

機関番号：12614
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20560743
 研究課題名（和文） 着岸操船シミュレーションの客観的評価手法の研究開発
 研究課題名（英文） Development of quantitative evaluation method
 of ship berthing simulation
 研究代表者
 岡崎 忠胤（OKAZAKI TADATSUGI）
 東京海洋大学・海洋工学部・准教授
 研究者番号：70392686

研究成果の概要（和文）：本研究では、着岸操船における客観的指標を得ることを目的として、応募者が従来の研究で開発した最短時間着岸操船問題の数値解法を最適着岸操船問題の数値解法に拡張した。そして、最適着岸操船問題の視点から、操船者が行った着岸操船結果を分析し、シミュレーション結果の船体の状態変数を定量的に評価する手法を開発した。

研究成果の概要（英文）：In this study, a numerical solution method for minimum time berthing problem had been extended to a numerical solution method for optimum berthing problem for obtaining objective maneuvering technique for ship berthing. Moreover, training results of ship berthing simulation were analyzed from mariner's point of view, then a method of evaluating result of ship berthing simulation was developed in this study.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：誘導制御

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：着岸操船，操船シミュレータ

1. 研究開始当初の背景

操船者が遭遇する様々な操船局面の中で、着岸操船は困難な操船局面の1つである。船舶はその質量に対しアクチュエータパワーが小さいため、船舶の停止性能および低速時の舵効きを考慮した操船計画を事前に立案し着岸操船に望まなければならない。そこで、操船者が安全かつスムーズに着岸操船を実施するためには、着岸時の操縦性能を適格に把握することが要求されるが、個々の船舶の着岸時の操縦性能の把握は経験的に蓄積されるものである。そのため、経験豊富なベテラン船長と経験の少ない操船者では、着岸操船の方法に差が生じる。例えば、着岸操船においては、経験の少ない操船者の場合、操縦

性能の把握が不十分であるとそれに伴い安全マージンも大きく考慮し、結果として操縦性能を適格に把握している経験豊富な操船者の操船方法に比べ、遙か手前から減速を開始する。安全サイドに考えた遠方から減速を行う操船においては、着岸までの所要時間は長くなり他船との見合い関係が発生する可能性が生じ、また低速のため舵効きが悪くなる区間も長くなる。そのため、場合によっては安全サイドに考えたために、かえって危険となることも考えられる。

本研究の応募者は、着岸操船時の立案計画の1つの客観的指標を得ることを目指し、着岸操船時の操縦運動性能の限界となる最短時間着岸操船方法を、船舶の操縦運動モデル

から数値的に導出する研究を行ってきた。船舶の操縦運動モデルから数値的に導出した最短時間着棧操船解の有効性は、実船を利用した自動制御実験にて実証された。しかし、同手法を実際の着棧操船へ適用するためには、評価関数を時間のみとして着棧操船問題を解くのではなく、適切な安全マージンを設定した最適着棧操船問題を解く必要がある。例えば安全マージンが大きすぎると、経験の少ない操船者の操船方法と同じ数値解が得られる可能性が高く、安全マージンが小さすぎると人間には実現困難な数値解が得られる可能性が高くなってしまふ。しかし、安全マージンは主観的な要素が大きく、客観的な指標を得ることが難しい。そこで、様々な操船者の着棧操船の結果から安全マージンを客観的な数値として抽出することができれば、着棧操船における安全マージンの1つの指標が得られると考えられる。なお、応募者が所属する東京海洋大学では、H19年度より水先人養成教育が開始され、ベテランの水先人および多くの受講生が、操船シミュレータにおいて着棧操船を行いそのデータが蓄積されつつある。このことは、本研究を進める上での大きなアドバンテージと考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、着棧操船における客観的指標を得ることを目的として、応募者が従来の研究で開発した最短時間着棧操船問題を数値的に解く手法を応用し、操船者が行った着棧操船結果から着棧操船における安全マージンを数値的に表現することを試みる。具体的には以下の項目を目的として設定する。

(1) 様々な拘束条件を設定した上で船舶の非線形操縦運動モデルから最適着棧操船問題の数値解を導出するプログラムを開発する。

応募者が従来の研究で開発した最短時間着棧操船方法導出プログラムでは、評価関数を時間のみとし、拘束条件も簡単な条件でのみ数値解を得ることができた。そこで、実際の着棧操船に即した入り組んだ岸線等を拘束条件に設定し、なおかつ、時間以外の項目を評価関数に加えた問題に対しても、安定して最適解を導出することができるプログラムを開発する。

(2) 様々な操船者が実施した着棧操船シミュレーションデータを蓄積するデータベースを構築し、着棧操船のパターンを分析する。

多くの着棧操船シミュレーションデータの操船時の減速方法と操舵に着目し、そのデータを蓄積するためのデータベースを構築する。そして減速および操舵の操作に関して、その時の船舶の状態と岸線および目的点からの距離、方位等を関連づけて分析し、着棧

操船のパターンを見いだす。そして、操船パターン内の各要所での船舶状態をデータベースに蓄積する。

(3) 着棧操船時の安全マージンを設定した最適着棧操船問題の数値解を得る。

データベースに蓄積された各着棧操船パターン内の各要所での船舶状態を、最適着棧問題の拘束条件および評価関数に設定し、最適着棧操船問題を解く。そして、導出した最適解と着棧操船シミュレーションデータの操船パターンが一致するように安全マージンの設定項目と数値の検討を行う。

3. 研究の方法

本研究においては、着棧操船における客観的指標を得ることを目的として、以下の項目を3年計画で研究していく。

(1) 最適着棧操船問題の数値解法の開発：最適着棧操船問題において、操船時の安全マージンを状態変数および制御変数の拘束条件として設定して、数値的に問題を解く手法を開発する。

応募者の従来の研究において、最短時間着棧操船問題を変分法の2点境界値問題とし、SCGRA法で数値解を導出する研究開発の際、操縦運動モデルの非線形性が強い為に、運動モデルを状態方程式に変形し、その偏微分を積分するときに数値解は発散してしまうという問題が発生した。そこで、数値解の発散を避けるために様々な形での積分方法を検討し、状態変数が代数方程式の拘束条件に含まれない場合、式の簡略化により数値解が発散しない数値積分を実現し、その後、多くの最短時間着棧制御解の導出に成功してきた。多くの数値解の計算を実施していく中で、数値解の収束性に影響する要因として、モデルの非線形性（状態方程式の偏微分の数値積分の計算精度）、初期の名目関数の設定方法、状態変数の正規化が挙げられることがわかった。そこで、本研究では、代数方程式の拘束条件に状態変数を含む最適着棧操船問題を解くためのSCGRAアルゴリズムを作成し、同アルゴリズムで数値解を収束させるために、以下の2つの方策で研究を進める。初期の名目関数の設定と状態変数の正規化において、射的法、緩和法、非線形計画法、GAなど様々な数値解の探索法を試みる。状態方程式の偏微分の数値積分の計算において、計算誤差の精度を向上させる数値計算アルゴリズムを調査し開発する。又、数値積分の区間を物理的に短縮する時間軸折り返し法を併せて試み、数値積分が発散しない手法の開発研究を実施する。

(2) 着棧操船シミュレーションデータ解析：

操船者による着岸操船シミュレータ訓練のデータから、着岸時の操船パターンを分析しデータベースを構築し、着岸操船時の安全マージンを分析する。

操船シミュレータで実施した着岸操船のデータを収集し操船パターンを解析するためのデータベースを開発する。そして、操船シミュレータでの過去の訓練データ、および訓練が実施されるたびに得られる着岸操船のデータを、開発したデータベースシステムに蓄積する。そして、以下の解析を実行する。操船時の減速方法と操舵に着目し、その時の船舶の状態と岸線および目的点からの距離、方位等を分析し、操船パターンを見いだす。操船パターンを見いだしたら、各操船パターンにおける着目点の岸線と本船の関係を、全操船シミュレーションデータより抽出し安全マージンとしてデータベースに蓄積する。着岸操船シミュレーションの訓練者の操船経歴、操船時間、着岸速度など操船スキルに関連すると思われるパラメータをベースにとり、上記の安全マージンの分布を解析し最適な安全マージンを推定する。そして、さらに着岸操船シミュレーションデータの解析を行い、分析結果を含めてデータベースを構築する。

(3) 着岸操船の安全マージンの数値化と検証：データベースに蓄積された着岸操船シミュレーションデータと、安全マージンを設定した最適着岸操船問題の数値解を比較分析し、様々な着岸操船時の安全マージンを数値化し、その有効性を検討する。

安全マージンを最適着岸操船問題の拘束条件として設定し、それぞれのケースについて最適解を導出し、着岸操船シミュレーションデータと操船パターンについて比較解析を行う。そして、導出した最適解と着岸操船シミュレーションデータの操船パターンが一致するように安全マージンの設定項目と数値の検討を行う。

4. 研究成果

(1) 最適着岸操船問題の数値解法の開発

最適着岸操船問題は、港内を通常航行速度で航走中の状態（図1の左図のA点）から目的の岸壁（図1の左図のC点）まで最短時間で誘導し停船することとする。この種の誘導問題は、変分法の2点境界値問題へと置き換え以下の通りに、定式化することができる。評価関数は、時間を終端実時間： τ を使って[0 1]区間に正規化表現し、

$$I = \int_0^1 f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \tau, t) dt = \int_0^1 \tau dt = \tau$$

となる。初期拘束条件は、Fig.1のA点における状態変数を代入し、

$$[\omega(\mathbf{x})]_0 = 0$$

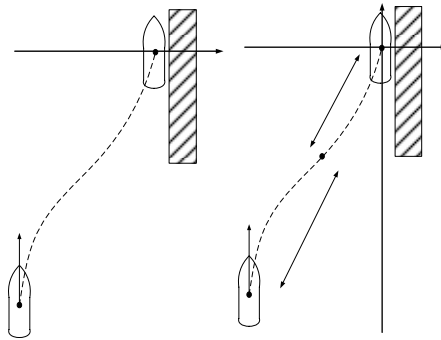


図1 着岸操船の問題設定

となり、終端拘束条件は、Fig.1のB点における状態変数を代入し、

$$[\psi(\mathbf{x}, \tau)]_1 = 0$$

となる。制御入力 \mathbf{u} の制限値は、不等式拘束条件を利用せず、ダミーの制御変数を作成し、以下のような代数方程式の拘束条件を適用する。

$$\mathbf{S}(\mathbf{u}, \tau, t) = 0, \quad 0 \leq t \leq 1$$

船舶の操縦運動モデルは、微分方程式による拘束条件に代入する。

$$\dot{\mathbf{x}} - \boldsymbol{\phi}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \tau, t) = 0, \quad 0 \leq t \leq 1$$

本研究で扱う問題は、速力変化が大きく大運動を伴う操船を扱うため、運動方程式が非線形性の強いモデルとなり、問題を解析的に解くことが困難となる。そこで、このように非線形性を強く含む問題を数値的に解く手法としてその有効性が確認されているSCGRA法を利用する。しかし、船体操縦運動モデルの非線形が原因で、状態変数の拘束条件を入れた形で解を得ることが困難である。本研究では、港湾の地形などを考慮した問題設定にする必要があった。そこで、本研究では、港湾の地形と操船者の立場からの安全マージンを設定し、問題を図1の右図の通り多点境界値問題に置き換え数値解を得ることに成功した。

(2) 操縦運動モデルの推定方法の開発

着岸操船のシミュレータ訓練においては、様々な船種の船舶を対象に訓練が実施される。そこで、シミュレータで利用されている様々な船種の操縦運動モデルが必要になるが、操船シミュレータの操縦運動モデルはユーザーに対し公開されていない。そこで、操船者として知り得る船舶の情報から、操縦運動モデルを推定する手法を開発した。本研究で開発した手法で採用したモデルは以下の通りである。

前後方向速度 u

$$\begin{aligned} \dot{u} = & \frac{1}{m+m_x} \{ (X_{vr} + m_y)vr - \frac{1}{2} \rho S_w C_D u^2 \} \\ & + (1-t_p) \rho n^2 D_p^4 (a_0 + a_1 \theta_p + a_2 \theta_p^2) \\ & + a_3 \frac{u}{n D_p} + a_4 \frac{u}{n D_p} \theta_p \\ & - (1-t_R) \frac{1}{2} \rho A_R \frac{6.13\lambda}{(2.25+\lambda)} [U_R^2 \delta \\ & + \gamma_R (v+l_R r) U_R \} \end{aligned}$$

横方向速度 v

$$\begin{aligned} \dot{v} = & \frac{1}{m+m_y} \{ -(m+m_x)ur \\ & + \frac{1}{2} \rho L d U^2 [Y'_v v' + Y'_r r' + Y'_{vv} v' | v' | \\ & + Y'_{rr} r' | r' | + (Y'_{vr} v' + Y'_{rr} r') v' r'] \\ & - (1+a_H) \frac{1}{2} \rho A_R \frac{6.13\lambda}{(2.25+\lambda)} [U_R^2 \delta \\ & + \gamma_R (v+l_R r) U_R \} \end{aligned}$$

回頭角速度 r

$$\begin{aligned} \dot{r} = & \frac{1}{I_{zz} + J_{zz}} \{ \frac{1}{2} \rho L^2 d U^2 [N'_v v' + N'_r r' + N'_{vv} v' | v' | \\ & + N'_{rr} r' | r' | + (N'_{vr} v' + N'_{rr} r') v' r'] \\ & - (x_R + a_H x_H) \frac{1}{2} \rho A_R \frac{6.13\lambda}{(2.25+\lambda)} [U_R^2 \delta \\ & + \gamma_R (v+l_R r) U_R \} \end{aligned}$$

ただし、各係数は以下の通りである。

ρ : 海水密度 [kg s²/m⁴]

m : 質量 [kg]

I_{zz} : 旋回慣性モーメント [kg s² m]

m_x, m_y : 付加質量 [kg s²/m]

J_{zz} : 付加慣性モーメント [kg s² m]

X_{vr} : 粘性に起因する抵抗変化 [kg s²/m]

S_w : 浸水面積 [m²]

C_D : 船体抵抗係数 [-]

$Y'_v, Y'_r, Y'_{vv}, Y'_{rr}, Y'_{vr}, Y'_{vr}$: 横移動時、船体へ作用する力の微係数 [-]

$N'_v, N'_r, N'_{vv}, N'_{rr}, N'_{vr}, N'_{vr}$: 旋回時に船体へ作用する力の微係数 [-]

t_p : 推力減少率 [-]

w_p : プロペラ位置での有効伴流係数 [-]

t_R : 舵抵抗減少率

a_H : 船体に作用する舵の干渉力を表す係数

x_H : 船体に作用する舵の干渉力の中心 [m]

x_R : 舵軸の x 座標 [m]

l_R : 舵位置の有効流向に及ぼす旋回角度の影響を横流れ速度に換算する係数 [-]

γ_R : 整流係数 [-]

ε : 流入速の比 [-]

k_X : 舵位置でのプロペラ増速率 [-]

a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 : プロペラ推力係数の回帰式係数 [-]

これらの係数推定に必要な情報は、 L : 垂線間長 [m], B : 船幅 [m], d : 平均喫水 [m], C_b : 方形係数 [-], A_R : 舵面積 [m²], λ : 舵アスペクト [-], D_P : プロペラ直径 [m], n : プロペラ回転数 [1/sec], エンジンテレグラフに示されているプロペラピッチ角と船速の値, 舵角の右最大から左最大までの所要時間, C P P 角の変化速度の制限値といった操船者にも入手可能なデータとなった。

(3) 着岸操船シミュレーションデータの解析

東京海洋大学では、1級水先人修業生の訓練の一環として操船シミュレータを利用した着岸操船訓練を行っている。本研究では、水先人修業生が行った着岸操船シミュレーションデータから、最短時間着岸操船問題に設定する安全マージンを抽出することを試みた。

訓練の初期で扱う基本的なシナリオ、横浜港の本牧D4バースへの着岸操船を対象シナリオとした。操船者には、航路に入るとともに、船速を落としながら3000PSのタグをスターボードバウ、スターボードクォーターにとり、防波堤を通過する手前でDバースへ向かうため左に回頭し、船速を調整しながらD4バースへ着岸することが要求される。対象船舶は、1万GT及び7万GTのコンテナ船とした。

着岸操船シミュレーションデータを、最適着岸操船問題の視点から、着岸位置までの縦距離を独立変数として、その他の船舶の状態変数の分析を試みた。その結果、最適着岸操船問題に設定すべき安全マージンとして、バースのコーナーでの岸壁までの横距離の最小値と船速の最大値、バース手前での操船における横方向速度の最大値、回頭角速度の最大値を得ることができた。

(4) 着岸操船結果の評価手法

着岸操船シミュレーションデータを解析し、最適着岸操船問題へ設定する安全マージンを抽出し、その値を操船者のキャリアに応じて分析をしたところ、操船スキルの差が安全マージンの数値の差に現れている傾向が観測された。そこで、操船者の視点に立ち、着岸操船シミュレーションデータの船舶の状態変数を定量的に評価するツールを開発した。

評価する状態変数は、船舶の岸壁までの横距離、船速、船首方位とし、それぞれ着岸位置までの縦距離を独立変数とした。そして、評価ポイントは、独立変数である着岸位置までの縦距離が0.5L(船長)、1L, 2L, 3Lの位置とした。

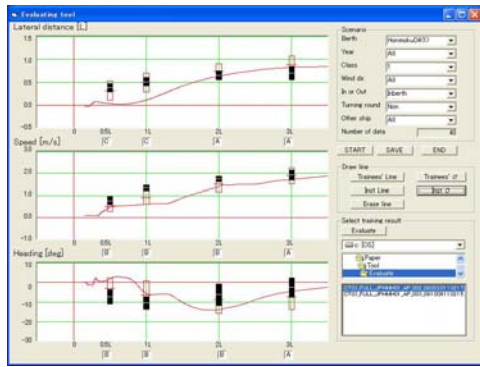


図2 評価ツールの画面例

訓練データを客観的に評価するための指標には、インストラクターの行ったデモンストラクションの操船結果および1級水先人修業生の訓練結果の統計値を用いた。本研究で開発した評価ツールの画面例を図2に示す。このツールは、訓練直後に操船結果を評価することが可能である。この画面の左側に示されている3つの時系列は、それぞれ船舶の横距離、船速、船首方位を着棧位置までの距離をベースに訓練結果を示している。そして、どのポイントでの値がインストラクターや1級水先人の標準的な操船と、どのように異なるかを定量的に示し、シミュレータ訓練のどの場面での操船方法がどのようにまずかったかを、訓練者に理解させることができる。

よって、本ツールを水先修業生の着棧操船シミュレータ訓練に利用することにより、訓練をより効果的に実施できる可能性がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① Tadatsugi Okazaki, A Study on Evaluating Maneuvering skill and Developing Support Tool for Marine Pilot Trainees Berthing a Ship, Proceedings of IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics 2010, 査読有, 2010, pp.3087-3093
- ② Tadatsugi Okazaki, Development of Ship Handling Simulator Using Actual Training Ship, Proceedings of World Automation Congress 2010, 査読有, 2010, IFMIP191-1-6
- ③ Tadatsugi Okazaki, Development of Ship Simulator System for Designing Auto-Pilot, Proceedings of World Automation Congress 2010, 査読有, 2010, IFMIP192-1-6
- ④ Tadatsugi Okazaki, A Study on Berth Maneuvering Using Ship Handling Simulator, Proceedings of IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics

2009, 査読有, pp.660-665

- ⑤ Tadatsugi Okazaki, A Study of Situation Awareness of Evading Navigation Using Marine Radar, Proceeding of the 13th IEEE International Symposium on Consumer Electronics, 査読有, 2009, pp.841-844
- ⑥ Tadatsugi Okazaki, A Study on Ship Berthing Support System, Proceedings of IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics 2008, 査読有, 2008, pp.1522-1527

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡崎 忠胤 (OKAZAKI TADATSUGI)

東京海洋大学・海洋工学部・准教授

研究者番号：70392686