

動的状況下における船舶ナビゲータの認知行動シミュレーション*

山口俊憲**, 伊藤謙治**

Most of major marine accidents were caused by human operator. Therefore, human behavior is great importance to analysis for maritime safety. A simulation approach, for investigating critical risks under specific maneuvering conditions, has been recently utilized for its advantage to save cost and time. The present study constructs a cognitive model of a ship navigator based on the cognitive task analysis in which synchronized data from eye-movement recordings and verbal protocols was analyzed during a series of actual navigation sessions using a maritime simulator. The model describes a dynamic interaction between the navigator and the states in maneuver and navigation environment for a course-tracking task in which a ship is navigated to follow a planned route as safely as possible in the narrow fairway. This model implemented on a Macintosh PC using a standard C code. The accuracy of the constructed model is examined by comparing the task performance simulated by the model with the observed performance by a human navigator on the maritime simulator. It could produce similar patterns of helm-command generations to those of the actual human navigator.

船舶事故の多くは人間のエラーであるといわれており、人間の側面からの分析が重要となる。この際、コンピュータ・シミュレーションによるアプローチがコスト的にも時間的にも有効であると考えられている。本研究では、操船シミュレータ実験におけるナビゲータの行動をバーバル・プロトコルと眼球推移データからタスク分析した結果を基に、計画コース追従タスクにおけるナビゲータの行動をモデル化する。そして、その構築したモデルと航行環境、船舶メカニズムと同期のとれたシミュレーションを構築する。シミュレーションから得られた結果と操船シミュレータ実験における人間のパフォーマンスと船舶の挙動との比較を行った。その結果、構築したモデル船舶を安全に航行させている。舵角度の作成パターンは人間のナビゲータとよく似ていた。これらより、構築したモデルは人間の行動を比較的良好に表していた。シミュレーション・アプローチにより人間、機械、環境による航行の安全に与える影響を解析・評価するために適切なナビゲータのモデルを構築した。
(キーワード：認知モデル、認知行動シミュレーション、船舶ナビゲーション)

1. はじめに

現代のマン・マシンシステムは大規模・高度化されており、ひとたび異常や事故が起こるとその影響は計り知れないほど大きくなる危険性がある。現代の大規模システムの代表である原子力プラント、航空機など

では、自動安全システムが導入されているにも関わらず、事故は実際に発生している。事故後の分析において、運転員の過失が重大な要因であったという指摘がよくなされる¹⁾。本研究で対象とする大型船舶の航行においても、事故原因の多くが運転員によるヒューマン・エラーであるといわれている²⁾。そのため、このようなシステムの操作において、システム運転中の人間の行動プロセスや行動特性の分析が重要となり^{3,4)}、人間の認知特性を考慮した設計が必要となる。

本研究で対象としている大型船舶において、航行の安全を考える際、航行環境（天候、潮流など）、船舶の特性（大きさ、重さなど）の物理的な条件だけでなく

* 受付：1999年11月2日 受理：2000年3月1日

** 東京工業大学大学院 社会理工学研究科経営工学専攻
Tokyo Institute of Technology, Graduate school of Decision Science and Technology.

く、ナビゲータ（船長：Navigator）のタスク遂行能力などの人的要因も考慮する必要がある。そのため、これらの条件に対する様々な状況を想定し、その時にとる人間の行動、船舶の挙動を分析する必要がある。しかし、このような多くの状況に対して、それらすべてを被験者を用いた実験的アプローチによって解決することは、時間的・コスト的に困難である場合が多い。そのため、タスク遂行中の人間の認知行動を的確にモデル化し、これをコンピュータ・シミュレーションすることにより、それから得られるデータをタスク分析に利用する認知シミュレーション・アプローチの有効性が示唆されている⁵⁾。すなわち、このアプローチは作業における人間の行動をモデル化し、それを様々な条件下でシミュレーションすることにより、人間（ナビゲータのタスク遂行能力などの個人属性）、船舶特性（大きさ、重量など）、および環境条件（潮流、視界の状況など）などが航行に与える影響を解析・評価するものである。このようなシミュレーション・アプローチを現実的なものにするためには、適切な、そして信頼度の高い運転員の意思決定プロセスのモデル化が必要である。原子力プラントの制御室や大型船舶のナビゲーションなどの領域でこのようなシミュレーション・アプローチがすでに試みられている⁶⁻⁸⁾。例えば、原子力プラントに対する研究では、AI手法を用いて運転員の意思決定プロセスをモデル化している⁹⁾。また、戦闘機においては、認知タスク分析に基づいて人間のパフォーマンス・モデルがなされている¹⁰⁾。しかし、これらはシステムを監視している際、運転員がどのように情報を獲得しているかまではモデル化していない。大型船舶では、ナビゲーション行動をモデル化する場合、人間の行動を分析した結果から認知モデルを構築したものではなく、船舶のダイナミクスのメカニズムを用いた制御理論によるモデル化がなされてきた¹¹⁻¹³⁾。

以上をまとめると、認知モデルに基づくシミュレーション・アプローチは有望な手法の一つであると考えられている。しかし、本研究で対象としている船舶ナビゲーションにおける人間の行動は認知的な処理であり、分析することが難しく、人間がどのような処理を行っているかがほとんどわかっていない。また、船舶ナビゲーション・タスクにおける操作は、原子力プラントのように人間-機械のインタラクションだけでなく、航行環境とのインタラクションも重要となる。さらに、航行環境、船舶の状態が時々刻々変化する動的状況に対応して意思決定がなされるため、人間の行動をモデル化するにあたり、システムの状態（船舶の位置、速度など）、環境との同期、インタラクションを

実現しなければならない。

本研究では、操船シミュレータ実験におけるナビゲータの行動を眼球推移と発話プロトコルのデータから計画コース追従タスクにおけるナビゲータの行動を表した結果¹⁴⁾を基にその認知行動のモデル化を試みる。ここでは、過去の研究において構築されたプロトタイプ・モデル¹⁴⁻¹⁶⁾をさらに発展させ、操船シミュレータ実験におけるナビゲータの認知行動をよりの確に表す認知モデルの構築を目指している。さらに、将来のリスク分析への適用を視野に入れ、ナビゲータの特性の差、船舶特性、航行環境が船舶航行の安全に与える影響を分析することが可能となるような信頼度の高いナビゲータ・モデルの構築を行うことを目的としている。モデルの妥当性の評価として、操船シミュレータ実験と同様の航行条件でシミュレーションを行い、操船シミュレータ実験とシミュレーションから予測されるナビゲータのパフォーマンス、船舶の挙動を比較する。また、これらの結果に基づき、モデルの考察を行うとともに、今後のリスク分析への応用についての展望を論じる。

2. ナビゲータ・モデルの構築

2-1. ナビゲータ・モデルの概要

タスク分析を行った結果¹⁴⁾を基に、狭い海域を計画コースに沿って安全に航行させるタスクにおけるナビゲータの意思決定プロセスを具体的にモデル化する。

タスク分析¹⁴⁾において利用した船舶シミュレータはデンマーク海事研究所（Danish Maritime Institute）のもので、操舵手がマニュアルで舵角度をステアリングを介して操作する旧式のものである。このシミュレータは設定した特定の状況、航海条件、コースに対して、実際の船舶と同様の挙動をリアルタイムで実現する。このシミュレータは現実の船舶と同様の挙動を創り出すことができ、風、潮流、波などの影響も表現することができる。

操船シミュレータ実験¹⁴⁾で行ったナビゲーション・タスクは、視界良好・潮流なし、視界不良・潮流なし、視界良好・潮流ありの三つのナビゲーション状態において同一の機械技術者、一人を用いて行った。この技術者は実際のナビゲータではないが、ナビゲーション・タスクや船舶の航行、または船舶のダイナミクスに精通しており、すでに15年以上の経験を持つ者であり、実際のナビゲータとほぼ同等の熟練技能を有していると認められている。

操船シミュレータ実験におけるタスク分析¹⁴⁾、およびその後に行われたタスク分析の結果により得られたナビゲーション行動のおおまかな流れを説明する。

ナビゲータの行動は、図1に示すように、監視において船舶、環境の状態に関する情報を獲得し、コース修正を行う必要性を判断するコース修正起動のための偏差チェックを行う。ここで、コース修正が必要であると判断されると、舵角度の決定に必要な情報を獲得し、舵角度を決定する。それをコマンドとして操舵手に伝達し、操舵手はナビゲータのコマンド通りに舵を切る。舵角度を伝達するとナビゲータは監視を行い、

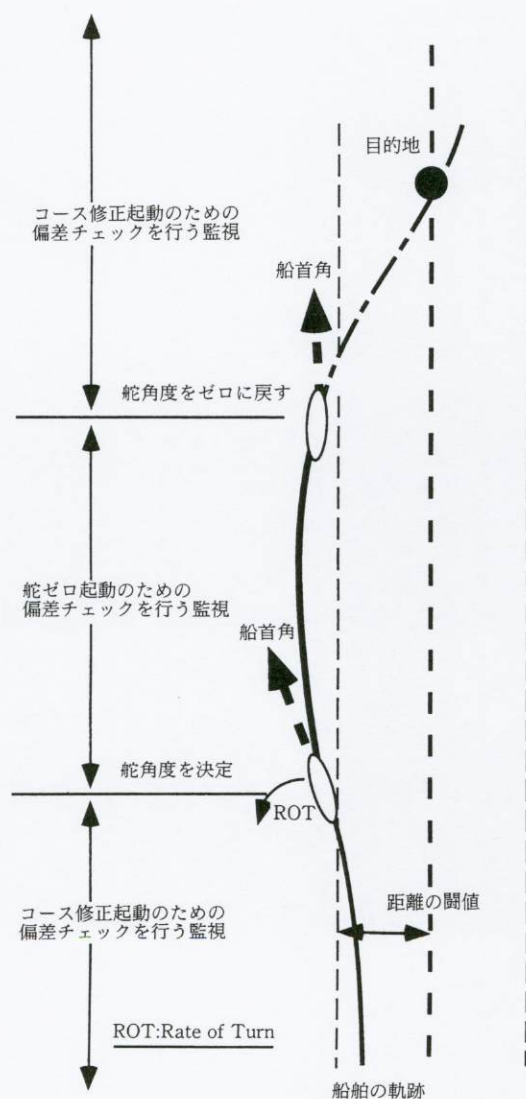


図1 船舶ナビゲーションタスクの流れ

Fig. 1 Flow of ship navigation task for course tracking.

舵が正しく切られているかを判断する効果チェックを行う。監視において舵が正しく切られていると判断されると、舵をニュートラル・ポジション (0°) に戻す操作起動のための偏差チェック（舵ゼロ起動のための偏差チェック）を行う。ここで、舵をゼロに戻してもよいと判断されると、操舵手に舵をゼロに戻すようにコマンドを伝達する。ナビゲータはコマンドを伝達すると航海状況の監視を行う。これらを繰り返すことによって基本的にナビゲーションを行っている。

ナビゲータ・モデル構築のプログラミングを行ううえで、図2に示すように、船の動きとともに時々刻々変化する航行環境、ナビゲータの行動を同時に進行させ、航行環境、船舶の状況に応じてナビゲータ・モデルの行動を変化させるようなインタラクションを表現する必要がある。また、ナビゲータ・モデルだけではなく、操舵手モデルとのインタラクションも必要となる。そのため、本研究ではナビゲータの眼球運動の推移に従ってタスクを進めていくタスク・ネットワークとしてモデルを構築する。このモデルは、タスク分析¹⁴⁾により得られた、ナビゲータの眼球推移ネットワーク、すなわち外界、船首角、角速度 (Rate-of-Turn; ROT) などのナビゲータの注視位置の推移パターン、および各注視位置における注視時間の分布に従ってナビゲータの認知行動のシミュレーションを進めていく。このような眼球推移データに従ったナビゲータの単一の注視時間をナビゲータの一つの処理単位とし、この注視時間だけ船舶を進め、環境の状態を更新するようにモデル化した。すなわち、各注視位置での注視の終了時に、ナビゲータの注視している計器、あるいは外界の情報がナビゲータの記憶として取り込まれ、その情報がナビゲータの短期記憶に保持されるようにモデル化した。これらを継続的に進めていくことで擬似的にインプリメンテーションを実現する。

これをC言語を用いてプログラミングし、PC上で実行する。この際、ナビゲータや船舶の状態を視覚的にとらえられるようにするため、図3に示すように、注視位置、注視時間、ナビゲーションの状態、船舶の航行軌跡をグラフィックで表現する。

2-2. 情報獲得の方法

前述したように、ナビゲータの情報獲得プロセスは、タスク分析の結果から得られた眼球推移パターンに従ってシミュレーションを進行させていく。モデルでは、この推移パターンを表した確率分布に従った乱数により注視位置を決定する。また、各注視位置に対する注視時間の値についても、同様にその確率に従った乱数により決定する。このとき、タスク分析の結果

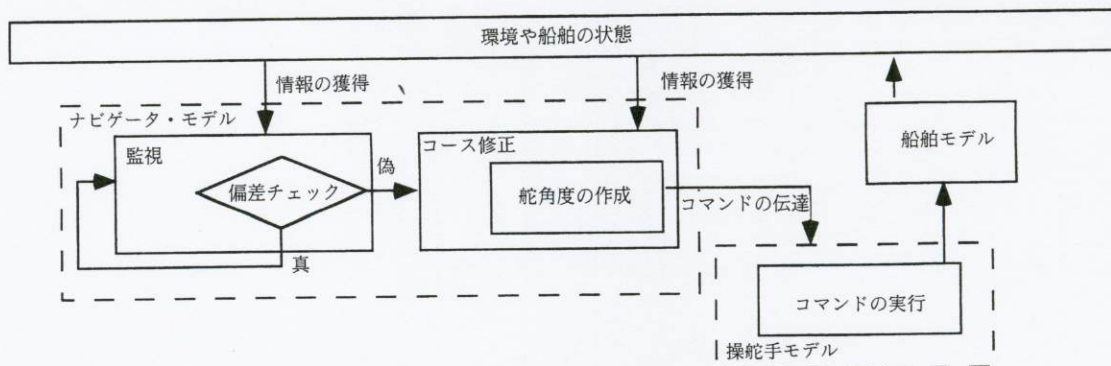


図2 ナビゲータ・モデルの概要

Fig.2 Model Structure of the Ship Navigation Task.

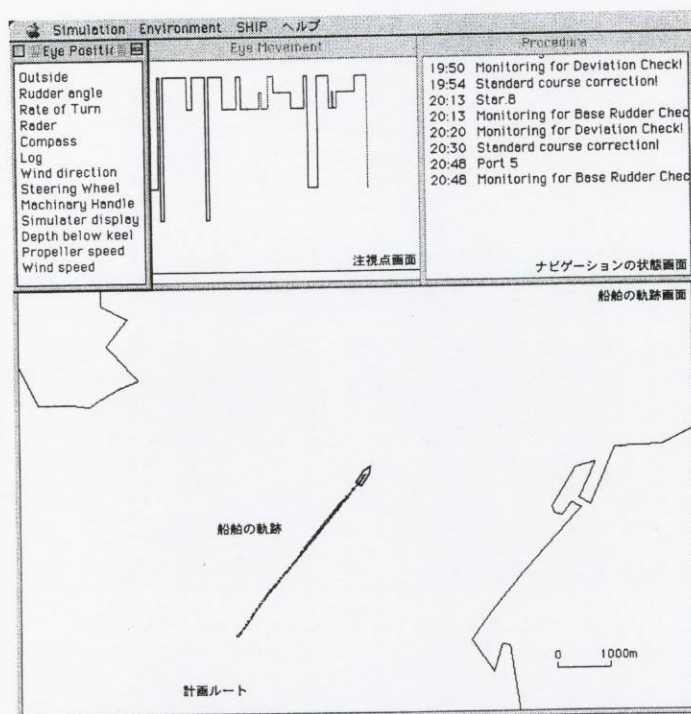


図3 シミュレーションの実行画面

Fig.3 Screen dump of the simulation window.

から偏差チェックを行っている際の監視と舵角度を作成する際との注視位置の推移、注視時間は異なることがわかっている¹⁴⁾。そのため、モデル化する際、これを考慮に入れた。

このように決定された注視時間の終了時点において注視した計器の現在値を環境モジュールから受け取り、ナビゲータの短期記憶としてその情報を保持するものとした。外界、あるいはレーダ画面を注視した際

には、現在の船舶の位置、および船首角の情報は、ある程度の誤差をもって獲得するとしてモデル化した。また、このようなナビゲータ行動に関する誤差として、将来位置の予測に関する誤差などもモデルには含まれている。これらの誤差の大きさはナビゲータの経験や能力、あるいは状況などによって変動する値である。

2-3. コース修正起動のための偏差チェック

タスク分析の結果¹⁴⁾より、監視において、常にコース修正起動のための偏差チェックを行っていないことがわかっている。モデルでは、視界良好時には外界、視界不良時にはレーダ、舵角度計、あるいはコンパスを注視したときにチェックを行うものとした。このチェックは現在の船舶の状態とナビゲータによって予測される将来の船舶の状態から行うものとした。前者では計画ルートからの自船の偏差距離と計画ルートと船首角との偏差角度によって行うものとした。図4(a)で示すように、計画ルートからの偏差距離があらかじめ定められた閾値を超えた場合、偏差距離が外れたと判断される。また、計画ルートの針路と船首角との偏差角度があらかじめ定められた閾値を超え、ROTが偏差角度を広げる方向に向いている場合、偏差角度が外れたと判断される。後者では、図4(b)で示すように、現在の状況をもとに、あらかじめ定められた時間後の将来位置を予測し、その将来位置における、偏差距離が閾値を超えた場合、偏差距離が外れたとしてコース修正が必要であると判断される。ただし、偏差距離において、現在の偏差距離が閾値を超え、将来の偏差距離が閾値の範囲内である場合、現在と将来の偏差距離を比較し、将来の偏差距離の方が小さいときは偏

差距離が外れたとは判断されない。これは、現在の偏差距離の閾値より将来の偏差距離の閾値を大きく設定した場合を考慮したものである。将来の位置を予測する際、ナビゲータは過去の実験や知識から船舶メカニズムのメンタル・モデルを持っており、保持されている情報から瞬時に予測を行っていると推測される。先に述べた閾値、予測時間などの値は航行条件やナビゲータの判断基準などによって異なる。また、ROTや船舶の速度などに関する情報は、ナビゲータが実際に注視し、それを記憶に保存している値を利用する。そのため、その情報に対する注視がかなり以前に行われたもの、あるいは変化の激しい状況ではナビゲータの記憶の値と、現状の値には差異がある。

2-4. 舵角度の作成

舵角度の作成方法はコース修正起動のための偏差チェックの結果から二つの場合があるものとした。一つは計画ルートからの偏差距離が外れていると判断された場合、もう一つは船首角と計画ルートの針路との偏差角度が外れていると判断された場合である。ただし、偏差距離と偏差角度の両方でコース修正が必要であると判断された場合は、偏差距離を優先することとした。

前者では、図5(a)で示すように、現在の位置から計

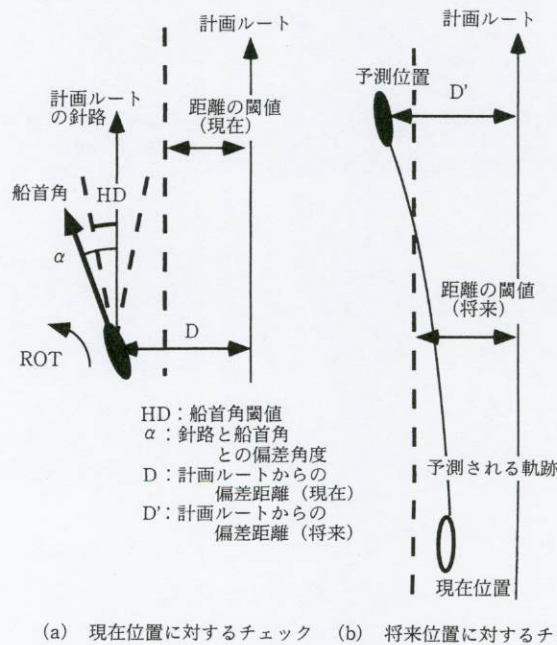


図4 コース修正必要性判断の偏差チェックの方法

Fig. 4 Deviation check for an activation of course correction.

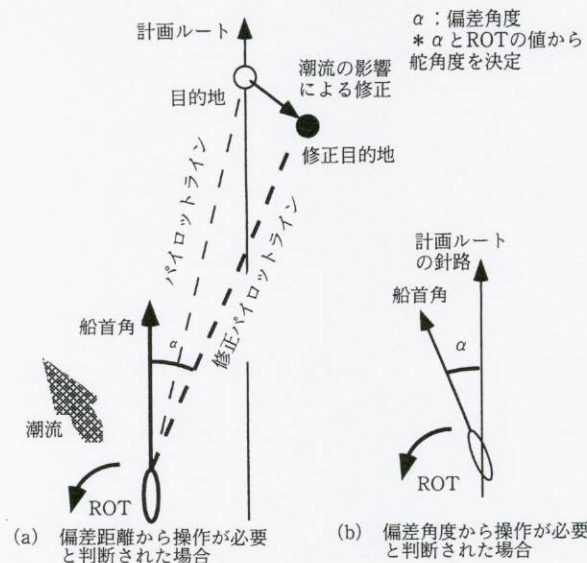


図5 舵角度の決定方法

Fig. 5 Command generation process.

画ルートの中央に向かってあらかじめ定められた長さの直線（パイロットライン）を引き、その交点を目的地とする。このパイロットラインの長さは船舶の航行条件等によって異なる。潮流がある場合は潮流によって流される距離を見積もり、それを考慮した地点を修正目的地とする。これはゴルフのパットングにおけるグリーンの傾斜や芝目の影響を考慮するアナロジーとしてモデル化したものである。舵角度は現在位置から修正目的地に向かって引いた修正パイロットラインと船首角との偏差角度 α と ROT の二つから決定するものとした。この舵角度の値は、舵を切って、ある時間後に舵を 0 に戻したとき、目的地に到達するように定められたものである。これを ROT と偏差角度とのテーブルによって表現した。

後者では図 5 (b) で示すように、船首角と計画ルートの針路との偏差角度 α と ROT の二つから舵角度の決定を行うものとした。この際も、先ほど説明したテーブルを用いて舵角度の決定を行う。

2-5. 効果チェック

操舵手モデルによって舵を切られた船舶は、その操作に対して実際に船首角が変わるまでには大きな時間遅れ（時定数）があるため、数秒後から船首角を変える。ナビゲータ・モデルはその操作が適切に行われ、船舶の船首角が実際に作成されたコマンドで意図したように効果が現れているかをチェックするものとした。チェック項目として、舵角度計から読みとった現

在の舵角度が操舵コマンドの実行直前の舵角度と比較し、作成した舵角度の方向に変化しているか、また ROT がコマンド作成時と比べて、命令した舵角度の方向に変化しているかをチェックし、コマンドの効果を評価するものとした。このようなチェックにおいて、意図通りに変化して入れば、ここでの操作がうまくいっていると判断し、舵ゼロ起動のための偏差チェックを行い、操作がうまくいっていないと判断されると再度舵角度の作成を行うものとした。

2-6. 舵ゼロ起動のための偏差チェック

舵ゼロ起動のための偏差チェックは監視において常には行っていない¹⁴⁾。また、このチェックの評価方法も舵角度の作成方法によって二つの場合があるものとした。

これらのチェックは目的地に向かうように舵角度を作成した場合、視界良好時は外界、視界不良時はレーダ、船首角度計、あるいはコンパスを注視したときに行うものとした。判断の方法は、図 6 に示すように現在の船舶の状態から舵をゼロに戻したときの軌跡を予測する。そして、これが予測軌跡 a-2 のように目的地の範囲内に入っていれば、舵をゼロに戻してよいと判断される。軌跡が予測軌跡 a-1 のように目的地より奥であれば、舵をゼロに戻すタイミングが早すぎるとして、舵ゼロ起動のための偏差チェックを続ける。交点が予測軌跡 a-3 のように目的地より手前であれば、舵をゼロに戻すタイミングを逸したとして、再度



図6 舵を0に戻すタイミングを計る偏差チェックの方法
Fig.6 Deviation check for the activation of neutral rudder.

舵角度の作成を行う。この際、舵をそのままにしたときの予測も行い、その軌跡と計画ルートとの交点が目的地より奥であると判断されたとき、生成した舵角度が小さかったとして再度舵角度の作成を行うものとした。これは、ナビゲータの生成する舵角度に誤りがあり、必要な舵よりも小さい舵を切った場合を考慮したものであり、リスク分析を行う際に必要とされる。

船首角を計画ルートの針路に向くよう舵を作成した場合、ナビゲータはROTがゼロになっているかを確認するプロトコルが多く見られた。そこで、ROTを注視したときにチェックを行うものとした。しかし、監視において頻繁にROTを注視しているわけではないため、タイミング良くROTがゼロになったときにROT計を注視することは難しい。そこで、ROTが舵を切った方向のあらかじめ定められた範囲内に入ったとき、舵をゼロに戻してもよいと判断される。ROTがその範囲に満たないときは監視を続け、それを超えてしまったときは、再度舵角度の作成を行うものとした。先ほど述べたように、この判断を行う際、常にROT計を注視しておらず、外界やROT計以外の計器を多く注視している。そこで、外界を注視した場合にはコース修正起動のための偏差チェックを行うものとした。

3. モデルの検証

3-1. 方法

先に構築したナビゲータ・モデルが人間の意思決定プロセスを適切に表現しているかの妥当性を評価する。そのため、操船シミュレータ実験と同一の条件でシミュレーションを行う。ここでは、計画コース追従タスクにおいて、視界良好・潮流なし、視界良好・潮流あり、視界不良・潮流なしの三つの条件において評価を行う。潮流の方向と大きさは南から約0.5 m/sとする。モデルの妥当性は、操船シミュレータ実験とシミュレーションから予測されるナビゲータのパフォーマンス、船舶の挙動を比較することによって行う。

シミュレーションの際に使用したモデルのパラメータの値は操船シミュレータ実験から得られたバーバルプロトコルやナビゲータへのインタビューを行った結果などを参考にして、次のように設定した。船舶の初期速度約3.0 m/s、パイロットラインの長さ800 m、将来位置を予測する際の予測時間の長さ120秒とする。これら以外のパラメータは潮流なしと潮流ありの条件では異なる。潮流なしの場合、船首角の閾値1.5°、計画ルートからの距離の閾値は現在位置において左舷、右舷側とも60 m、将来の予測位置において、左舷、右舷側とも120 mとする。潮流ありの場合は、船首角の閾値4.0°、計画ルートからの距離の閾値は、現在位置において左舷側40 m、右舷側80 m、将来の予測位置において左舷側60 m、右舷側180 m、潮流の読みとり誤差として、実際の潮流の80%すなわち、この条件では南から潮流が0.5 m/sのため、その80%の0.4 m/sとなるようにした。

注視位置や注視時間などは乱数の抽出によって決定しているため、シミュレーションの結果にはばらつきがみられる。そこで、それぞれの条件において10回のシミュレーションを行う。

モデルの妥当性は、計画ルート内を安全に航行させているか、また操船シミュレータ実験とシミュレーションから得られるナビゲータの舵を切るパターンなどのパフォーマンスを比較することによって行う。後者に関しては、航行時間、コース修正を行った操作回数、生成したゼロ以外の舵角度の平均、舵をゼロに戻す回数、舵をゼロに戻さない回数、ゼロ以外の舵を連続で切った回数、舵ゼロの時間が全体に占める割合の比較を行う。また、コース修正を行ったタイミング、作成した舵角度の大きさと方向などを時間の流れに沿って表した結果のタイムラインの比較を行う。

3-2. 結果

シミュレーションを実行した際の軌跡の一例として、視界良好・潮流なしの軌跡を図7に示す。また、タイムライン分析の結果を図8に示す。この図は、操船シミュレータ実験における人間のナビゲータとシミュレーションによって予測されるナビゲータの行動を比較しやすいように、左側に実験で観測した人間のナビゲータの行動を、右側に認知モデルで予測される行

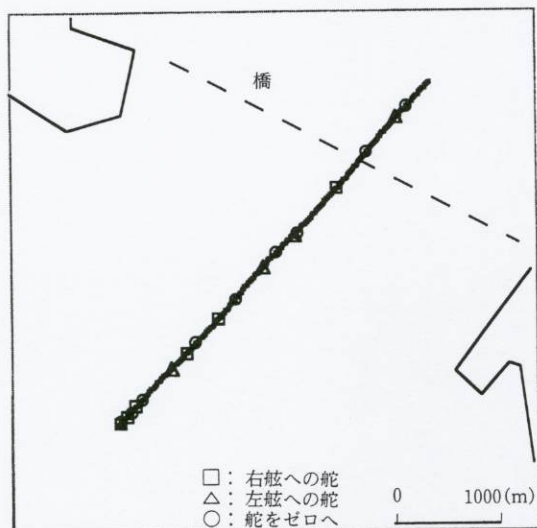


図7 認知モデルによる航行軌跡

Fig. 7 Track plot navigated by the cognitive model.

動を表している。表1には人間のナビゲータと認知モデルとのパフォーマンスを比較した結果を示す。

3-2-1. シミュレーションによる軌跡

図7に示したように、視界良好・潮流なしの条件において、船舶を計画ルートの中央に沿って安全に航行させている。また、図に示した以外の視界良好・潮流あり、視界不良・潮流なしの条件においても船舶を計画ルートの中央に沿って安全に航行させている。

3-2-2. 航行時間

視界良好・潮流なしの条件において、認知モデルは1158.5秒、人間のナビゲータは1230秒とほぼ同一である。また、他の航行条件においても、ほぼ同一となっている。この航行に要する時間は速度に依存する。シミュレーション条件では、この速度を主にコントロールするエンジン・フォースの値を操船シミュレータ実験時の速度にあうような初期値を設定したため、当然の結果といえる。

3-2-3. 舵を切るパターン

視界良好・潮流なし、視界不良・潮流なしの二つの条件において、図8に示すように人間のナビゲータは舵を切った後にゼロに戻す行動がよくみられる。認知モデルにおいてもこの基本パターンを模倣するようにモデル化したため、当然ではあるがこのパターンを再現している。また、舵を切るタイミングを逸し、舵をゼロに戻さず、はじめに切った舵と反対の舵を切り直すパターンも模倣している。視界良好・潮流ありの条件では、舵を切った後にゼロに戻すパターンがあまりみられない。そのため、表1に示すようにナビゲータ

表1 実ナビゲータと認知モデルとのパフォーマンス比較

Tab. 1 Performance comparisons between human navigator and cognitive model.

	視界良好・潮流なし			視界良好・潮流あり			視界不良・潮流なし		
	ナビゲータ	認知モデル		ナビゲータ	認知モデル		ナビゲータ	認知モデル	
		平均	標準偏差		平均	標準偏差		平均	標準偏差
航行時間 (秒)	1230	1158.5	6.6	840	885.7	22.4	1080	1076.1	7.0
操作回数 (回)	21	17.9	3.1	23	21.0	2.1	20	16.1	2.2
平均舵角度 (度)	4.7	4.3	0.8	11.0	10.3	2.7	4.4	5.1	0.8
舵をゼロに戻す回数 (回)	9	8.3	1.6	6	4.4	0.8	10	7.0	0.8
舵をゼロに戻さない回数 (回)	2	0.9	0.7	11	11.0	3.2	0	1.4	0.9
ゼロ以外の舵を連続で切る回数(回)	2	1.2	1.7	9	6.3	1.6	0	2.1	0.9
舵ゼロの時間が全体を占める割合	0.68	0.66	0.08	0.35	0.29	0.06	0.64	0.63	0.01

3-2-5. 操作回数

視界良好・潮流なしの条件において、表1に示したように、操作回数は人間のナビゲータが21回であるのに対し、認知モデルでは17.9回と若干少なくなっている。他の二つの条件でも人間のナビゲータに比べ、認知モデルの方が少なくなっている。しかし、この回数の差はばらつきの範囲内であり、大きな差であるとは考えられない。

また、潮流がある場合は、人間のナビゲータ、認知モデルとも操作回数が増加する傾向がある。これは、潮流なしの条件では、偏差角度が外れたとして舵角度を作成しており、ROTの変化を見るだけで舵をゼロに戻すことができる。しかし、潮流ありの条件では、船首角を計画ルートの針路の方向に向けただけでは、計画ルートに沿って航行することはできない。そのため、潮流の影響を考慮して船首角を傾けて航行する必要がある。しかし、どれくらい傾ければよいかを決定するのは難しい。そこで、船首角の閾値を大きく設定している。また、ここでの潮流の向きでは、船舶が左舷側に流されやすくなっているため、あらかじめそれを考慮し、左舷側の距離の閾値を狭くとしている。そのため、潮流がある場合、偏差距離が外れたときにコース修正が必要であると判断され、目的地に向かうように舵角度を作成する。この際、潮流の大きさを考慮して舵角度を作成する必要がある。さらに、舵をゼロ

に戻すタイミングをはかる際、将来の軌跡を予測する必要がある。これらが難しいため、何度も舵を切り直している。そのため、潮流がある場合、操作回数が増加していると考えられる。

以上の結果から、構築したナビゲータ・モデルは操船シミュレータ実験における人間のナビゲータの行動をうまく模擬していると考えられる。

4. 考 察

4-1. シミュレーション回数

シミュレーションを行うにあたり、注視位置、注視時間などは前述したように乱数を抽出することによって決定している。そのため、常に同一のシミュレーション結果が得られない。そこで、それぞれの三つの条件において、シミュレーションを20回行い、5回、10回、15回、20回における、航行時間、計画ルートからの平均の偏差距離と最も離れたときの偏差距離、針路と船首角との平均の偏差角度と最も差の大きい偏差角度、平均舵角度、操作回数の平均、および標準偏差の値の変化を検討する。特に、図9に、平均舵角度、最大偏差角度の推移を示す。図9に示すように、平均舵角度、最大偏差角度とも潮流なしの場合において、平均、標準偏差ともシミュレーション回数に関係

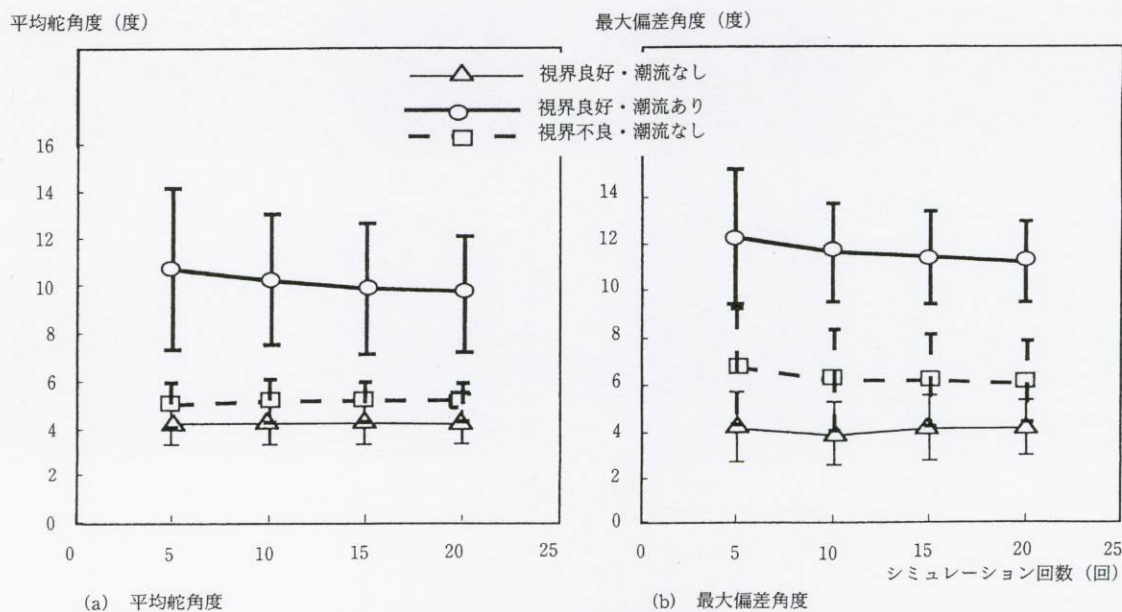


図9 シミュレーション回数に対する平均と標準偏差の値

Fig.9 Mean and Standard Deviation for the number of simulations.

なく、ほぼ一定である。潮流ありの条件でも平均値には大きな変化はみられない。しかし、標準偏差の値はシミュレーションを5回行ったときに比べ、10回行ったときの方が小さくなっている。さらに15回行ったとき、標準偏差の値に大きな変化はみられない。他の評価項目においてもシミュレーションの回数によって平均値に大きな変化はみられない。しかし、標準偏差はシミュレーションを10回行ったときに小さくなるが、15回ではあまり変化が見られない。シミュレーションを行う回数を増やすことで得られる結果の信頼性は増すが、10回程度行えばそれぞれの条件におけるナビゲータのパフォーマンス、船舶の挙動を十分分析できると考えられる。

4-2. 今後の展開

先に示した結果より、計画コース追従タスクにおいて、構築したナビゲータ・モデルは、シミュレーション・アプローチによって船舶の挙動、ナビゲータの行動に与える影響を、人間、機械、環境の三つから解析・評価することを可能とするモデルが構築できたと考えられる。

このモデルに、タスク実行中のナビゲータの短期記憶の状態をモデル化し、それを表示する機能を付加することで、タスク実行中のメンタル・ワークロードを予測することが可能となると考えられる。

さらに、シミュレーションから得られるデータを分析する機能（タイムライン分析、眼球推移ネットワークなど）、シミュレーションを実行する際の環境条件（視界、潮流、風など）、船舶の特性（船舶のタイプ、異常・事故の発生）、ナビゲータの条件（情報読みとり精度などのナビゲータのタスク遂行能力など）のパラメータを変更する機能を付加することで、船舶特性、環境、人的要因の三つから船舶の挙動、ナビゲータの行動とメンタル・ワークロードに与える影響を容易に分析することが可能になると考えられる。

5. おわりに

本研究ではタスク分析の結果に基づき、計画コース追従タスクにおける認知モデルをタスク・ネットワーク技法を用いて構築した。タスク分析に用いた操船シミュレータ実験と同一の状況でシミュレーションを行い、ナビゲータのパフォーマンス、船舶の航行軌跡を再現し、操船シミュレータ実験時のナビゲータの行動と比較した。その結果、構築したモデルは船舶を計画ルートの中央に沿って安全に航行させた。また、舵角度の作成パターンや生成する舵角度の大きさにおい

て、操船シミュレータ実験時のナビゲータの行動とよく似ていた。これらより、構築した認知モデルは操船シミュレータ実験における人間の行動を比較的良好に表していると考えられる。また、シミュレーションを実行する際、乱数を用いており、シミュレーションの結果にはばらつきがある。そのため、船舶の挙動、ナビゲータのパフォーマンスの平均、および標準偏差の値を検討した結果、10回程度のシミュレーションが必要であることがわかった。これらより、シミュレーション・アプローチを現実的にするナビゲータ・モデルを構築することができたと考えられる。

今後の展開として、本研究で構築したモデルに、ナビゲータの短期記憶の状態をモデル化し、それを表示する機能を付加することで、タスク実行中のメンタル・ワークロードを予測することが可能になると考えられる。さらに、シミュレーションから得られるデータを分析する機能、船舶特性、環境条件、ナビゲータの特性に関するパラメータを変更する機能を付加することで、船舶特性、環境、人的要因の三つの観点から船舶航行の安全、ナビゲータの行動に与える影響を容易に分析することが可能になると考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、研究上の多大な示唆・助言を賜った HEURECON の Jens Rasmussen 教授、IT University of Copenhagen の John Paulin Hansen 博士、Risø National Laboratory（デンマーク・リソ国立研究所）の Leif Løvborg 氏、Finn R. Nielsen 氏、ならびに Steen Weber 氏に謝意を表します。また、本研究の中心課題であります船舶シミュレータ実験等で多大な尽力を賜った Danish Maritime Institute（デンマーク海事研究所）の Jakob Buus Petersen 博士、そして日本海洋科学の津金正典部長、安田克氏には心より感謝いたします。また、本研究は文部省科学研究費補助金国際学術研究（共同研究）（課題番号 08044127）の助成によるものであることを付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) Rasmussen, J.: Information Processing and Human-Machine Interaction, An Approach to Cognitive Engineering, North Holland, New York, 1986.
- 2) Hee, D. D., Pickrell, B. D., Bea, R. G., Roberts, R. G., & Williamson, R. B.: Safety Management Assessment System (SMAS): A Process for Identifying and Evaluating Human and

- Organization Factors in Marine System Operations with Field Test Result, Reliability Engineering and System Safety, 65, 125~140, 1999.
- 3) Hollnagel, E.: Reliability Analysis and Operator Modelling, Reliability Engineering and System Safety, 52, 327~337, 1996.
 - 4) Mosneron-Dupin, F., Reer, B., Heslinga, G., Sträter, O., Gerdes, V., Saliou, G., & Ullwer, W.: Human-centered Modelling in Human Reliability Analysis: Some Trends Based on Case Study, Reliability Engineering and System Safety, 58, 249~274, 1997.
 - 5) Cacciabue, P. C.: Modelling and Simulation of Human Behavior for Safety Analysis and Control of Complex Systems, Safety Science, 28(2), 97~110, 1998.
 - 6) Hollnagel, E.: Human Reliability Analysis, Context and Control, Academic Press, London, 1993.
 - 7) Roth, E. M., Woods, D. D., & Pople, H. E., Jr.: Cognitive Simulation as a Tool for Cognitive Task Analysis, Ergonomics, 35(10), 1163~1198, 1992.
 - 8) Cacciabue, P. C., Dectoritis, F., Drozdowich, B., Masson, M., & Nordvik, J. O.: COSIMO: A Cognitive Simulation Model of Human Decision Making and Behavior in Accident Management of Complex Plant, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 22(5), 1058~1074, 1992.
 - 9) 古田一雄, 高橋 信, 吉川榮和, 佐々木和則, 伊藤徹, 松宮正幸, 阪上武温, 清川和宏, 長谷川明: 運転員認知モデルを用いたプラント異常診断過程, 日本原子力学会誌, 38(1), 65~74, 1996.
 - 10) Bautsch, S. H., Narayanan, S., & McNeese, D. M.: Development and Evaluation of a Cognitive Model of Human-Performance in Fighter Aircraft, Proceedings of the IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics, Part 3, 2109~2113, 1997.
 - 11) Zhang, Y., Hearn, G. E., & Sen, P.: A Neural Network Approach to Ship Track-Keeping Control, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 21(4), 513~527, 1996.
 - 12) Parson, M. G., Hubb, A. C., & Cao, Y.: An Assesment of Fuzzy Logic Vessel Path Control, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 20(4), 276~284, 1995.
 - 13) Hearn, G. E., Zhang, Y., & Sen, P.: Comparison of SISO and SIMO Neural Control Strategies for ship track keeping, IEE Proceedings: Control Theory and Applications, 144(2), 153~165, 1997.
 - 14) Itoh, K. Hansen, J. P., & Nielsen, F. R.: Cognitive Modelling of a Ship Navigator Based on Protocol and Eye-movement Analysis, Le Travail Humain, 61(2), 99~127, 1998.
 - 15) 山口俊憲, 伊藤謙治, Hansen, J. P., & Nielsen, F. R.: 認知シミュレーションに基づく船舶ナビゲーション・タスクの分析, 日本人間工学会第38回大会講演集, 124~125, 1997.
 - 16) 山口俊憲, 伊藤謙治: 船舶航行に対する認知シミュレーションアプローチのリスク分析への応用, 日本人間工学会第40回大会講演集, 498~499, 1999.