自動航行システムの安全評価について

(その 2) シミュレーションシステム

正員 不 破 健*

A Study on Safety Evaluation Method for Automatic Navigation System (Part 2) Computer Simulation System

by Takeshi Fuwa, *Member*

Summary

There are various factors to be taken into account for the objective safety evaluation and comprehensive performance evaluation of an automatic ship navigation system. A computer simulation is an effective tool for the safety assessment.

A new computer system suitable for the simulation of the ship navigation and marine traffic is designed and built. The simulation system is composed of a network of different kinds of computers ; one is for numerical calculation using FORTRAN, the second for knowledge processing and the others are graphic work-stations.

Realistic representation of environmental conditions, such as natural, geographical and vessel traffic condition, and suitable modeling of ship motion and judgment and decision-making for ship operation are essential for the evaluation. Simulation monitors by CGI technique are also effective for the subjective evaluation of the simulation results.

Composition and features of the simulation system are introduced here. The real time simulation system with multi-process type is driven by simulation scenario, which contains various for the evaluation. The simulation of an automatic ship navigation in Tokyo Bay shows satisfactory results. The system is expected as a powerful tool for the concrete safety evaluation of the navigation system.

1. はじめに

船舶技術研究所では、自動航行システムの安全性評価を実施するため、航行シミュレーションシステム SISOANAM¹⁾を開発した。ここでは(その 1)²⁾で述べた自動航行システムの安全性評価に続き、航行シミュレーションシステムについて論ずる。ただし、システムの紹介ではなく評価のためのツールとして考察する。また、基本的な部分は既発表^{3,4)}であるので、その後の拡張と改良部およびシステムの特徴を簡単に記述する。

2. シミュレーションの活用

安全評価におけるシミュレーションの役割を整理し、シミュレーションシステムに必要な事項を明かにする。大規模なシステムはその特性を完全に把握することが困難なことも多く、構成要素や機能の多様性から作動環境によって性能が大きく左右されることもある。従って十分な安全性

評価のためには種々の状況における幅広い検討が必要となる。

自動航行システムの安全性や性能の把握には実船試験が最も確実であり、結果も直接的で分かりやすい。しかし、実際に多様な状況を作り出すことには困難が多く、特に極限状態における検証は大きな危険と莫大な費用を伴うので現実的でない。評価対象のシステムおよびその構成要素をモデル化すればシミュレーションにより基本的な特性が理解される。シミュレーションでは様々な条件を容易に設定でき安全確保にとって厳しい条件下での試験も可能であるので非常に実効的で有効な手段となる。さらに、実機の開発に先立ちアルゴリズムだけあればチェックができるので、シミュレーションは実船試験に至るまでの必要不可欠な手法となっている。しかし、モデル化およびシミュレーションの有効性の完全な確認は難しいのでやはり単独では限界があり、実船試験との相補的な活用が肝要である。評価手法が確立されていない場合、あるいは実際のシステムを組み込んだシステム評価には、実時間シミュレーションを行えば実機システムと同じ感覚で主観的な評価ができ

* 船舶技術研究所

Fig. 2 Concept of Simulation System

Fig. 3 Classification and Function of Process

ールするプロセス、そして結果を評価するためのモニタープロセスや記録プロセスを加えシミュレーションシステムが構築される。専門家による主観的評価を可能とするためのモニターとして、鳥瞰/ARPA (Automatic Radar Plotting Aids) 表示や計器表示だけでなく船橋等からの3次元の景観表示の機能をもつ画像表示システムをコンピュータグラフィックスの手法を用いて作成した⁶⁾。

このシステムは、実時間シミュレーションによって評価を行うためのシステムであるが、パラメータの設定によって早送りやスローモーションでの実行も可能である。また、実機の評価の場合には、その制御部分を副コンピュータとして接続し稼動することができる。さらに多様な用途を考慮して、柔軟で拡張性のあるシステム設計を心がけた⁸⁾。

また、時間的に変化するデータを各プロセス間で共通に管理し、時制の整合をとるために、共有データテーブルの管理にはダブルバッファ方式を採用している。全ての有意な状態量は共有データとなるので、その変化がシステムの変化を表すことになる。共有データテーブルはシミュレーションの結果としてディスクに記録されシミュレーション実行終了後に再生され解析される。必要な共有データを効率よく副コンピュータに送るための通信プログラムを作成し利用している。

3.3 シナリオおよびシナリオエディター

Fig. 4 には東京湾を航行する場合に必要な船内の作業、船外への通信、陸上よりの指示、遭遇する環境条件等がイベントとして示されている。これらはシミュレーションのシナリオと考えることができる。シナリオは種々のシナリオ要素からなり、船の行動や環境を規定するデータとシミュレーション管理用フラグとが含まれ時系列データあるいは不変データとして、海域の状態、船舶の航行状況、システムの構成、シミュレーションモデルの指定等を表す。前処理の段階でシナリオ要素が準備されるが、種々の基礎データからシナリオ形式のデータを作成するためのツールは重要である。特に自船の航行と相互干渉をもつ他船との出会いなどの要素はシナリオ調整が必要で、グラフィック編集機能を用いての試行錯誤作業となる。

3.4 環境条件の設定と各種のデータ

Fig. 2 に示す航行環境も、それぞれのプロセスにより作成される。その基礎データには対象海域に固有のデータも必要となるが、現在は東京湾におけるシミュレーションに対するものが用意されている。

3.4.1 地形的条件

海岸線、水深あるいは海底の地質などは、海上保安庁による東京湾のデジタル海図をもとに表現方式に修正を加えて利用している。海岸線データはもっぱら海図や海岸線を表示するモニター画像用に利用されている。一方、灯台・

ブイ等の位置は、それらを結ぶ仮想的な線が航行判断の基準として利用される。浅水域の航行においては船体運動におよぼす水深の影響が重要である。従って水深の情報は浅水域ほど詳細に表現する必要がある。また海底地質は錨泊時には必要な情報となる。この様な地形的条件を効率的に表現するため階層的なメッシュ構造のデータが水深や海底地質の表現に適用されている。

3.4.2 自然環境条件

波浪、風、潮流などのデータは自然現象のモデルと観測値データとに基づいているので、十分な物理的な背景をもちデータ相互の関係にも整合性がある。たとえば潮位や潮流の変化は東京湾の観測データを調和解析した結果であり、波浪のデータは風の変化をモデルに取り込んだ風波とうねりの合成になっている。その結果、自然環境条件のデータは大部分対象海域に固有となる。また、通常自然条件のほかに台風通過時のモデルデータも備え、極限・異常事態に対応するシミュレーションも行うことができる。

共有テーブル上のデータ構造としては、地形などの時間的に不変なデータと外乱などの時系列データとに大別され、さらにメッシュデータと領域データの2種類に分けられる。いずれの場合でもアクセスプログラムにより船の位置など任意点の値が補間されて得られる。データの性質、データの量、およびシミュレーションにおける重要度などが勘案されて、データ構造とモデル化の方法が選定されている。すなわち風や波の平均値などのように海域による変化が極めてゆるやかな現象は領域データとして表現され、潮流など場所により大きく変化するデータは均一のメッシュに表現される。任意の矩形領域に対して突風や渦潮などを発生させることもできる。

3.4.3 交通環境条件

他船との遭遇条件は港湾内の航行で最も重要な環境条件であり、航路の指定、交通管制の方式、あるいは時々刻々の海域の交通状況等により規定される。海域全体の船の動きは個々の船舶の移動により形成され、近くの船は互に干渉するが詳細な相互影響は無視し交通流としてマクロ的に扱うことができる。船舶交通流は出港・入港時刻の時系列(O/D 分布データ)、通過する航路、そして船の挙動の3つの要件により規定される。これらの3つの要素がそれぞれモデル化され後述の方式で交通流が生成・模擬される。基礎データとして交通量調査や港湾統計の分析による東京湾のデータがデータベースに収集されている。そして交通流シミュレーションで用いられるモデル化の手法を踏襲してO/D データを作成している。

データベースには、衝突予防の研究成果としてまとめられた典型的な遭遇パターン⁵⁾があり、避航アルゴリズムの検討や評価に活用されている。また、海域の状態表示を見ながら手動入力ツールで相手船を操船制御し臨機応変の状況設定ができる。

Fig. 4 Simulation Scenario for Navigation in Tokyo Bay

3.4.4 船の属性

シミュレーションは、検討対象の自船や交通環境を形成する様々な船の諸特性を表現する必要がある。このため、本システムには主要目、操縦特性、船の形状などを整理した船の属性データベースがある。主要目データには船種、船型、船長、その他の項目がある。操縦性能データベースには代表的な船型に対して運動方程式の諸係数や旋回試験結果等の指標値、風圧力の係数などの特性表をもつ。これらは水槽試験の結果得られたもの、文献から収集されたものなどで一定の形式で整理されている。またシミュレーションのモードに応じて精粗のモデルが使い分けられるように同一船に対して複数のモデルが用意されている。その他に景観画像表示に用いる船の形状のデータベースがある。

3.5 交通流の作成プログラム

船舶の交通流は他船との遭遇条件を規定する。このシステムでは海上交通工学の分野で用いられるマイクロおよびマクロのシミュレーション手法を統合した方法を開発し利用している。Fig. 5 に交通流作成の流れ図を示す。GPSS を利用した「待ち問題」としてモデル化したマクロシミュレーションにより交通の錯綜による船速低下や VTS 等の交通管制の影響などが容易に表現される。マクロのシミュレーションはマイクロの背景として比較的長い時間間隔で併行稼動するが、動的シミュレーション管理プロセスにより、状況に応じ適切なモデルが自動的に選定され、これらの海域

Fig. 6 GPSS Model and Network of Route in Tokyo Bay

全体の特性は個々の操船の環境条件としてマイクロシミュレーションに反映される。Fig. 6 に東京湾の GPSS モデルを示す⁹⁾。航行は破線で示すネットワーク状の主要航路体系を中心に各船ごとにランダムに設定した目標航路に従って行われる。マイクロモデルでは目標航路の変更やそこからの離脱・変位も表現される。

3.6 船体運動のモデルと動的シミュレーション管理

同一の船に対して数種類の船体運動のモデルが用意されており一つのシミュレーションにおいても状況により使い分けられる。精密な運動モデルは模型船による水槽試験の結果得られたもので、操縦性の分野の研究成果に基づいたモデルである。

様々なシミュレーションの対象海域には多数の船舶が航行しているが精密な運動モデルで検討する必要があるものは限られている。状況において必要な精度のシミュレーションを効率よく実行するために動的なシミュレーション管理プロセスが考案された。自動航行システムのシミュレーションでは、それを搭載した自船には精密モデルを用いるが、遭遇する近傍の他船もそれに準じた扱いが必要となる。Fig. 7 の CASE I は他船の運動モデルが自船からの相対距離に応じて選択される様子を示している。これは各船の運動を規定するコントロールフラグを航行の状況に応じて動的シミュレーション管理プロセスが変化させることにより実現される。また、CASE II は離着桟や錨泊を行っている状況を示す。精密な運動モデルはその適用範囲が限定され、

Fig. 5 Simulation Model of Marine Traffic

Fig. 7 Concept and Functions of Dynamic Simulation Controller

運動のモードに応じてモデルを替える必要がある。また水深が変化すると運動特性が大きく変化する。動的シミュレーション管理プロセスは運動状態や水深に応じてコントロールフラグを変化させる。またシミュレーション全体を効率よく管理するため、各々の船舶の航行を全体の交通流の一要素として扱うか船の運動が意味をもつのかをシナリオの設定に応じて判断しコントロールフラグを制御する。

3.7 画像表示システム⁶⁾

画像表示システムはシミュレーションモニターとして、また主観的な評価用ツールとして重要な意味をもつ。3次元景観図はグラフィックワークステーションを用いて作成表示している。表示内容は様々な船種の船、港湾の風景、灯台、ブイ、突堤、岸壁、建物等で、多面体あるいは多角形、光点として表示され隠面処理をしたコンスタントシェーディングを用いた画像となっている。そして視点からの距離と視角に応じて透視の手法により変換され3次元的な画像として表示される。シミュレーションでは海域を航行する任意の船を指定してその船の任意の視点からの景観を表示させることができるが、通常は船橋からのシーンを表示する。また天候、時刻に応じて表示の色調が変化し夜間も表現できる。システムの画像表示能力はグラフィックワークステーションの機種により異なるが、目安として海域

に100隻の船が航行するシミュレーションでは120度の視野で無限遠方までの船橋からの景観図が毎秒3画面、通常の東京湾のシミュレーションで5~6画面である。画面更新速度のベンチマークテストとしては表示画数2,500画面(10,000座標点)で毎秒9コマ、7,500画面(30,000点)で毎秒3コマの結果が得られている⁶⁾。ARPAなどの表示をする海域情報表示には主コンピュータの画像端末を用いている。ARPA表示と海域情報表示のモードがあり、最大100隻を表示でき、画面上で自船を指定することができる。ARPAモードではレンジの選択など各種の機能が付加されている。海域情報モードでは船舶の識別番号、海岸線、等深線、等高線、潮流ベクトル、風ベクトル等が表示できる。この表示は管制センターの監視レーダの模擬画面としても使うことができる。

計器表示は主コンピュータの別な画像端末に表示される。計器表示画面、相手船の情報表示および航行環境の表示モードが切り換えられる。計器表示には時刻、船首方位、船速、旋回角速度、船の位置、主機回転数、操舵角が表示される。相手船の情報表示では最大5隻の対象船に対するTCPA, DCPA, 方位、船速、船位の情報が、海域情報では風、天候、視程および水深が作表して示される。

これら2次元および3次元の画像表示のパラメータはキーボード操作で簡単に設定・変更でき評価作業に役立つ。

3.8 解析・評価用のツール

シミュレーションの結果や算出された客観的な評価値を分かりやすく表示するためのツールが用意されている。諸状態量の時刻歴、評価指標、イベントの相互関係の作図・表示を行う事後処理用のプログラムである。また、記録データの編集・再生も容易に行えるツールが備わっている。

4. 自動航行システムのモデル

4.1 航行のモデル

自動航行システムの性能をシミュレーションによって評価するためにモデル化すべき機能は、次のようなものである。

- 1) 航行環境, すなわち自然条件や他船の状況を観測する。
- 2) 他船または陸上支援施設と交信し必要な情報を得る。
- 3) 観測データを処理し各種の情報を総合して状況を認識する。
- 4) 安全を確保しつつ, その航行目的を達成するための判断および行動の意志決定を行う。
- 5) 航行意志に基づいて目標航路を設定あるいは変更する。
- 6) 目標航路に従い操船制御を行う。
- 7) 時々刻々の船位, 船速を制御し航行を実現する。

これらはFig. 2の中に示される航行のシーケンスとしてモデル化されている。自動航行システムは海陸一体のシステムの立場より検討されている。船と陸上機能の分担は、

その経済的・社会的条件により定まるが、船上のシステムとしては自己完結自律型システム、陸上の管制センターの指令による受動的な操船制御型システムあるいは、その中間的な形態のモデルが設定できる。

4.2 衝突予防における航行判断

多重遭遇に対しても衝突を回避するアルゴリズムが用いられている。Fig. 8 にこのアルゴリズムの流れ図を示すが、単純な判断部分と知識ベースによる判断・意志決定の部分とに分けられる。判断の手順は以下のとおりである。

1) レーダにより周囲の船舶の航行状態を把握し船位、船速、最接近距離(DCPA)、最接近時間(TCPA)等を推定する。

2) これらの情報から衝突危険のあるターゲット船を特定する。

3) ターゲット船に対しては更に詳細な観測を行い衝突危険度を計算する。

4) 衝突危険度が一定基準をこえる場合には自船のとるべき安全行動を探索する。

5) 安全な行動が見つかるときには、再確認の後に行動変化の時機と方法とが決定され、安全行動がないときには緊急停船が指令される。

これらの一連の作業は操船者の作業をモデル化したものであるが、一定間隔で繰り返され、海域の状況と衝突の危険度とが常に監視されている。以上の判断過程に知識ベー

Fig. 8 Flow of Decision-making for Collision Avoidance Maneuver

スを利用することにより比較的単純なアルゴリズムの組合せによって多様な状況に対応できる柔軟なシステムを容易に構築できる。すなわち単純な遭遇状況に対する基本的な衝突防止のアルゴリズムとそのための航法計算はFORTRANでプログラムされるが、これだけでは複雑な状況下で安全な行動を探索することができず緊急停船が指令される。しかしそのアルゴリズムに含まれる諸パラメータを知識ベースシステムにより状況に応じて調整すると複雑な状況まで対応することができる。また最終的な航行目的や航路の選択などの大局的な判断も同じレベルで加味することが可能となる。

4.3 判断機能のモデルと知識ベースの適用

判断の機能はセンサーや通信により得られる情報を的確に処理し各種の意志決定を行うものである。高度な判断も知識ベースシステムを利用して自動化することができる。知識ベースシステムは各種専門家の知識をコンピュータに移植して推論・判断を行うシステムでありエキスパートシステムとも呼ばれている。ここでは、知識ベース構築用ツールARTを用いたプロダクションシステムとして知識を表現した。

人間の判断からの類推により、判断過程を複数のレベルをもつ階層的なシステムとしてモデル化した。すなわち各種の判断作業の内容ごとの分類とレベル分けを行い、作業ごとの単純な判断、それらの管理、そして、高度な状況判断と総合的な意志決定および判断機能全体の統括管理機能が階層化されている⁷⁾。詳細は続報で述べる予定であるが、上位の判断には知識ベースを利用している。構築したプロトタイプでは、モデル化に対応し知識ベースにおけるルールにも階層的な分類を導入した。具体的には航行に関する法規遵守の判断、避航判断における大局的状況判断と避航アルゴリズムのパラメータ選定、その他の作業管理、故障や異常状態への対処などに分けて必要な知識ベースシステムの長所としてシステムの柔軟性と拡張性があげられる。従って、まずプロトタイプを構築し運用しながら充実することが容易にできる。

5. む す び

安全評価のために開発したシミュレーションシステムの特徴をまとめた。シミュレーションは安全評価に有効で必

要不可欠の手法としての地歩を占めつつある。航行シミュレーションシステムの構築は、自動航行システムの概念設計に対応するもので、AI技術の活用など新しい概念や技術、手法が導入されている。今後、運用・改良により充実を計り、航行システムや海上交通システムの研究への活用が期待される。また、自動航行システムの安全性評価の具体的ツールとして、海上交通の安全の向上に貢献できる。

このシステムは日本造船研究協会と船舶技術研究所の共同研究により設計・構築された。システムの基本設計に多くのアイディアを織り込みシステムの完成に努力した金湖富士夫、沼野正義両氏の尽力を特記するとともに、関係者に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 沼野, 不破: 自動航行システム評価用のシミュレーションシステムSISANAMについて, 日本造船学会誌, No. 698, 昭和62年8月。
- 2) 不破健: 自動航行システムの安全評価について(その1), 日本造船学会論文集第166号, 平成元年11月。
- 3) Fuwa, T., Numano, M. et al.: Simulation of Automatic Ship Navigation and Vessel Traffics, 船舶技術研究報告, 第24巻4号, 昭和62年7月。
- 4) Fuwa, T., Ono, T. & Nishioka, T.: Evaluation Simulator for Automatic Ship Navigation System, 8th Ship Control Systems Symposium, 1987. 10
- 5) 今津隼馬: 避航法に関する研究, 東京大学学位論文, 昭和62年1月。
- 6) 南彰彦: 運航シミュレーション(船舶の入出港CG), 日本造船学会, 第1回イブニングセミナー「CGと応用技術」, 昭和63年11月。
- 7) Fuwa, T., Koyama, T. et al.: A Knowledge-Based System Applied to an Automatic Navigation System, CAMS'89, IFAC Workshop on Expert Systems and Signal Processing in Marine Automation, 1989.8.
- 8) 金湖, 沼野: 船舶航行自動化システムの開発および評価に有効なシミュレーションシステム, シミュレーション, 第8巻第4号, 平成元年12月(掲載予定)。
- 9) Fuwa, T., Kiriya N.: A Hierarchical Structure of Simulation System for Ship Navigation and Marine Traffics, Beijing Int. Conf. Syst. Sim & Scie. Comp. (BICSC), 1989. 10.