

Systems Approach を用いた自律船のコンセプト設計

47166681 伊藤 航大
指導教員 稗方 和夫 准教授

These days, autonomous ships or remote ships are being developed all over the world. In the beginning phase of development of an autonomous ship, it is necessary to design an appropriate concept. Although the concept of autonomous ship is designed by MUNIN and ReVolt, the concept of MUNIN and ReVolt may not necessarily be appropriate because the performance required for autonomous ship differs for each stakeholder in the maritime cluster. Based on systems approach, this study proposes the method to discuss the feasible and implementable specification of autonomous ships from a viewpoint of each stakeholder. Case study showed that proposed method can evaluate the superior designs of autonomous ship including MUNIN and ReVolt.

Key words: Systems Approach, Autonomous ship, Stakeholder Value Network, Object Process Methodology

1 緒言

Rolls-Royce 社が行っている AAWA、EU のプロジェクトである MUNIN、DNV-GL 社が行っている ReVolt などをはじめとして近年、世界的に船舶の自動化・無人化コンセプトの開発が進められている。

海運会社や造船会社などの利害関係者は自律船に対して異なるニーズを持っており、自律船のコンセプトは全ての利害関係者のニーズを満たすことが理想である。しかしながら、相反するニーズが存在し、全ての利害関係者のニーズを満たすことは難しい。実際には、特定の利害関係者にとって最適な選択をする代わりに、多くの利害関係者が満足しうる意思決定を目指すこととなる。

本研究では、意思決定の支援として、利害関係者ごとに異なるニーズを明確に記述し、モデルベースで性能を見積もることで、優れた自律船のコンセプト設計案を検討するフローを提案する。

具体的には、Systems Approach を用いて自律船コンセプトの設計フローを提案し、実証する。利害関係者ごとのニーズを Stakeholder Value Network(SVN)を用いて明らかにし、ニーズに基づき自律船の性能を評価する評価軸を決定する。次に、ニーズから Object Process Methodology(OPM)を用いて既存船舶に関わる Function と Form をマッピングし、自律船コンセプト設計における意思決定項目を Morphological Matrix(MM)として表現する。意思決定項目の組み合わせとして表現される自律船コンセプトを、選択した評価軸に基づき評価し、パレート最適なコンセプトを算出する。MUNIN や ReVolt などの既存の自律船コンセプトを評価することで、提案する自律船の設計フローが機能することを確認する。

2 自律船の設計フロー

2.1 概要

本提案手法は 2.2 節から 2.6 節に示す 5 つの段階をもつ。最終的なアウトプットはいくつかの評価軸に沿ったパレート最適な自律船の設計案である。

2.2 利害関係者の分析と評価軸の選定

自律船を設計するうえで考慮すべき利害関係者を

SVN により図示し、自律船に関する意思決定者、第一受益者、意思決定者に関わる一次的な利害関係者を決定する。意思決定者を決定することで意思決定者がコントロールできる範囲に応じて自律船の設計領域が決定できる。第一受益者を決定することで自律船プロジェクトがどのニーズに対して貢献するのかが決定できる。意思決定者に関わる一次的な利害関係者を決定することで自律船プロジェクトを各利害関係者の立場から分析できる。

次に、設計した自律船を評価するための評価軸を、第一受益者のニーズや意思決定者に関わる一次的な利害関係者のニーズを考慮して選定する。評価軸は systems engineering の分野において ility と呼ばれる考え方に基づいて定義する。ility とは、System に要求される非機能要件である¹⁾。例として、Flexibility や Maintainability などが挙げられ、“ility”という接尾語で終わることが多いことから、このように名付けられた。非機能要件とは、System が果たすべき機能を達成したあとで発生する、その System の付加価値を向上させる要件である。

2.3 OPM による既存船舶の機能の分析

複雑システム概念モデリングに優れたシステムモデリング言語 OPM により、既存船舶の機能を分析する。OPM の書き方は Crawley ら²⁾の表現を参考にし、MM の作成が容易になるよう修正した。Intent から Function を書き下し、Function を実現する Form として何を選択すれば良いかという問題として記述する。Intent とは便益を表現するための変数の定義と、(対象の変数を変化させる)変換プロセスである。Function はシステムの挙動である。Form とは、システムにおいて物理的、または情報的に存在する事物である。

2.4 Morphological Matrix の作成

意思決定項目を表形式で網羅的に表現する技法である MM を用いて、自律船の設計において考えられる選択肢を表現する。先に作成した OPM による既存船舶のモデリング結果から自律船の Form として何を選ぶべきかという意思決定を MM で表現する。

2.5 評価軸に対応した評価値の計算

選定した評価軸に基づき、評価値の計算を行う。具体的な計算方法は評価軸によって変化させる。

2.6 パレート最適解の計算

評価軸に沿って各設計案をプロットし、パレート最適な設計案を算出する。自律船の設計案は膨大な設計案のうち、パレート最適なものだけに絞られる。

3 ケーススタディ

3.1 利害関係者の分析と評価軸の選定

第一のステップは自律船プロジェクトに関わる利害関係者の分析である。

文献³⁾と海事関係者との議論により SVN を作成した。自律船プロジェクトを各利害関係者の立場から評価するために、作成した SVN から意思決定者・第一受益者・意思決定者に関わる一次的な利害関係者を抽出し、Fig. 1 に記述した。意思決定者を海運会社、第一受益者を荷主、意思決定者に関わる一次的な利害関係者を造船会社、船級協会、港湾局、保険会社、そして船用機器メーカーとした。自律船プロジェクトが主に寄与するニーズは海運会社から荷主に流れる「海上輸送サービス」と定義した。

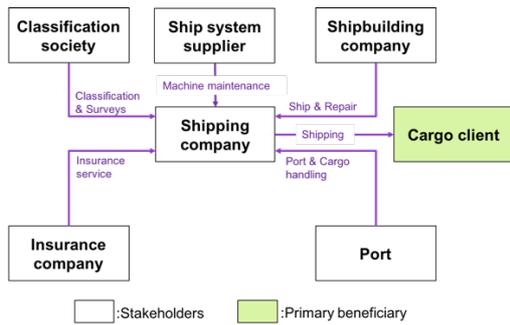


Fig. 1 SVN of primary beneficiary and stakeholders

第二のステップはニーズの達成度を測るための評価軸を選定することである。つまり「良い」海上輸送サービスとはなにかを考察することである。ility の候補を各利害関係者のニーズごとに列挙し、そこから重要なものを選定したものを Table. 1 に示す。評価軸は多すぎるとパレート最適解が多数算出され、設計案の絞込みができない。また 4 軸以上になると、可視化ができない。故に、本ケーススタディでは、最大で 3 軸までの評価軸を選定した。

Table. 1 Morphological Matrix for decision making

NEEDS	STAKEHOLDER	SELECTED ILITY
SHIPPING	Shipping company	Economy, Operational Safety
SHIP & REPAIR	Shipbuilding company	Economy, Reliability, Modularity
CLASSIFICATION & SURVEYS	Classification society	Reliability, Flexibility
PORT & CARGO HANDLING	Port	Flexibility, Operational Safety
INSURANCE SERVICE	Insurance company	Operational Safety, Clarity
MACHINE MAINTENANCE	Ship system supplier	Reliability, Maintainability

3.2 OPM による既存船舶の機能の分析

OPM を用いて文献⁴⁾を参考に既存船舶の機能を分析したものが Fig. 2 である。Intent における変数は Ship と Cargo, 変換プロセスは Shipping である。Shipping を実現するための Function として Routing, Lookout, Maneuvering, Routing for avoiding Hazard, Loading, Maintaining, Networking, Accommodating, Providing power, Berthing-unberthing, IT security, Communicating, Life supporting

cargo, Maintaining, Networking, Accommodating, Providing power, Berthing-unberthing, IT security, Communicating, Life supporting が考えられる。Form については抽象度の高い General Form とより具体的な Specific Form に分けて記述した。本定義におけるコンセプト設計とは Function を実現するための Form を選択肢から決定することである。コンセプト設計は、最終的な技術システムとしての特性に大きな影響を及ぼす。

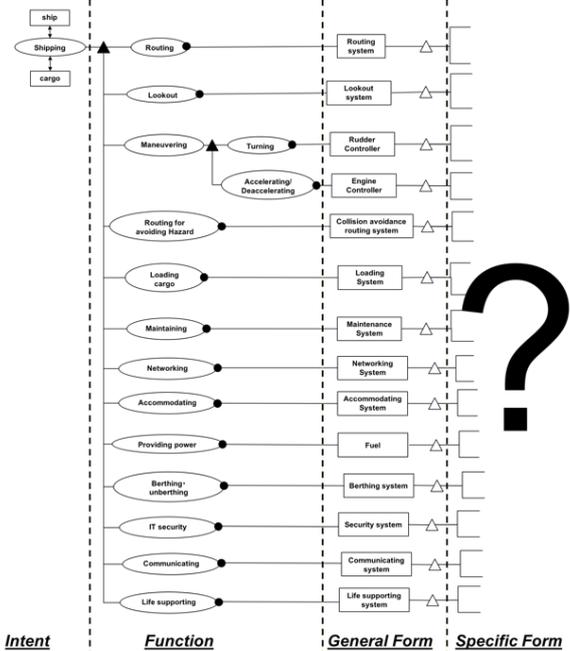


Fig. 2 modeling of conventional ship

3.3 Morphological Matrix の作成

Fig.2 に示した既存船舶のモデリングにおいて Specific Form として何を選ぶべきか検討するために Fig. 3 に示す MM を作成した。自律船の設計案は MM の各行において単一の Specific Form(SF)を選択することで得られる。本ケーススタディでは、その中でも特に自律船に関して影響が強いと思われる Lookout system (ID = 2, 3)、Rudder controller (4, 5)、Collision avoidance routing system (8, 9)、Maintenance system(11)、Accommodating system (13)を考慮することとする。Collision avoidance routing system にはいくつかの方法が考えられているが、本ケーススタディでは TCPA・DCPA・Fuzzy ルールにより構成されたシステムを対象とした。

ID	GENERAL FORM	SF1	SF2	SF3
1	Routing system	Human onshore	Weather routing	
2	Lookout system	OS	Human remote & Radar & AIS	No human & Image recognition & Radar & AIS
3		CA	Human onshore & Radar & AIS	No human & Image recognition & Radar & AIS
4	Rudder controller	OS	Human onshore	Automated
5		CA	Human remote	Automated
6	Engine controller	OS	Human onshore	Automated
7		CA	Human remote	Automated
8	Collision avoidance routing system	OS	Human onshore	TCPA・DCPA・Fuzzy
9		CA	Human onshore	TCPA・DCPA・Fuzzy
10	Loading system	Human onshore	Human remote	Automated
11	Maintenance system	Human onshore	Hull & equipment monitoring	Monitoring & auto repairing
12	Networking system	L band	Ka band	Ka & L band
13	Accommodating system	Hotel	Small hotel	No hotel system
14	Fuel	C heavy oil	LNG	
15	Berthing system	Human onshore	Expert system	Deep learning
16	Security system	High	Mid	Low
17	Communicating system	SCC	Whistle & radiotelephone	
18	Life supporting system	None	Yes	

Fig. 3 MM of autonomous ship

また、MM における各意思決定項目は、独立ではなく互いに制約をもっている。ケーススタディで考える意思決定項目に関する制約として、Accommodating system(13)において、Hotel (船員の宿泊・生活システム) は完全無人化を達成しない以上は、なくすことはできない。よってこの制約を考慮し、Lookout system (2, 3)、Rudder controller (4, 5) が決定されると自動的に Accommodating system(13)が決定されるよう設定した。Collision avoidance routing system (8, 9)は TCPA・DCPA・Fuzzy ルールに固定した。故に、ID2・3・4・5・11 を考慮すれば良く、本ケーススタディで考慮する自律船の設計案の総数は $3^5 = 243$ 通りである。

3.4 評価軸に対応した評価値の計算

3.4.1 はじめに

Table. 1 に示した評価軸に従って、各評価値を計算する。計算する評価軸は Economy、Operational Safety、Reliability、Flexibility、Modularity である。

3.4.2 Economy の計算

Economy は船舶を自律化するためのコストと定義した。自律化のコストを算出するために、Stopford のキャッシュフローモデルを用いる⁵⁾。Stopford は船舶のキャッシュフローを収益とコストに分解した。コストは Capital costs, Operating costs, Voyage costs に分割できる。本ケーススタディでは、船舶の収益と Voyage costs は自律船と既存船舶で変動がないと仮定する。

Lookout system (ID = 2, 3)、Rudder controller (4, 5) は Operating costs と Capital costs に影響を与える。具体的には人件費の変動と新技術の開発費用を考慮した。

Accommodating system (13)は Capital costs に影響を与える。これは自動化による船員の減少によって、船員の生活に必要な設備を削減することができるからである。

3.4.3 Operational Safety の計算

Maintenance system(11)は Operational Safety に寄与しないと考え、Lookout system (2, 3)、Rudder controller (4, 5)の影響を評価する。Operational Safety は開発した海上交通シミュレータにより算出された船舶の衝突数とした。シミュレータにはマルチエージェントシミュレーションを用い、各エージェントは各船舶とした。また、シミュレータは外洋(OS: Open sea)と輻輳海域(CA: Congested Area)の二海域に対して適用している。

(a). シミュレータにおける自律化の考慮

MM に応じて衝突数を計算するためには、シミュレータは自律船の設計案の候補に従って、異なるアウトプットを算出できる必要がある。

開発した海上交通シミュレータに対して、新たに「見張り失敗確率: p」と「操舵の不確実性: Z」を導入する。シミュレータ上では、Time step ごとに各船舶において、飛行操舵の基準となる TCPA(Time of Closest Point of Approach)・DCPA(Distance of Closest Point of Approach)が計算され、その TCPA・DCPA を用いて避航の判断がされている。「見張り失敗確率: p」とは、その TCPA・DCPA が計算されない確率である。これにより、他船の動向を把握することに失敗し、取るべき避航行動を取れない危険性が生じる。「操舵の不確実性: Z」とは、現在の舵角に対して与える最大 Z 度のランダムなノイズを指す。「見張り失敗確率: p」は Lookout system (ID = 2, 3)に関係し、「操舵の不確実性: Z」は Rudder controller (ID = 4, 5)に関係する。

(b). パラメータの設定と衝突数の計算結果

見張り失敗確率pと操舵の不確実性Zの値を ID2~5 の選択に応じて変化させ、シミュレーションを行った。それぞれ発生させた船舶数の累計が1000隻になったところでシミュレーションを終了した。Table. 2 にその結果、算出された衝突数を示す。

Table. 2 Collision number Left: OS / Right: CA

ID2	ID5	Times	ID3	ID5	Times
SF1	SF1	0	SF1	SF1	1
	SF2	0		SF2	21
	SF3	0		SF3	70
SF2	SF1	0	SF2	SF1	3
	SF2	0		SF2	63
	SF3	1		SF3	53
SF3	SF1	1	SF3	SF1	3
	SF2	1		SF2	68
	SF3	2		SF3	58

3.4.4 Reliability・Flexibility・Uncertainty・Modularity・Maintainability の計算

Reliability・Flexibility・Uncertainty・Modularity・Maintainability は下記のように設定した。計算方法が plus の場合には、各設計案の評価値は MM の各セルの特性値を総和することによって得られる。mult の場合は各セルの特性値を総積する。特性値の設定について、plus の場合には、0~10 までの値で特性値を設定した。mult の場合には、0~1 までの値で特性値を設定した。Economy を含め、特性値を設定したものを Fig. 4 に示す。

ID	GENERAL FORM	TYPE	SF1	SF2	SF3
2	RELIABILITY	none	Human onboard & Radar & AIS	Human remote & Radar & AIS	No human & Image recognition & Radar & AIS
		mult	0.95	0.98	0.99
		plus	10	9	5
		mult	0.9	0.4	0.7
		plus	8	5	3
		plus	0	-50	-100
3	RELIABILITY	none	Human onboard & Radar & AIS	Human remote & Radar & AIS	No human & Image recognition & Radar & AIS
		mult	0.93	0.97	0.99
		plus	9	5	3
		mult	0.8	0.3	0.5
		plus	8	5	3
		plus	0	-70	-140
4	RELIABILITY	none	Human onboard	Human remote	Automated
		mult	0.94	0.98	0.99
		plus	10	9	5
		mult	1.0	0.5	0.9
		plus	7	5	3
		plus	0	-25	-50
5	RELIABILITY	none	Human onboard	Human remote	Automated
		mult	0.90	0.97	0.99
		plus	9	6	4
		mult	1.0	0.4	0.8
		plus	7	5	3
		plus	0	-10	-40
11	RELIABILITY	none	Human onboard	Hull & equipment monitoring	Monitoring & auto repairing
		mult	0.95	0.97	0.99
		plus	9	8.5	8
		mult	0.8	0.8	0.8
		plus	3	6	2
		plus	0	-20	-50
13	RELIABILITY	none	Hotel	Small hotel	No hotel system
		mult	0.98	0.99	0.99
		plus	0	0	0
		mult	1.0	1.0	1.0
		plus	5	8	10
		plus	0	-175	-350

Fig. 4 Metrics value of MM

3.5 パレート最適解の計算

3.5.1 はじめに

Table. 1 に示した評価軸に従ってパレート解の計算を行う。MUNIN と ReVolt の設計案を比較対象とする。紙面の都合上、海運会社と船級協会の場合のパレート解の計算について説明する。

3.5.2 海運会社の場合

海運会社(Shipping company)の観点から自律船について検討を行う。選定した評価軸は Operational Safety と Economy である。Operational Safety の計算では ID11 Maintenance system は運行上の安全に寄与しないと考え、 $3^4 = 81$ 通りの設計案について考察した。Fig. 5 に、MM から算出された 81 通りの自律船の設計案をプロットした結

果を示す。縦軸はシミュレータによって算出された衝突数を示し、横軸はキャッシュフローの変化量を示す。左下(U: Utopia point)に向かうほど、その設計案が優れた設計案であることを示す。81の設計案から7つのパレートな設計案が得られた。Table. 3にパレート最適解であるA(ReVolt), B,C,D,E,F,G(MUNIN)の内訳を示す。ReVolt・MUNINともにパレート最適な設計案であると評価された。

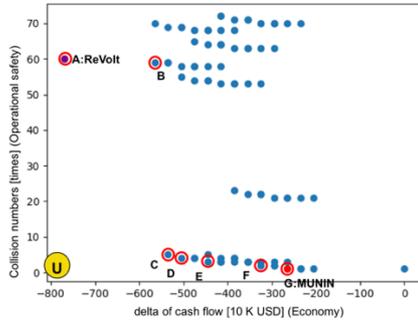


Fig. 5 Plot of design options (Shipping company)

Table. 3 Breakdown of pareto solutions

	ID2	ID3	ID4	ID5
A	SF3	SF3	SF3	SF3
B	SF3	SF3	SF2	SF3
C	SF3	SF3	SF3	SF1
D	SF3	SF3	SF2	SF1
E	SF2	SF3	SF2	SF1
F	SF3	SF1	SF2	SF1
G	SF2	SF1	SF2	SF1

3.5.3 船級協会の場合

船級協会(Classification society)の立場から自律船についての検討を行う。選定した評価軸は Reliability と Flexibility である。自律船の設計案の候補は、3.3で示したように 243通り存在する。Fig. 6に設計案をプロットしたものを示す。パレート最適な設計案は全部で18存在した。ReVolt(R)・MUNIN(F)ともにパレート最適な設計案であると評価された。

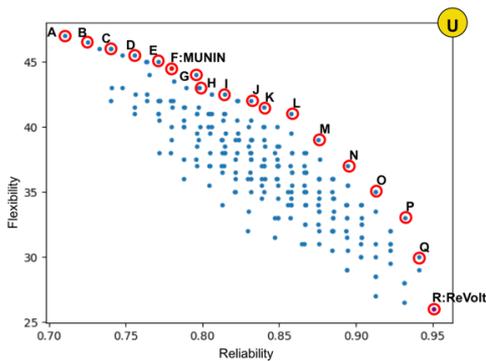


Fig. 6 Plot of design options (Classification society)

3.5.4 まとめ

ReVoltやMUNINの設計案を提案する自律船の設計フローに従って評価できた。また膨大な自律船の設計案の候補をパレート最適解のみに絞ることができた。意思決定者の効用関数に従って設計案を選択することで適切な自律船の設計を行うことができる。各利害関係者の立場から、

パレート最適解の全設計案に占める割合を記述したものを Table. 4 に示す。

Table. 4 Design option reduction by selecting Paretos

STAKEHOLDER	DESIGN OPTIONS(A)	PERETO SOLUTIONS(B)	B/A
SHIPPING COMPANY	81	7	8.6%
SHIPBUILDING COMPANY	243	56	23.0%
CLASSIFICATION SOCIETY	243	18	7.4%
PORT	81	1	1.2%
INSURANCE COMPANY	81	1	1.2%
SHIP SYSTEM SUPPLIER	243	17	7.0%

4 考察

第3章のケーススタディを通して、各利害関係者の立場からみた適切な自律船の設計案を算出した。Fig. 5やFig. 6からわかるように、適切な設計案は利害関係者ごとに異なることがわかった。これを踏まえ、自律船プロジェクトはどのニーズに寄与し、利害関係者がどのようなilityを求めているかを正確に把握し、それらに応じた設計をすることが重要であると言える。

5 結論

本研究では、複数の利害関係者が自律船の設計について意思決定する際の支援として、利害関係者ごとに異なるニーズを明確に記述し、モデルベースで性能を見積もることで、優れた自律船のコンセプト設計案を検討するフローを提案した。具体的には、利害関係者ごとのニーズをSVNを用いて明らかにし、ニーズに基づき自律船の性能を評価する評価軸を決定した。次に、ニーズからOPMを用いて既存船舶に関わるFunctionとFormをマッピングし、自律船コンセプト設計における意思決定項目をMMとして表現した。意思決定項目の組み合わせとして表現される自律船コンセプトを、選択した評価軸に基づき評価し、パレート最適なコンセプトを算出した。MUNINやReVoltなどの既存の自律船コンセプトを評価することで、提案する自律船の設計フローが機能することを確認した。

文献

- 1) de Weck O.L, Roos D, and Magee C: Engineering Systems Meeting Human Needs in a Complex Technological World, The MIT Press, 2011.
- 2) Crawley E, Cameron B, and Seleva D: System Architecture, Boston, the United States of America, PEARSON, 2014.
- 3) 稗方和夫, 満行泰河, 上野隆治, 和田良太, 和中真之介, Bryan Moser. 海事産業におけるIoT技術導入の意思決定支援に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 第24号, pp. 735-738, 2017.
- 4) Brown A: Reengineering the Naval Ship Concept Design Process, Research to Reality in Ship Systems Engineering Symposium, ASNE, September, 1998.
- 5) Stopford M, Maritime economics. London: Routledge, 2009.