大型船の操縦性能を小型練習船で再現する

操船制御システムの開発

岩切 敬晃*・岡崎 忠胤**・鹿島 英之**・榎野 純**

Development of Ship Control System which Reproduce Large Vessel's Manoeuverability Using Actual Training Ship

Takaaki IWAKIRI, Tadatsugi OKAZAKI,
Hideyuki KASHIMA and Jun KAYANO

Abstract

In this paper, a ship handling simulator was proposed by developing a control system which reproduced a large vessel's maneuverability on an actual training ship. In the control system, the large vessel's maneuverability was predicted by mathematical model and predicted ship's heading angle and speed were traced by feedback control algorithm. The effectiveness of the developed control system was indicated with results of actual sea test. Moreover, the effectiveness of the developed ship handling simulator was indicated by comparison experiment with a visual ship handling simulator.

Keywords: Predictive control, ship handling simulator, Mental Workload

キーワード: 予測制御, 操船シミュレータ, 精神的負荷

1. はじめに

近年、映像システムを用いた操船シミュレータが、操船訓練に広く利用されてきている。操船の初心者にとっては、船舶の大きさ、種類、積載状態の違いにより操縦性能が変化することを理解するために、操船シミュレータ訓練を行うことは有効である。また、操船者を養成する教育機関では、教育機関附属の練習船を利用した実習を行っている。実船による実海域での訓練は、映像システムを用いた操船シミュレータとは異なる緊張感⁽¹⁾がある。この練習船実習において、操船シミュレータのように練習船以外の操縦性能を体感することができるようになれば、操船者教育においてさら

に有効な実習となる可能性がある。

そこで本研究では、東京海洋大学附属練習船「汐路丸」(以下本学練習船)にて任意の大型船舶の操縦性能を再現する操縦性再現制御システムの研究開発を行うこととした。練習船にて大型船の操縦特性を再現する研究としては、岩崎等⁽²⁾が、練習船の操縦特性を大型船の操縦特性に疑似化するシステムを開発し実船実験を行っている。同システムにおいては、練習船の応答遅れを考慮していないため、船速制御の追従が遅れる結果となっていた。そこで、本研究では練習船の応答遅れを考慮した制御アルゴリズムを開発することとした。そして、開発した操縦性再現制御システムと映像シス

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

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

テムを用いた操船シミュレータで被験者実験を行い、当該システムの訓練者への影響を検討することとした。

本報告では、まず 2 章で開発した操縦性再現制御システムについて示し、3 章で当該システムを用いた実船制御実験結果を示す。そして、4 章で操縦性再現制御システムと映像システムを用いた操船シミュレータでの被験者実験の結果を示し訓練者への影響についての検討結果を示す。

2. 操縦性再現制御システム

本学練習船の主な航行海域は東京湾内であることから、大型船がスタンバイ・エンジンの状態での変針および旋回の操縦性能を再現することを目的に、操縦性再現制御システムの開発を行った。操縦性再現制御システムの構成概要は Fig.1 に示す通り大型船の舵角入力装置、大型船の操縦運動予測システム、練習船の追従制御システム、練習船から構成される。

2.1 大型船の操縦運動予測システム

本システムでは、大型船の変針と旋回運動を取り扱うので、操縦運動モデルの座標系は、Fig.2 に示すとおりとし、状態変数を船体の前後方向速度(u)と横方向速度(v)、船体回頭角速度(r)、船体中心の南北位置(x)、東西位置(y)、船首方位(ψ)とし、制御変数を舵角(δ)とした。大型船の操縦運動を予測するモデルとして MMG モデル⁽³⁾の適用が考えられるが、操船シミュレータで利用している様々な船種を対象に MMG モデルのパラメータを入手することは困難であった。そこで本研究では、MMG モデルの一部を簡易化し、船舶の主要目等の情報からパラメータを推定できる操縦運動モデル⁽⁴⁾を利用した。

大型船の操縦運動予測システムでは、舵角の値を操縦運動モデルに入力し船体運動を予測する。しかし、舵角入力装置からは現在の舵角値しか入力されないため、現在の船体運動しか算出できない。そこで本システムでは、現在の舵角値が将来も保持されるとの仮定の下、数十秒先までの船体運動を算出する。Fig.3 に本システムでの船首方位の予測例を示した。図中の灰線は舵角の時系列を示し、黒線は船首方位の時系列を示

Fig.1 Outline of the ship control system

Fig.2 Coordinate system

Fig.3 Example of predicted heading angle

す。Fig.3 において操船開始から 10 秒経過した時点で舵は右 10 度となっている。この時、本システムでは、舵角 10 度が保持されると仮定して図中の黒色の点線で示される船首方位を予測する。その後、毎時、本システムでは船首方位の予測計算を行うが舵角値に変化が無いので予測される船首方位は黒色の点線のままとする。そして操船開始から 170 秒経過した時点で舵角-10 度が入力された時、本システムでの船首方位の予測は黒色の実線の通りに変化する。

2.2 練習船の追従制御システム

練習船の追従制御システムでは、大型船の運動予測システムから出力された予測値を制御目標として追従制御を行う。本研究では、大型船の変針と旋回運動を取り扱うので船首方位の追従制御を行うが、大型船舶

の旋回運動時には速力が減少するので、船速の追従制御も行う。そこで本システムでは、大型船の操縦運動予測システムから出力される大型船の船首方位を目標値とし、練習船の船首方位を舵で制御する方位追従制御と大型船の操縦運動予測システムから出力される大型船の船速を目標値とし練習船の船速を可変ピッチプロペラ(CPP)の翼角で制御する船速追従制御を行う。

2.2.1 方位追従制御

本システムでは練習船のシステムの応答遅れを考慮し、大型船の将来の船首方位を制御目標とするが、具体的に何秒先の予測値を制御目標とするかを検討する必要がある。本研究では、操舵を開始してから旋回運動を始めるまでの時間をシステムの応答遅れ時間と考え、この応答遅れの時間だけ将来の大型船の船首方位を予測し方位追従制御の目標値とした。そして、大型船の船首方位予測値と現在の練習船の船首方位の差を偏差とし、以下に式を示す位置型 PID 制御則⁽⁵⁾を利用して練習船の指令舵角を出力することとした。

$$\delta_S(t) = -K_p \{ yaw(t) + \frac{1}{T_I} \int yaw(t) d\tau + T_D \frac{d}{dt} yaw(t) \} \quad (1)$$

ただし、式中の $\frac{d}{dt}$ は時間微分を意味し、 K_p は比例ゲイン、 T_I は積分時間、 T_D は微分時間である。 yaw は偏差であり

$$yaw(t) = \psi(t+T) - \psi_S(t) \quad (2)$$

となる。ただし、 T はシステムの応答遅れ時間、 ψ_S は練習船の船首方位である。

2.2.2 船速追従制御

本システムの船速追従制御では、大型船の操舵時に速力が減少する事象を練習船で再現することを目的としている。そこで方位追従制御の際、大型船の操縦運動予測システムで船速の減少が予見されたときに、予測された船速を目標値として船速追従制御を行う。船速追従制御においても、練習船の応答遅れを考慮し、練習船の CPP の翼角制御信号を出力してから船速が変

化するまでの時間を応答遅れ時間と考え、この応答遅れの時間だけ将来の大型船の船速を予測し船速追従制御の目標値とした。そして、大型船の船速予測値と現在の練習船の船速の差を偏差とし、練習船の CPP の指令翼角を出力することとした。なお、舵制御では舵角 0 度の状態から偏差に応じて左右に舵を制御するが、CPP の翼角制御では、翼角は 0 度ではなく前進速力を維持する状態から偏差に応じて翼角の値を増減させる。そこで、偏差の時間微分値に応じて操作量の変化分を出力する速度型 PID 制御則を利用して練習船の CPP の指令翼角を出力することとした。

$$\frac{d}{dt} \theta_p^*(t) = K_p \left\{ \frac{d}{dt} e(t) + \frac{1}{T_I} e(t) + T_D \frac{d^2}{dt^2} e(t) \right\} \quad (3)$$

ただし、 $\frac{d}{dt} \theta_p^*$ は練習船の CPP 指令翼角の変化分、 e は速度の偏差であり、

$$e(t) = u(t+T) - u_S(t) \quad (4)$$

となる。ただし、 u_S は練習船の船速である。よって、CPP 指令翼角の値は、現在の CPP 翼角(θ_p)に CPP 指令翼角の変化分を加え出力する。

$$\theta_p^*(t) = \theta_p(t) + \frac{d}{dt} \theta_p^*(t) \quad (5)$$

3. 実船制御実験

本研究で開発した操縦性再現制御システムの動作を検証するため、実海域での実船実験を行った。

3.1 実験設定

実験では Table.1 に主要目を示す大型コンテナ船を対象船舶とし、このコンテナ船の 20 度変針および 35 度旋回試験の操縦性能を本学練習船で再現することとした。本学練習船「汐路丸」は、対象船舶のコンテナ船より旋回指数および追従性指数の値が良く、スタンバイ・エンジンの船速でのコンテナ船の操縦運動性能を再現することが可能である。

本学練習船は、Fig.4 に概要を示すリアルタイム制御システムが装備されており、計測制御サーバーにノート PC を接続することにより、ノート PC から練習船を操船制御できる。実験では、ノート PC にゲーム用のハ

ンドルを接続し、コンテナ船の操舵を行うこととした。操縦性再現システムの方位追従制御アルゴリズムと船速追従制御アルゴリズムの制御ゲインは、練習船の操縦運動モデルでシミュレーションを行い調整した。各ゲインは固定ゲインとし、方位追従制御アルゴリズムにおける各ゲインの値は、 $K_p:0.8$ 、 $T_I:1000$ 、 $T_D:10$ 、速度追従制御アルゴリズムにおける各ゲインは $K_p:5.0$ 、 $T_I:10.0$ 、 $T_D:1.0$ とした。

Table.1 Principal dimensions of the container ship

Length over all	201.00m
Breadth	27.10m
Draft	9.50m
Gross tonnage	25000ton

Fig.4 Outline of real-time control system

3.2 実験結果

20 度変針実験結果の舵角と船首方位の時系列をそれぞれ Fig.5、6 に示した。図中、コンテナ船の値を黒色で示し、練習船の値を灰色で示した。Fig.5 に示すコンテナ船の舵角は、事前にシミュレーションを行い 20 度変針に適切な操舵時系列を求めておき、その値を入力したものである。この舵角入力に対し予測されたコンテナ船の船首方位が、Fig.6 に示すコンテナ船の船首方位である。このコンテナ船の船首方位を目標値として方位追従システムから出力された舵角の時系列が Fig.5 の練習船の時系列である。そして制御の結果、練習船の船首方位は、Fig.6 に示すとおりコンテナ船の船首方位と一致している。

次に 35 度旋回実験結果の航跡を Fig.7 に示した。図中、コンテナ船の値を黒色で示し、練習船の値を灰色で示した。コンテナ船と練習船の航跡の最大誤差は 20m 以下であり、コンテナ船の船幅 (27m) 以内に抑えること

ができた。35 度旋回実験時のコンテナ船と練習船の船速の時系列を Fig.8 に示した。Fig.8 に示すコンテナ船の船速は、旋回運動に伴い減速している。この船速を目標値として船速追従制御を行った結果が Fig.8 に示す練

Fig.5 Time series of rudder angle

Fig.6 Time series of ship's heading angle

Fig.7 Tracks of turning circle

Fig.8 Time series of ship speed

習船の船速である。Fig.8 より、コンテナ船の将来の船速を目標値として制御を行っているため、追従遅れは発生していないことは読み取れるが、練習船の船速に振動が観測された。これは、シミュレーションモデルと実船とのモデル誤差によるゲイン調整不足が原因であると推測できる。

4. 被験者実験

本研究で開発した操縦性再現制御システムが操船者に与える影響を確認するため、操縦性再現制御システムと操船シミュレータで比較実験を行った。実験では、両システムにて同一シナリオを被験者に実行させ、その運航パフォーマンスと精神的負荷を計測した。

4.1 実験設定

実験で操縦船を再現する対象船舶は、実船制御実験で利用したコンテナ船と Table2 に主要目を示すばら積み船とした。実験シナリオは障害物の無い海域で、それぞれの対象船舶で、右 20 度変針を行いその後、左 20 度変針を行うこととした。実験の際、被験者は航海士役としてブリッジのコンパスの前に立ち、操舵号令をクォーターマスターに出し、本船を操船することとした。被験者は本学の 3 級海技士免状所有の大学院生 6 名とした。

実験では運航パフォーマンスを計測するために、船舶の状態変数および制御変数である指令舵角の時系列を操船シミュレータシステムおよび操縦性再現制御システム上で記録した。そして、シナリオ実施時の被験者の精神的負荷を計測するために、一つのシナリオが終了する毎に、NASA-TLX⁽⁵⁾のアンケートを実施した。

操縦性再現制御システムを用いた実験は、被験者が本学練習船の実習航海に乗船した時に実施した。そして、操船シミュレータを用いた実験は、後日、被験者が本学の操船シミュレータで訓練を受ける際に実施した。

Table.2 Principal dimensions of the bulk carrier

Length over all	185.00m
Breadth	28.40m
Draft	8.00m
Gross tonnage	22000ton

4.2 実験結果

4.2.1 運航パフォーマンス

実験で計測された運航パフォーマンスの結果の一例としてコンテナ船とばら積み船の船首方位の時系列をそれぞれ Fig.9、10 に示した。図中、操縦性再現制御システムの操船結果を黒色で示し、操船シミュレータの結果を灰色で示した。

Fig.9 のコンテナ船での操縦性再現制御システムの船首方位の変化を見ると、1 回目の変針でのオーバーシュートが大きくなっている。これはコンテナ船の操縦性能を把握していなかったことが原因と推測できる。よって 2 回目の変針では、学習効果がでておりオーバーシュートが抑えられている。しかし操船シミュレータでの船首方位の変化を見ると、1 回目および 2 回目の変針ともにオーバーシュートが少ない。この結果の差は、操船シミュレータには回答角速度計が装備されているが練習船には装備されていないことに起因すると推測される。事実、操船シミュレータでの実験時はほとんどの被験者が頭上に設置されている回答角速度計を見ていたことが実験時の観察記録として残っていた。この操縦性再現制御システムでの 1 回目の変針でオーバーシュートが大きくなる傾向は、被験者 6 名中 5 名で観測された。なお、操縦性再現制御システムでの 1 回目の変針でオーバーシュートが大きくならなかった被験者は、航海士としての経験が 5 年以上あった。

Fig.9 Time series of Container ship's heading angle

Fig.10 Time series of bulk carrier's heading angle

一方 Fig.10 に示すばら積み船での操縦性再現制御システムの船首方位の変化を見ると、1 回目および 2 回目の変針でオーバーシュートが大きくなっている。これは、ばら積み船の特有の操縦性能を 1 回の変針で学習しきれなかったことが原因と推測できる。操縦性再現制御システムの 2 回目の変針でもオーバーシュートが大きくなってしまった被験者は、6 名中 2 名であった。なお、この 2 名の被験者は航海士としての経験が無い被験者であった。

以上のことから、操縦性再現制御システムと操船シミュレータの運航パフォーマンスの結果については、回頭角速度計の設備の有無に起因する差以外に無いと推測でき、操縦性再現制御システム固有の訓練者への影響は無いと考えられる。

4.2.2 精神的負荷

操縦性再現制御システムと操船シミュレータの操船後に行った NASA-TLX アンケートから精神的負荷を推定したコンテナ船の結果とばら積み船の結果をそれぞれ

Fig.13 Container ship's Mental Work Load

Fig.14 Bulk carrier's Mental Work Load

Table.3 T authorization point

Parameter	T authorization point
SHIOJI-SIM(CT)	0.171
SHIOJI-SIM(BC)	0.229

Fig.13、14 に示した。図中、縦軸に最大値を 100 とした精神的負荷の値をとり、横軸に各被験者の操縦性再現制御システムでの精神的負荷を黒色で、操船シミュレータでの精神的負荷を灰色で示した。Fig.13 および 14 に示した操縦性再現制御システムと操船シミュレータでの操船時の精神的負荷に差異があるか、T 検定を行った。T 検定の結果は Table3 に示すとおりいずれの場合もその値は 0.1 以上となり、操縦性再現制御システムと操船シミュレータでの操船時の精神的負荷に有意差は見られなかった。

以上のことから、20 度変針というシナリオにおいては、操縦性再現制御システムを利用することで、被験者に操船シミュレータ利用時以上の精神的負荷を与えることは無いと推測できた。

5. おわりに

本研究では、本学練習船にて任意の大型船舶の操縦性能を再現する操縦性再現制御システムの研究開発を行った。練習船のシステム応答遅れを考慮した追従制御システムを開発することにより、コンテナ船を想定した 20 度変針および舵角 35 度旋回の実船実験において、応答遅れのない制御結果を得ることができた。

また、開発した操縦性再現制御システムの訓練者への影響を検討するために、本システムと映像システムを用いた操船シミュレータで 20 度変針をシナリオに被験者実験を行い、運航パフォーマンスと精神的負荷の違いを計測した。実験の結果、本研究で開発されたシステムに起因する運航パフォーマンスおよび精神的負荷の差異は得られなかった。

今後の課題として、20 度変針より難易度の高いシナリオを対象に、本システムと操船シミュレータで比較実験を行い、被験者の精神的負荷の差異がないか検討する必要がある。

謝辞

終わりに、本研究の実船実験に多大なるご支援、ご協力を頂いた東京海洋大学海洋工学部附属練習船「汐路丸」の乗組員の方々および、被験者となって実験にご協力頂いた本学大学院の当時 2 年生 6 名の方に心より感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 岩崎寛希・辻啓介・古藤泰美・富久尾義孝：操船訓練時の操船者緊張レベルの推定—指尖脈波を用いて—、日本航海学会論文集、No.97、pp241-250、1997.9
- (2) 岩崎寛希・井上欣三：220GT 型練習船の大型船操縦特性への擬似化、日本航海学会論文集、No.105、pp21-26、2001.5
- (3) 小瀬邦治・湯室彰規・芳村康男：操縦運動の数学モデルの具体化、日本造船学会第3回操縦性シンポジウムテキスト、pp27-80、1981
- (4) 岡崎忠胤・大津皓平：最短時間アプローチ操船問題における操縦運動モデルの一考察、日本航海学会論文集、No.114、pp142-146、2006.3
- (5) 須田信英：PID 制御（五版）、pp2-7・pp16-19、朝倉書店、1996
- (6) Hart, S.G. and Staveland, L.E., Development of NASA-TLX(Task Load index), Human Mental Workload, Elsevier science Pub., pp.139-183,1988.

質疑応答

岩崎寛希（大島商船高等専門学校）：

- ① 操縦性を擬似化したコンテナ船と、練習船とは定常速力があまりにも異なるが、ここはどうかだったか。
- ② 4～5 年前にほぼ同様の成果を本学会に発表したが、新規性はどこにありますか。
- ③ シミュレータが増え実海域での大型船化をすることが、どのようなこの成果の使い方ができるのかお考えを伺いたい。

岩切敬晃：

- ① 本研究においては汐路丸の行動範囲等を考慮し東京湾内での操船を対象としました。よって大型船のスタンバイ・エンジンの状態での船速を想定しており、汐路丸による再現が可能となっております。
- ② 本研究で開発した制御システムでは、練習船のシステム応答遅れを考慮し、大型船の将来の操縦運動を予測し、それを目標値として制御するシステムの開発を行いました。また、本システムと操船

シミュレータにおいて被験者実験を行い操船者に与える影響についても検討しました。以上、2 点に新規性があると考えております。

- ③ シミュレータを利用する機会が増えても、練習船での実習が減ることはないと考えております。そこで、練習船での実習においてシミュレータと同様の訓練環境を整えることにより、実習がより効果的に行われるのではないかと考え、本研究に着手いたしました。現段階では、操縦性の再現のみとなっておりますが、今後は訓練者にヘッドマウントディスプレイとカメラを装着させ、カメラからの映像に大型船の CG を重畳表示させる拡張現実 (AR) の手法を用いれば、シミュレータと同様に本船を視覚的にも大型船にできると考えております。また、この AR の手法を利用すれば、シミュレータと同様に避航船を実海域に CG として出現させることができ、難易度の高いシナリオを、本システムで検討できると考えております。

中村紳也（株式会社 日本海洋科学）：

小型の実船で大型船の操縦性能を再現する場合、風潮流などの外力をどのように考えておられるか。又は今後考えていかれるか、見通し等についてご教示ください。

岩切敬晃：

本システムにおいては、外乱に対する考慮がなされていません。現在のシステムは大型コンテナ船が外乱を受けない状況での運動を予測し、小型練習船が外乱を受けながら再現を行いました。外乱に関しては今後の課題として、大型コンテナ船が外乱受けた状態での運動の予測を行い、予測反映する様な制御を行うことで視界的な外乱と再現された運動が一致し、より再現性の高いシステムとなると考えています。