船舶航行エキスパートシステムの基礎研究

——システム開発過程における評価について——

松村 尚志*・稲石 正明*・鶴田 三郎*
今津 隼馬*・杉崎 昭生*

Basic Research on an Expert System for Navigation at Sea
——On an Evaluation for Developing an Expert System for Navigation at Sea——

Hisashi MATSUMURA, Masaaki INAISHI, Saburo TSURUTA
Hayama IMAZU and Akio M. SUGISAKI

Abstract

This paper is concerned with an evaluation for developing an expert system for navigation at sea.

The purposes of this study are as follows.

- (1) To discuss how to evaluate the expert system for navigation at sea.
- (2) To estimate future image of the expert system for navigation at sea by evaluating sub-systems which had been constructed by the authors.

This paper shows the methods of quantitative and qualitative evaluation and the results of measurement and research by using these methods.

The summary results of the study are shown below.

- (1) In order to evaluate the expert system for navigation at sea, the authors have proposed items, methods and so on. According to these items, sub-systems which had been constructed by the authors have been evaluated.
- (2) Consideration to rule chaining (forward, backward, procedure) for inference and improvement of displays of outputs are mainly required for future development of the system.
- (3) The size of the inference engine and the number of the rules of the expert system for navigation at sea have been estimated and discussed necessary computers to develop the system.

1. はじめに

近年の船舶運航者の少人数化に対し、削減された運航者の機能補完を計る対策の一つとして、船舶航行エキスパートシステム（以下、エキスパートシステムをESという。）の開発が挙げられる。

著者らは、船舶航行ESをいくつかのサブシステムから構成することを提案し、衝突事故処理ES⁽¹⁾、衝突回避ES⁽²⁾、機関操作ES⁽³⁾をサブシステムとして開発してきた。これらの研究を通して、システム開発のための基礎的な知見は得られたが、推論の高速化、知識ベースの管理方法などに改善すべき問題点も多く残されている。

これまでの研究開発成果を踏まえ

- ・システムの性能
- ・実用レベルのシステム開発

* 正会員 東京商船大学（〒135 東京都江東区越中島2-1-6）

・システム開発規模，開発作業量の予測

について検討することが，今後の船舶航行ES開発に必要である。そのためには，システム開発過程における評価が不可欠であると考ええる。

本研究の目的は，システム開発過程における評価のため評価項目と評価方法などを提案し，既に開発したシステムの評価を行い，今後の船舶航行ESの開発規模，開発作業量について知見を得ることである。

本研究では，まず，システム開発過程に基づく評価方法，評価項目などを提案する。つぎに，既に開発したシステムを提案した評価項目などに従って評価するための測定，調査方法とその結果を示す。得られた測定，調査結果をもとにシステムの性能について評価し，さらに，船舶航行ESの開発規模，作業量などについて考察する。

2. 船舶航行ESの評価

2.1 評価

(1) 評価対象システム

本研究では，従来開発したサブシステムの中で，システムにおける知識ベースと推論機構の分離が完全になされているという理由で機関操作ESを主な評価対象システムとする。

(2) 評価項目

ESのライフサイクルは，計画過程に始まり，開発過程，運用・保守過程を経て，廃棄過程で終わる。ここでは，開発過程における評価項目について検討する。

ES開発は，一般的に，対象領域を設定し，それに必要な知識を獲得整理し，システムを構築した後，システムの動作をテストするという4つの段階に大きく分類することができる。著者らの船舶航行ES開発もこの分類に従って行ったので，評価項目を，図1に示すようにこれらの4つの段階に基づいて分類，整理した。

本研究では，分類，整理された評価項目の中で，特に評価検討が必要と考えられるシステム構築，及びシステム動作に関連したつぎの5つの項目を選択した。

- ・推論機能
- ・推論形式
- ・メタルールの有用性

図1 評価項目の分類

- ・ルール表現形式
- ・熟練者によるシステム動作テスト

(3) 評価方法

定量的な評価には、評価の統一尺度として時間を用いた。時間による評価を行うため、開発したシステムの推論所要時間、知識ベース構築所要時間などの測定を行った。また、定量的な評価が、困難なもの、あるいは不十分なものについてはヒアリングなどの定性的な評価で補った。

(4) 評価基準

本研究では、評価基準は、実務者の判断を基準として用いることとした。定量的、定性的な評価の基準を得るため、現役の運航士（以下、実務者という）に対してヒアリングによる調査を行った。

時間に対する評価基準として、実務者が要求したシステムの応答時間、1分を採用した。定性的な評価項目は、実務者からのコメントなどをもとに良い、普通、悪いの三段階評価とした。

2. 2 時間測定, ヒアリング調査

(1) 推論機能の性能計測

機関操作E Sのプログラムと同じ Prolog 言語で記述した時間測定用のプログラムをシステムに付加して時間測定を行った。時間測定プログラムには、OSに内蔵される時計機能に直接アクセスする Prolog の組み込み述語 (cputime) を用いたが、組み込み述語の時間の精度が0.05secと低いため、測定は、実際のシステム動作と異なり、測定したい機能を100回くりかえして呼び出し、その実行時間を積算する方法で行った。

著者らが開発したE Sの推論機構の機能の分類を図2に示す。この分類は、階層的な機能分類を行ったのであり、前報⁽³⁾における機能分類と基本的に同じものである。これらの各機能は、次の3つに大きく分類できる。

- ユーザ入力、ルールを読み込む入力制御
- 読み込んだデータを推論機構内で処理する演算
- 推論機構から内部記憶、表示へ出力する出力制御

重複・反意データ入力防止機能は、ルールの条件部を記録し、新たに探索した別のルールの条件部と同じものか(重複)、反対の意味のものに該当するかを識別するため(反意)の機能である。ユニフィケーション(Unification)などは、演算のため、文字列のマッチングを実行する機能である。これら2つの機能は、データの入力のために実行されるのではなく、入力されたデータをもとに次に行うべき演算の機能を決定するために実行されるので、演算の機能とした。

機関操作E Sの推論機構の各機能の実行時間を表1に示す。プログラムをコンサルト(インタプリタとして実行するための読み込み)する時間を除いて測定したもので

図2 推論機構の機能分類

表1 推論機構の各機能の実行時間

機能名 \ ケース名		ケース A	ケース B	ケース C
入力制御	解読機能	8.1 (2.7)	7.9 (2.1)	22.6 (3.6)
	入力要求機能	5.4 (1.8)	5.5 (1.4)	14.9 (2.4)
	小計	13.5 (4.5)	13.4 (3.5)	37.5 (6.0)
演 算	比較演算機能	22.9 (7.6)	32.1 (8.5)	28.8 (4.6)
	重複・反意データ入力防止機能	-	73.1 (19.3)	-
	不定データ処理	-	-	117.9 (18.9)
	論理演算機能	5.6 (1.9)	6.4 (1.7)	6.3 (1.0)
	ユニフィケーションなど	189.3 (62.8)	187.7 (49.4)	280.6 (45.1)
	小計	217.8 (72.3)	299.3 (78.9)	433.6 (69.6)
出力制御	メニュー機能	11.7 (3.9)	11.7 (3.2)	11.7 (1.9)
	質問機能	13.5 (4.5)	13.6 (3.6)	32.5 (5.2)
	説明機能	28.3 (9.4)	27.9 (7.3)	28.1 (4.5)
	推論結果記録機能	1.2 (0.4)	1.4 (0.4)	1.6 (0.3)
	推論結果表示機能	15.2 (5.0)	12.4 (3.2)	78.2 (12.5)
	小計	69.9 (23.2)	67.0 (17.6)	152.1 (24.4)
	合 計	301.2 (100.0)	379.7 (100.0)	623.2 (100.0)

(単位 1/100 sec, () 内は、比率で%)

ある。測定ケースは、ユーザの解答によって生じる推論時間の差を測定するため、図3に示すように、解答の種類 (yes, no, unknown) に応じてケースAからケースCまで3種類設定した。

推論時間は、ケースCの場合ケースAの2倍の時間を要している。これは、ケースCの場合は unknown という入力となされるごとに別のルールを解説して推論するためと考えられる。

演算が推論時間の大部分を占め、その中でもユニフィケーションなどに要する割合が大きい。解説機能、入力要求機能の実行時間は推論時間のごくわずかしき占めていない。

(2) メタルールの有用性

メタルールが有る場合と無い場合の推論時間を表2に示す。この場合の推論時間は、表1と異なり、メタルール群を1回だけ検索充足チェックしてから、ある推論結果を出すまでに要した時間の測定結果である。表中のルール数基準とは、機関操作ESの約200ルールを、ルール4倍とは、その約200のルールを単純に4倍したルールを使用したことを示す。ルール基準では、メタルールが有る場合と比較してメタルールが無い場合は、推論時間が、10%程度増加する。この傾向は、ルール数が増えると顕著になり、ルール数が4倍になると、メタルールが無い場合は、メタルールが有る場合と比較して推論時間が、70%程度も増加する。

(3) ルール表現形式

ESの知識ベースを構築していく上で、ルールを蓄積し、ルール間の整合性を保持していくためには、ルールの可読性が高く、操作性が高いという必要がある。

ルール表現形式を評価するために、統一された形式で記述したルールを実務者に提示して、ルールの可読性、操作性についてヒアリング調査を行った。ヒアリング調査の結果、可読性については、意図する状況が読み取れないルールや、条件部の表現に不明確なルールが2、3あったが、十分可読性があるとのコメントが得られた。操作性については、ユーザ実務者による書換えが十分可能であるとのコメントが得られた。

(4) 推論形式

船舶航行ESの推論形式は、実務者の判断メカニズムの分析を通して、運航機能の処理状況によって変える必要があることが得られた。船舶航行ESの推論形式としては、

- a. 監視
- b. 操作・処理の必要性検討
- c. 操作・処理の選択
- d. 操作・処理の実行

の4つの処理状況において、次の3つの推論形式を考えた。

- a. 手続き的推論
- b. 前向き推論
- c. 後向き推論

処理状況の変化に伴う推論形式の変化の一例を図4を用いて説明する。図4は、ある船舶が、通常の航行をしていたところ(監視)、他の船舶と衝

ケース名	質問の解答	推論の結果、理由の選択
ケースA	全てyes	no
ケースB	全てno	no
ケースC	全てunknown	no

図3 推論時間測定の場合

表2 メタルールの有無による推論時間の差
(単位 sec)

		ルール数基準	ルール数4倍
メタルール 無	コンサルトに要する時間	14.4	39.1
	初期条件設定に必要な時間	1.4	5.7
	推論時間	3.8	7.3
メタルール 有	コンサルトに要する時間	15.7	40.4
	初期条件設定に必要な時間	1.5	5.8
	推論時間	3.4	4.3

図4 状況の変化に伴う推論形式の変化

突のおそれが生じて、避航に失敗して衝突し（操作・処理の必要性の検討）、衝突した後の処理を検討したところ（操作・処理の選択）、即座に退船する必要がある、具体的な退船方法を決定することになった（操作・処理の実行）という状況の変化を示す。

この様な状況の変化において、最適と考えられる推論形式としては、衝突前、監視の段階、及び、操作・処理の必要性の検討の段階では、前向きの推論が主で、後向きの推論が従。衝突後、操作・処理の選択の段階では、前向きの推論が主で、手続き的推論が従。操作・処理の実行の段階では手続き的な推論が主で、前向きの推論が従であることを示している。

（５） 熟練者とシステム動作テスト

システムを実際に起動し、システムの操作性、動作特性、出力特性についてヒアリング調査を行った。ヒアリングの結果は、

- ・操作性については、ほぼ満足できる
- ・動作特性については、ユーザの希望でシステム動作を変更できるような柔軟性が必要である。
- ・出力特性については、出力方式の種類を多くし、また、表示内容を簡略化すべきである。

との指摘を受けた。

2. 3 システム開発における作業

（１） ルール構築所要時間

システムの構築は、大きく分けて知識ベース構築と推論機構の構築から構成される。ここでは、前報までのサブシステム開発作業実績をもとに、1ルールあたりの構築所要日数を算出した。知識ベースの構築作業において、知識を得るための準備から、計算機にルールを記述するまでの各段階における作業の比率と、必要とした週の数をもとに、専門家の知識とテキスト知識（合計400ルール）に分けて図5に示す。1週間を5.5日として、知識ベースを構築するのに必要な1ルール、1人あたりの日数は、

- ・専門家の知識のルール化の場合、約0.80日
- ・文献で得た知識の場合、約0.36日であった。

専門家から得た知識は、テキストから得た知識に比して、分類・手直しの段階が占める割合が大きい。これは、専門家が持つ知識体系は、必ずしも、計算機に記述する形式のように、整然と整理されていないことによる。

（２） ルール数の推定

船舶航行ESの開発において、通常航行に関するものと事故対応に関するサブシステムに分けて検討してきた。前報までの検討内容をもとに、船舶航行ESを、通常の航行に関するサブシステム7つと、事故対応に関するサブシステム5つの合計12のサブシステムに分類することができた。各々のサブシステムが、どのような運航機能から構成され、運航機能が、いくつのルールを必要とするかを推定することにより、船舶航行ESに必要なルール数を推定した。その結果の一部を表3に示す。

ルールの種類は、機能毎に大きく状況監視機能、処理機能、機関操作機能・監視機能、事故対応機能、機関修理機能、及び、通信その他に関するものに分類した。

衝突回避サブシステムの例では、交通環境監視機能に関するルール80、地形環境監視機能に関するルール20、自

図5 知識ベースの構築所要時間

表3 各サブシステムのルール数

- 1) 状況監視機能
 - 1 交通環境監視機能
 - 2 地形環境監視機能
 - 3 自然環境監視機能
 - 4 運送状態解析機能
 - 5 船舶状態監視機能
- 2) 処理機能
 - 1 避航機船処理機能
 - 2 応急機船処理機能
 - 3 乗揚回避機船処理機能
 - 4 任意座礁処理機能
 - 5 荒天回避機船処理機能
 - 6 荒天応急機船処理機能
 - 7 走離回避機船処理機能
 - 8 走離応急機船処理機能
 - 9 錯泊処理機能

衝突回避	乗揚回避	荒天回避	走離回避	・	衝突事故対応	乗揚事故対応	火災事故対応	浸水事故対応	・	
80	(40)	(40)	(20)							80
(20)	80	(20)	(40)							80
(20)	(40)	80	(80)							80
80	(40)	(40)	(20)							80
(40)	(40)	80	(80)							80
80										80
80	40				80			(80)		40
	(40)									80
		40								40
		40								40
			40							40
			40							40
			40		(40)	(40)	(40)			40
420	340	380	400		500	320	360	350		2660

然環境監視機能に関するルール20などから構成され、合計420のルールを必要とすることを示している。括弧で囲まれた数字は、あるサブシステムが、横の列で他のサブシステムのルールと共有できることを示している。例えば、乗揚回避サブシステムの交通環境監視機能に関する40ルールは、衝突回避サブシステムの80ルールのうちの40ルールと同じものであることを示す。ルールは、一般的な船舶を対象に検討したため、実際に構築する場合、船の種類、仕様などによって、ルール数が増加するものと考えられる。

各サブシステムに必要とするルールを合計すると、船舶航行ESの構築には、最低でも2700程度のルールが必要なが見込まれる。

3. 評価と考察

3.1 評価結果

測定、調査などから得られた評価結果を表4に示す。評価段階は、実務者の要求するシステムの応答時間、1分と実務者のコメントなどをもとに、各々の評価項目について、良い、普通、悪いの3段階とした。

推論機能は、表1の測定結果では、解答の種類によって推論時間に差があるが、いずれの測定ケースも実務者の要求する応答時間、1分におさまるので良いとした。

メタルールの有用性は、ルール数の多いとき(800ルール)が、ルール数の少ないとき(200ルール)に比して、有用性があるといえる。ルール数が少ないときでも、メタルールの有無による推論時間の差は、メタルールが有る場合は、メタルールが無い場合に比べて、推論時間が10%程度短くなり、推論時間も実務者の要求する応答時間内におさまるので良いとした。

ルール表現形式は、可読性、操作性がよいというヒアリング結果が得られた。また、ルールに、一般的なプロダクションルールに付加して記述する部分が存在しても、表1に示すように、解読時間のシステムの応答時間に占める割合が少ないので良いとした。

推論形式は、すでに開発したサブシステムでは、システムごとに1形式(前向き、もしくは後向き)に限定されている。推論形式は、運航機能の処理状況の変化によって、パターンを変える必要があることがわかったので、悪いとした。

熟練者によるシステム動作テストは、操作性についてはユーザの良いという指摘を受けたが、動作、出力に改良すべき点が多いと指摘されたので、普通とした。

3.2 考察

(1) 評価項目と評価方法

船舶航行ES評価のために分類、整理した評価項目のすべてについて評価を行っていないが、著者らの提案した5つの評価項目で、将来のシステム開発に必要な指針を得ることができるものとする。

評価には、時間の測定による定量的な評価が困難なもの、不十分なものについては、ヒアリングに重点をおいた定性的な評価で補足した。評価の方法としては、時間測定以外にもできるだけ定量的な評価方法を導入することが望ましいと考える。

(2) 知識ベース構築

ルールの表現形式の評価結果は、良いとされたが、このようなルールの構築には、図5に示すように、1ルールあたり、一人で、専門家の知識のルール化の場合、約0.80日、文献で得た知識の場合、約0.36日を要した。船舶航行ESの知識ベースは、ルール数が少なくとも2700程度になると推定され、1人で知識ベースを構築する日数を作業実績をもとに計算すれば、テキストの知識だけの場合約1000日、専門家の知識だけの場合約2200日必要となる。知識を、可読性、記述性、操作性のある妥当な形式のルールとして構築するためには、かなりの日数が必要である。

(3) 推論機構構築

表4 評価結果

評価項目 \ 評価段階	良い	普通	悪い
推論機能	○		
メタルールの有用性	○		
ルール表現形式	○		
推論形式			○
熟練者とシステム動作テスト		○	

推論形式の評価から、推論形式は運航機能の処理状況によって変えられ、3種類必要であることがわかった。3種類の推論形式を持つ推論機構は、1種類しか推論形式を持たない推論機構より、プログラムステップが増加することは明らかである。一つの見方として、機関操作ESの推論機構を基準とすれば、船舶航行ESの推論機構のプログラムステップは、その3倍の規模のものを開発する必要があるということがいえる。

推論機構のプログラムステップが増大することは、推論時間が長くなることにつながると考えられる。機関操作ESでは、測定ケースによって推論時間に差があり、また、推論時間のうち、ユニフィケーションが大きな時間を占めるため、船舶航行ESの推論機構の設計は、これらの点を十分考慮して行う必要がある。

(4) システム動作

熟練者が実際にシステムを動作させての評価では、操作性は、ほぼ満足できるという結果が得られた。評価に使用した機関操作ESには、初期状況設定データなどの自動入力、重複・反意データ入力防止機能などユーザの入力負担を軽減する機能が設けられており、これらの機能は、システムに基本的に必要なものと考えられる。

システム動作特性と出力特性については良好な評価結果が得られなかった。ユーザによって動作特性を変更できる柔軟性システムに持たせることは、推論機構の改善によって可能であると考ええる。出力特性については、出力方式として数字、図、色などを用いて、表示内容を簡略化することにより、出力の意味を正確に早くユーザに理解させるための工夫が今後のシステム開発に必要である。

(5) システム規模と計算機

船舶航行ES構築に基本的に必要とされるルール数約2700の場合の推論時間を、ルール数200の機関操作ESの測定結果から比例計算すると、メタ推論を行う場合でも約34秒を要する。これに、プログラムをコンサルトする時間を加えると、ユーザの要求するシステムの応答時間、1分を越えることとなる。また、推論形式を3種類設定するならば、推論時間が、さらに、長くなる可能性がある。

前述した適切な推論機構の設計とともに、処理速度の速い計算機の導入が船舶航行ESの開発には不可欠である。必要とされる推論形式の種類とルール数をふまえた船舶航行ESの開発は、機関操作ESを開発した計算機のMIPS値(TOSBAC・UX-700, 約0.7 MIPS)の100倍程度のMIPS値をもったスーパーミニコン程度で可能であると考ええる。

4. 結論および今後の課題

4.1 結論

本研究では、船舶航行ESの開発過程における評価のための研究から次の結論を得た。

(1) 船舶航行ESの開発過程における評価項目、評価方法などを提案し、これらによって、評価した結果、既に開発したサブシステムを評価した。

(2) 評価のための測定、調査の結果から、今後の船舶航行ES開発のために必要なルール数とその構築所要時間、および、推論機構の規模を推定した。

(3) 評価の結果、船舶航行ESの開発では、推論の形式の多様化、システム動作特性、システム出力特性についての改善が必要である。

(4) 船舶航行ESに必要なルール数と推論機構の規模、及び、システムに要求される応答時間をもとに開発に必要な計算機の能力について指針を与えた。

4.2 今後の課題

(1) 残された評価項目

本研究で提案した評価項目のうち、評価を行わなかったものについて評価を行い、細部にわたって検討することにより、総合評価方法の提案及び実行が今後必要である。

(2) 定量的評価方法の検討

定量的な評価方法として、提案した時間以外にも定量的に評価するための方法を検討すべきである。

(3) 推論形式の改善

将来のシステム開発には、主に、推論機構において推論形式の改善が必要であることがわかった。多様な推論形式を有したツールの開発を試みたい。

5. お わ り に

本研究では、船舶航行ESの開発過程における評価のために、評価項目と評価方法を提案し、すでに開発したシステムを評価し、システム開発過程における評価について、また、システムの開発について知見を得ることができた。今後、検討すべき問題も多いが、本研究で得られた結果を基に、今後とも研究を続けていきたい。

最後に、本研究に際し、ヒアリング調査に快く応じてくださった川崎汽船松本恭昇氏に対して深く謝意を表する次第である。なお、本研究は、文部省科学研究補助金一般研究（B）（課題番号 63460068）による。

参 考 文 献

- (1) 鶴田三郎, 稲石正明, 松村尚志, 杉崎昭生: 衝突事故対応エキスパートシステムの基礎研究, 日本航海学会論文集, 75号, 昭和61年9月
- (2) 鶴田三郎, 松村尚志, 稲石正明, 今津隼馬, 杉崎昭生: 船舶航行エキスパートシステムの基礎研究—衝突回避エキスパートシステム—, 日本航海学会論文集, 77号, 昭和62年9月
- (3) 稲石正明, 松村尚志, 鶴田三郎, 今津隼馬, 杉崎昭生: 船舶航行エキスパートシステムの基礎研究—集中タワーにおける機関操作エキスパートシステム—, 日本航海学会論文集, 79号, 昭和63年9月

質 疑 応 答

原 潔 (神戸商船大学): エキスパートシステムを評価するには、システムの有効性、適用範囲などの評価項目が重要と考えますが、前刷り中の評価項目のうちシステム動作の項目をすでに開発しているシステムへ適用された結果はいかがでしょうか。

松村尚志: システム動作につきましては、評価項目の一部しか、評価を行っていません。

本論文の3.1 評価結果を御参照下さい。