

令和 5 年度 防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

研究成果報告書

波浪中応答解析と実験技術を利用したHMD 操船シミュレータ開発

令和 6 年 5 月

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所が実施した令和5年度「波浪中応答解析と実験技術を利用したHMD操船シミュレータ開発」の成果を取りまとめたものです。

1. 委託業務の目的

1. 1 研究課題の最終目標

実海域波浪中での操船訓練による安全性向上を目標として、実海域環境を物理的・視覚的に再現できる没入型マルチメディアとしてのヘッドマウントディスプレイ（HMD）型操船シミュレータのプロトタイプ構築を目指す。HMD シミュレータに搭載する波浪中船体応答シミュレーションプログラムでの船体運動の再現精度（誤差 10%以内）、及び、実際の操船訓練に利用可能な動作性能（実船スケールでの遅延 1s 以内）等を確保することを目指して、水槽試験との比較及び体感試験によって検証し実用化の見通しを得る。

1. 2 最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題

本研究課題のコア技術は、波浪中での船内環境を現実さながらにシミュレートしてデジタル空間に再現することにある。現在の操船シミュレータは主に輻輳海域を想定しているため波浪中には対応していない。波浪中での船内環境をシミュレータ上に再現するには、波浪を入力としたときの船体運動を取得して、シミュレータ上に表示する必要があるが、荒天波浪中でのシミュレーションを行う数値ツールの精度に課題があり、システムが構築できていなかった。本研究では、申請者らが開発をリードしてきた波浪中船体応答のシミュレーション技術、及び波浪中での水槽実験技術を利用して、操船訓練等に資する HMD 型操船シミュレータのプロトタイプ構築を目指す。

最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題は以下と整理される。

- ① HMD シミュレータの構築
- ② 波浪中水槽実験によるシミュレータの精度検証
- ③ HMD シミュレータの体感試験による検証

1. 3 要素課題に対する実施項目及び体制

- ① HMD シミュレータの構築（担当：（国研）海上・港湾・航空技術研究所）（要素課題①に対応）

申請者らが開発した、ポテンシャル理論に基づくパネル法と離散化手法の一つである粒子法（SPH）をハイブリッド利用して微小波及び極大波で流体構造連成を解析できる波浪中船体応答シミュレーションツールを、HMD シミュレータ利用に向けブラッシュアップする。この数値ツールは、対象とする波高に応じて数値シミュレーションプログラムを使い分けることで迅速に計算を行なえるという特徴を有している。微小波については 3 次元パネル法、極大波については粒子法を用いる。微小波中での計算については、申請者らが作成したパネル法のプログラムを不規則波中時刻歴で解析できるように改良する。ここでは船舶運動による diffraction and radiation 波を考慮した波を再現する。極大波中については、スラミング等の非線形荷重を再現するため、これに再現できる粒子法 SPH 法を利用する。構造体モデルと SPH 流体モデルの間の境界変位と水圧を伝達するために、結合モジュールを開発する。B-SPLINE 補間によって構造モデルの境界変形を SPH 流体モデルの境界粒子変位にマッピングする。さらに GPU 並列計算を利用して計算効率を高める。極大波中においては、リアルタイムの数値計算が困難であるため、予め計算した波－船体応答のデータベースを利用する等の工夫をする。これにより実海域の波浪のプロファイルと船体応答を時間領域で出力する。

数値ツールの改良と同時に、解析結果を HMD シミュレータに組み込むためのインターフェイス及び GUI（グラフィカルユーザインターフェイス）を作成する。VR ヘッドセットで扱うことができる 3D 船舶海洋モデルを汎用ソフトウェア Unity3D 等で作成する。波情報及び船舶応答を含むシミュレーション結果は C# 等で作成するインターフェイスを通じて 3D モデルにインポートする。計算スピードの問題を克服するため GPU サーバを用いる。

操船シミュレータとしては、動揺装置を設けなくとも HMD からの視覚情報だけで実用に耐えうる可能性があり、また成果普及を考えた場合 HMD のみのシステムの方が有利であることから、HMD 単独で成り立つよう開発を目指す。しかし、動揺がある場合とない場合とでどの程度の体感の差が生じるかを確認することはシステム開発において重要と考えられるため、

動揺装置（モーションプラットフォーム）を併用できるシステムとし、比較等検討を行い、HMD 単独システムの可能性を探る。

シミュレーション精度（波浪中の船体運動において水槽試験との誤差が 10%以内）、及び、動作性能（波と船体応答との時間誤差が実船スケールでの遅延 1s 以内で動作すること等）、を確保することを目指し、水槽試験との比較及び体感実験でそれぞれ検証する。

② 波浪中水槽実験によるシミュレータの精度検証（担当：（国研）海上・港湾・航空技術研究所）（要素課題②に対応）

数値シミュレーションプログラムの精度検証を目的とした波浪中模型実験を、研究代表者の所属機関の所有する造波水槽で行なうことを計画する。大波高中での船体運動の再現と同時に、船体振動の再現も視野に入れ検討する。計測項目は、波浪場、船体運動、船体加速度とし、操舵室位置に 360 度対応型のカメラを設置する。水槽実験での波浪環境は、規則波及び不規則波とする。加えて、実運航船が遭遇したシビアな海象も候補とする。

水槽実験は最終年度（R5）に行うことを計画し、その前年度（R4）に模型船を準備することを計画する。

③ HMD シミュレータの体感試験による検証（担当：（国研）海上・港湾・航空技術研究所）（要素課題③に対応）

HMD シミュレータの検証のための体感試験を計画する。製作者等による体感試験は随時行い、最終年度（R5）には有識者による体感試験を計画する。体感試験のアンケート調査等に基づいて、実用化に耐えうるほどのシミュレータの動作、映像リアリティー等の性能を確保することを目指す。

④ プロジェクトの総合的推進（担当：（国研）海上・港湾・航空技術研究所）

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、プロジェクト全体の進捗状況を確認し、3ヶ月に一回の割合で複数名による進捗報告会を実施する。また、必要に応じて外部有識者を招聘して意見を聞くなど、プロジェクトの推進を図る。本委託業務の実施により得られた成果について、国内外の学会等において積極的に発表し、本研究の更なる進展に努める。

2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

粒子法プログラムによる波浪中船体応答シミュレーションを行い、水槽試験との比較によって船体運動の誤差が10%以内であることを示した。数値シミュレーションによる計算結果をHMDデバイスで再現して、実際の操船訓練に利用可能な動作性能が確保できていることを見極め、HMDデバイスの開発者及び一般ユーザによる体感試験を行って実用化の見通しを得た。

3. 委託業務における研究の方法及び成果

① HMDシミュレータの構築

粒子法プログラムによる数値シミュレーションで得られたデータをHMDデバイスに組み込むため必要なインターフェイスプログラムの作成、グラフィカルユーザインターフェイス（GUI）の作成等を行い、波浪中の操船環境を模擬したHMDシミュレータのプロトタイプを完成させた（図1）。モーションプラットフォームとの連携により、波浪中船体動揺も再現可能とした。

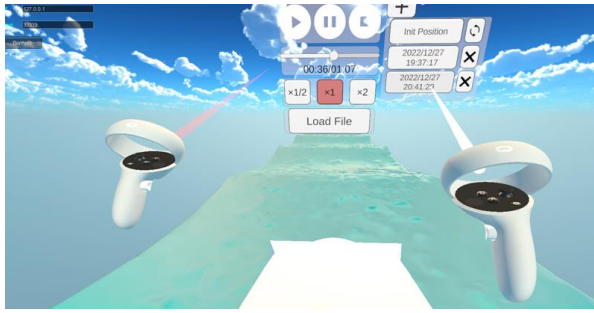


図1 HMDシミュレータのプロトタイプ（左：規則波中、右、実海域不規則波中）
（動作性能確保（実船スケールでの遅延1s以内）の目標を達成）

② 波浪中水槽実験によるシミュレータの精度検証

粒子法プログラムによるコンテナ船の波浪中応答シミュレーションを実施して、粒子法の推定精度及び計算速度を向上するためのプログラム改良を行なった（図2）。また、実船に利用されている「フライングビュー」で水槽試験の鳥瞰映像を取得した（図3）。模型実験あるいは実船において、鳥瞰映像をHMDシミュレータで再現する機能を作成できる見通しを得た。

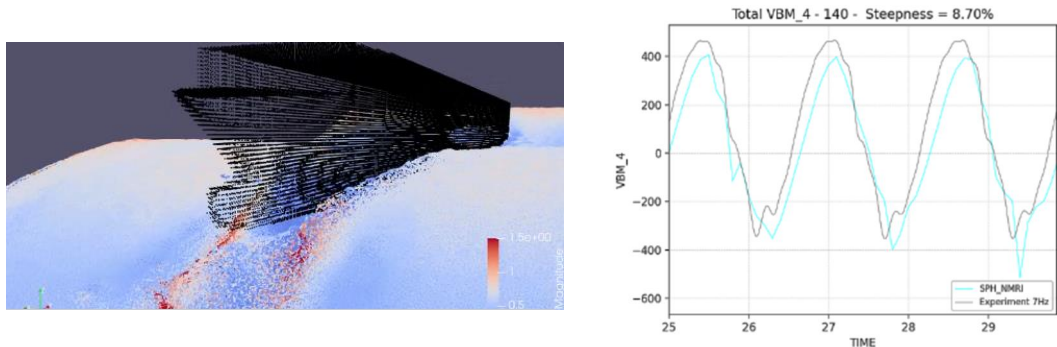


図2 粒子法波浪中シミュレーション（左）及び縦曲げモーメントの計算例（右）
（誤差10%以内の目標を達成）

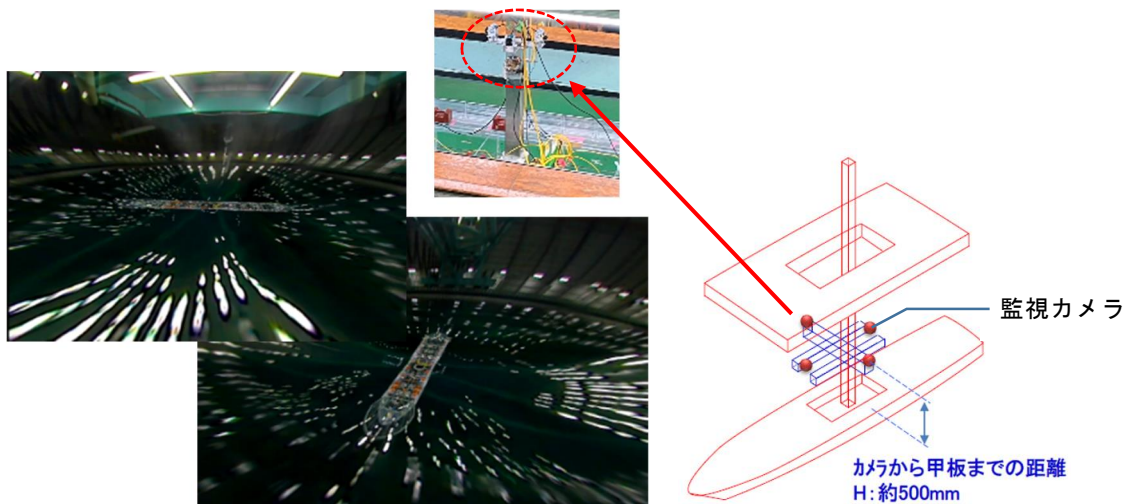


図3 フライングビューで取得した鳥瞰映像

③ HMDシミュレータの体感試験による検証

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所海上技術安全研究所での研究発表会等の場を利用して、一般ユーザ及び有識者にシミュレータを体感してもらい、波浪中を想定した操船訓練やこれに続く事故防止に有益であろう、との評価を得た。また、画面上でのレーザポインタ式コントローラによる操作性やHMDデバイスの装着に要する時間、HMD操作中の閉塞感等の課題が抽出された。

4. 委託業務全体の成果

4. 1 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や、目標を超える成果

データベースを構築するため粒子法の計算を行う必要があるが、計算時間の関係で波浪や操船パターン数を確保できないことが分かり、これを解決するため検討を行った。図4のイメージ図のように、流体と船体の粒子間の存在するUnphysicalな隙間（Gap）をダミー粒子で埋めることにより、図5及び図6に示すとおり、計算精度の向上が図られ、粒子サイズ（径）を半分にした計算と同レベルでの精度の計算結果を得る事ができた。これによって計算時間で約8倍（粒子径の3乗）の高速化を実現した。高速化を図る計画は当初からあったが、ダミー粒子を採用したこと及びダミー粒子の物理パラメータやサイズ・配置等を工夫するなど試行錯誤により、目標とした計算時間を半分以上にすることができ、目標を超える成果を得た。この成果を国際ジャーナルに投稿した。

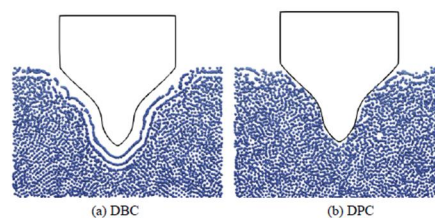


図4 従来法（左）及びダミー粒子によるUnphysical Gap解消（右）

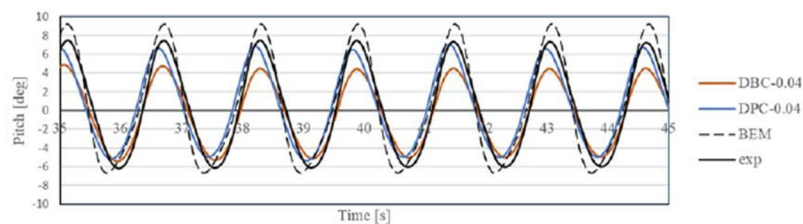


図5 大波高中での船体運動の時刻歴シミュレーション結果
（従来法（DBC）よりもダミー粒子法（DPC）の方が実験（exp）に近く、高い精度を得ている）

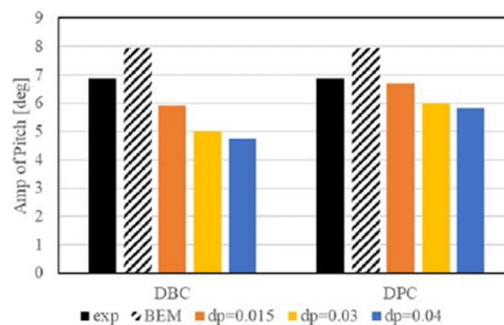


図6 従来法（DBC）とダミー粒子法（DPC）の計算精度
（DPCにより約2倍の粒子サイズで同精度が得られる。→計算速度の高速化に寄与）

4. 2 研究課題の発展性（間接的成果を含む）

海難事故や船体損傷に起因するような荒天波浪中での乗船は、船員であっても経験することは稀であり、事故時の波浪環境や、難所と称される海域の波浪環境を再現できるシステムデバイスを構築し、これを公開したことの意義は大きい。一方、実海域の波浪や船体にリアリティーを持たすため、数値シミュレーションのメッシュを確保する必要があるが、特に時々刻々変化する不

規則海面の描画に想像以上にデータ容量を要するため、実用化のためにはデータの圧縮形式やインターフェイスの改良などして高速化を図る必要があることが分かった。また、VRデバイスは没入感のメリットが有ると同時に閉塞感があるため、外部とのコミュニケーションを採ることが難しい。操船訓練においては指導者と対象者のコミュニケーションが重要であり、改善する必要がある。また、VRデバイスの操作にはある程度の慣れが必要で、初めてのユーザにとっては操作がストレスになる。汎用性のあるPCやタブレットへの移行あるいはMRへの機能拡張を図ることが重要と考えられる。

本研究で得られた知見と成果を踏まえて、今後、荒天中での操船に対応したデジタルツインシミュレータの実用化に向けた研究開発を行い、操船訓練やモデルベース設計への活用により船舶の安全性向上を図るとともに、リアルタイムシミュレータによる遠隔支援及びこれに続く無人化船の実現に貢献する。

4. 3 研究成果の発表・発信に関する活動

研究代表者の所属する機関（海上・港湾・航空技術研究所／海上技術安全研究所）で開催した発表会のポスターセッション等を利用して、一般のユーザにシミュレータを体感してもらい、波浪中を想定した操船訓練やこれに続く事故防止に有益であるとの評価を得た。

5. プロジェクトの総合的推進

5. 1 研究実施体制とマネジメント

該当なし

5. 2 経費の効率的執行

該当なし

6. まとめ、今後の予定

波浪中操船シミュレータに組み込む時刻歴シミュレーションプログラムの高速化のための改良及び水槽試験による検証を行い得られた成果を公表した。時刻歴シミュレーション結果をVRで再現するためのユーザインターフェイスを作成してシステム化することによりHMD型の波浪中操船シミュレータを具現化した。今後、本研究の成果を利用して、荒天中での操船に対応したデジタルツインシミュレータの実用化に向けた研究開発を行う。

7. 研究発表、知的財産権等の状況

（１）研究発表等の状況

種別	件数
学術論文	3件
学会発表	2件
展示・講演	2件
雑誌・図書	該当なし
プレス	該当なし
その他	1件

(2) 知的財産権等の状況

該当なし

(3) その他特記事項

該当なし