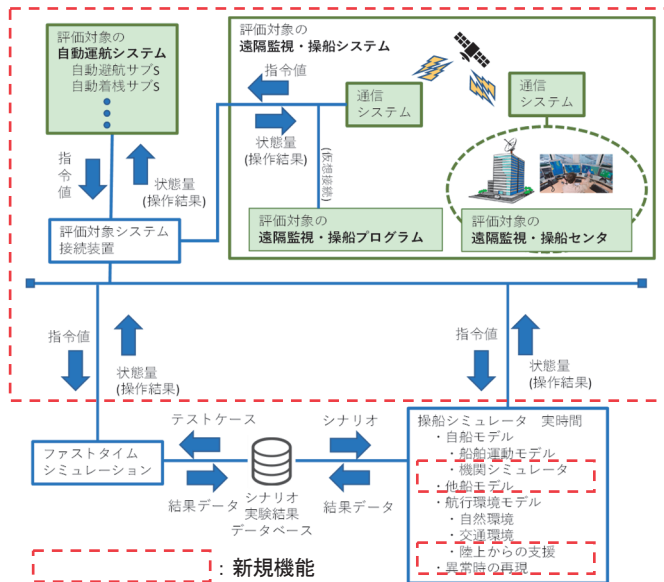


図-1 新規船舶シミュレータの構成

①自動操船

- ・ 任意の自動船舶プログラムの接続
- ・ 評価対象に対応した船体運動モデルの組み込み

②遠隔監視及び操船

- ・ 遠隔通信システム
- ・ 情報提示機能の再現
- ・ 通信速度、データの欠損等の再現

③乗組員への操船の移行、HMI（Human Machine Interface）の評価

- ・ 情報提供機能の再現
- ・ 操船切り替え装置及び機能の再現
- ・ 評価対象に応じた表示デバイスと操作デバイスの再現

④各種情報の組み込み

- ・ 他船への自動避航機能の組み込み
- ・ 各種センサ情報の作成
- ・ 評価対象に合わせたセンサ情報の生成
- ・ 情報の精度（ノイズ、データ欠損、更新間隔等）の再現
- ・ エンジン、推進器、操舵装置の組み込み
- ・ 詳細なモデルに基づく再現及び異常動作の再現
- ・ 非常時イベントの発現機能
- ・ センサ、機関、電源の故障等を再現

⑤テスト環境

- ・ テストケース作成機能
- ・ 操船結果及び各種指標値の解析結果の表示

なお、操船シミュレータに、物標検知及び位置情報計測等

のセンサ情報の評価シミュレーション、避難シミュレーション及びファストタイムシミュレーションを加え、総合シミュレーションシステムとして整備する予定である。次節でファストタイムシミュレーションについて説明する。

6. 自動運航船の機能評価のためのファストタイムシミュレーション技術の確立

自動運航のための各種プログラムの安全評価では、多種多様な条件下で機能の確認を行う必要があり、乗組員の関与を考慮する必要がない場合には実時間を短縮した計算が可能でファストタイムシミュレーションを用いることが有効である。シナリオの設定や評価法について様々な検討が行われており、当所でも所内で開発された避航アルゴリズム¹²⁾を用いて評価システムの検証を進めている。

避航アルゴリズムを対象とした場合、1対1の遭遇による基本機能の検証では、見張りが行われる範囲内で相手船の相対位置、針路、速度を網羅的に設定することで、有限のシナリオとして設定することができる。また、複数の船舶との遭遇の場合は、1対1の遭遇の中で避航操船が困難だった状況を組み合わせたシナリオや、過去の研究等を参考にしたシナリオ、自船の周辺に他船をランダムに発生させその中を一定時間以上航行させるシナリオ等が考えられる。また、評価法は、実験時に取得された航跡や操船記録を用いて従来の最接近距離（DCPA, Distance of Closest Point of Approach）や最接近時間（TCPA, Time of Closest Point of Approach）、衝突危険度¹³⁾などを用いた評価法、ノルウェーを中心に提唱されている法令への適合性を評価する方法¹⁴⁾等と組み合わせることが考えられる。なお定量評価を行う場合は、最接近距離の最小値が何マイル以上であれば問題なしと判断するか等のしきい値の設定も重要な課題となる。詳細は講演16に記載しているので、併せて御確認頂きたい。

7. 自動離着棧技術の開発

当所では、着棧操船支援機能と自動着棧制御機能を備えた着棧操船システムを開発している。昨年度は、当所の実験船「神峰」（図-2）を用いた操縦性試験を因島周辺海域で実施し、低速域操縦運動数学モデルに対応した神峰の操縦流体力同定を行った¹⁵⁾。操縦はPCが制御し、安定した操船を実施した。潮流や風等の外乱影響下で計測した異なるエンジン回転数およびクラッチ操作を行った航行データから、離着棧操船アルゴリズム開発に必要な精度を有するシミュレーション環境を構築した。また、自動着棧プログラムの開発速度と品質の向上を目的として、神峰に搭載された制御システムの通信エミュレータを開発した。さらにエミュレータは、シミュレーション中にリアルタイムに船舶の運動状態を可視化する機能とロギング機能を有する。このエミュレータにより、陸上で操縦運動シミュレーションを用いて開発されたソフトウェアをそのまま変更なしに実船のシステムにつないで制御することが可能となり、自動着棧プログラムの開発工数と不具合の発生頻度を大幅に削減した。また、経路を4つ



図-2 神峰の外観と操縦席



図-3 船影検出例（上：左舷カメラ，下：右舷カメラ．船首マストや荷役設備の一部が映り込んでいる）

の区間に分け制御モードを切り替える自動着棧プログラムを開発した．着棧操船時の経路設定にはベジェ曲線を採用することで制御開始時の姿勢によらず，設定された着棧位置までの滑らかな経路を自動で生成することができる．また，音声情報を活用した着棧操船支援システムを開発した．神峰にこれらのシステムを搭載して実施した着棧操船の音声支援機能の被験者実験，及び自動着棧の実船試験について，講演17に記載しているので，併せて御確認頂きたい．

8. マシンビジョンの調査検討

当所では，マシンビジョンについて研究を実施しており，深層学習によるカメラ画像からの他船やブイ等の影像（以下，船影）の検出，及び立体視手法で左右画像の比較による他船位置の推定を行い，GUI 等に出力するシステムを開発している．

システム構成として，内航商船に一般的な監視カメラ（SONY SNC-EP580，1920pixel，3倍ズームで利用）を間隔25mで左右舷に搭載し，画像と航海計器出力を収録している．GPU（NVIDIA GeForce1080Ti×2）を搭載したWindows PCで撮影から位置推定まで1s程度で処理できることを要件として開発している．

船影の検出においては，これまで深層学習アルゴリズムや画像前処理の工夫により，32pixel（前述のシステムで1mile

先の10mの物体に相当）以上の船影に対して95%程度の再現率で検出している（検出例を図-3に示す）．また，他船位置推定においては1mile先の物体に対し距離推定精度±2%程度となっている．

これまでは各静止画を独立して処理してきたが，既にPTの任務で述べた通り今後は自律運航システムに信頼性のある出力ができるよう開発を行う．避航のためには他船等の位置の推定だけでなく，速度ベクトルの推定とその安定性が求められる．そのためには画像や解析結果の時間軸方向での分析を行う必要があり，アルゴリズムの検討と実装を行うこととしている．

本技術の実用化に向け，製品開発のパートナーを募集している．

9. まとめ

これから実用化が期待される自動運航船の将来展望と，日本の研究開発において当所に期待されている役割と，それに対する当所の取組みを解説した．

国土交通省は，2025年までに自動運航船の実用化を目指している．当所では，これまでも，自動避航，自動離着棧及びマシンビジョンの研究開発を継続して実施してきたが，今後の自動運航船の実用化に当たっては，国立研究開発法人として，安全性評価を実施する第三者機関の役割も期待され

ている。そこで自動運航船プロジェクトチームを立ち上げ、自動運航船の安全性評価技術の確立、操船リスクシミュレータの開発、自動運航船の機能評価のためのファストタイムシミュレーション技術の確立、自動離着岸技術の開発、マシンビジョンの調査検討の5テーマをメインに研究を進め、第三者機関としての安全性評価を実施すると共に、自動避航、自動離着岸及びマシンビジョンの各技術の製品開発を通じた社会実装を目指している。

参考文献

- 1) <https://response.jp/article/2018/12/03/316815.html>
- 2) https://www.youtube.com/watch?v=JW57ZMjL_fc
- 3) https://www.nyk.com/news/2019/20190930_01.html
- 4) <https://www.wartsila.com/media/news/07-11-2019-intellitug-project---autonomous-harbourtug-takes-a-big-step-towards-reality-2605038>
- 5) <https://www.afpbb.com/articles/-/3259811>
- 6) <https://www.nna.jp/news/show/2031460>
- 7) https://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji07_hh_000109.html
- 8) 自動運航船 PT の任務について 0301【運営会議資料】r2.docx, 海上技術安全研究所運営会議資料, 2020.
- 9) ISO/IEC: Guide 51 Safety aspects – Guidelines for their inclusion in standards, 2014.
- 10) 柚井智洋他: 船舶事故の要因分析への STAMP/CAST の適用, 日本船舶海洋工学会春季講演論文集, 2020.
- 11) 塩苅恵他: 自動運航船のリスク解析手法の構築に向けて, 日本船舶海洋工学会春季講演論文集, 2020.
- 12) 間島隆博他: 自動避航操船の計算アルゴリズムの開発, 海上技術安全研究所報告, Vol. 19, 別冊第 19 回研究発表会講演集, pp. 73-76, 2019.
- 13) 例えば 小林弘明, 遠藤真: 船舶避航操縦の解析-人間・機械系解析の観点より-, 日本航海学会論文集, 第 56 号, pp. 101-109, 1976.
- 14) Woerner, K. et al.: Quantifying protocol evaluation for autonomous collision avoidance, Autonomous Robots, Vol.43, pp.967-991, 2019.
- 15) Saito. E. et al.: Maneuvering Motion Simulation to Support Berthing Operation of Small Crafts, The 2nd International Conference on Maritime Autonomous Surface Ship – ICMAS, 2019.