

令和2年(第20回)海上技術安全研究所研究発表会

自動避航アルゴリズムの評価に関する検討



知識・データシステム系
南真紀子、丹羽康之、佐藤圭二、間島隆博



本発表の内容

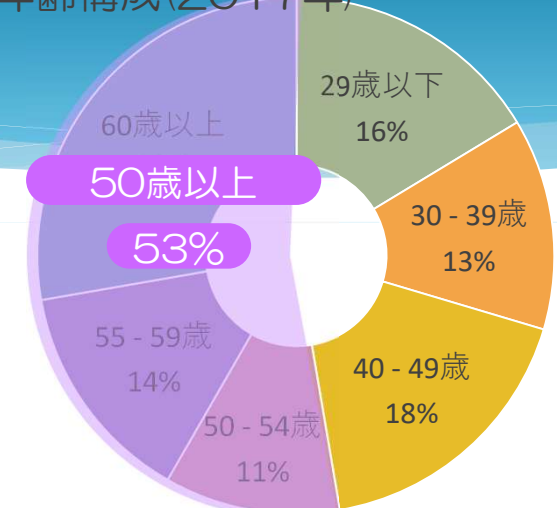
- *背景
- *自動避航システムの評価
- *避航アルゴリズムの評価
- *シミュレーションによる評価例
- *まとめ



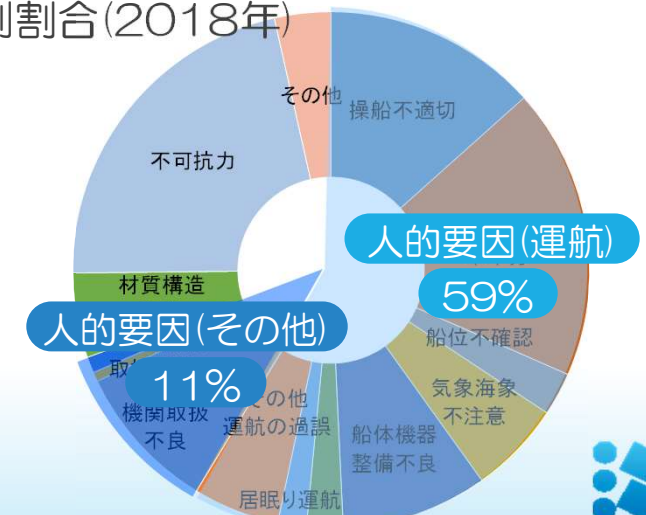
背景

- * 船員の減少と高齢化
 - * 船員の確保育成
 - * 船員雇用対策
 - * 船員の労働環境整備の推進と乗組み体制の見直し
 - * 自動化システムや遠隔操船技術の導入
 - * 船員への負担軽減
 - * 操船タスクの省力化
- * 運航の安全性の向上への要望
 - * 人的要因による事故の発生を抑制

内航船員の年齢構成(2017年)



交通政策審議会海事分科会資料より-国土交通省-
事故原因別割合(2018年)



平成30年海難の現況と対策-海上保安庁-



背景

- * 船員の減少と高齢化
 - * 船員の確保育成
 - * 船員雇用対策
 - * 船員の労働環境整備の推進と乗組み体制の見直
 - * 自動化システムや遠隔操船技術の導入
 - * 船員への負担軽減
 - * 操船タスクの省力化
- * 運航の安全性の向上への要望
 - * 人的要因による事故の発生を抑制

自動運航船の開発

自動化システム

- ・ 自動避航システム
- ・ 自動着棧システム
- ・ 遠隔監視操船システム

⋮



安全性確保のための
自動化システムの認証

自動避航システムの評価



自動避航システムの評価

* 自動避航システムの機能確認

- * 机上での書類審査

* シミュレーションによる機能確認

- * 想定される環境での網羅的なシステムの機能要求仕様の動作確認

* 操船シミュレータによる機能確認

- * 人間が関わる部分のシステムの機能要求仕様の動作確認

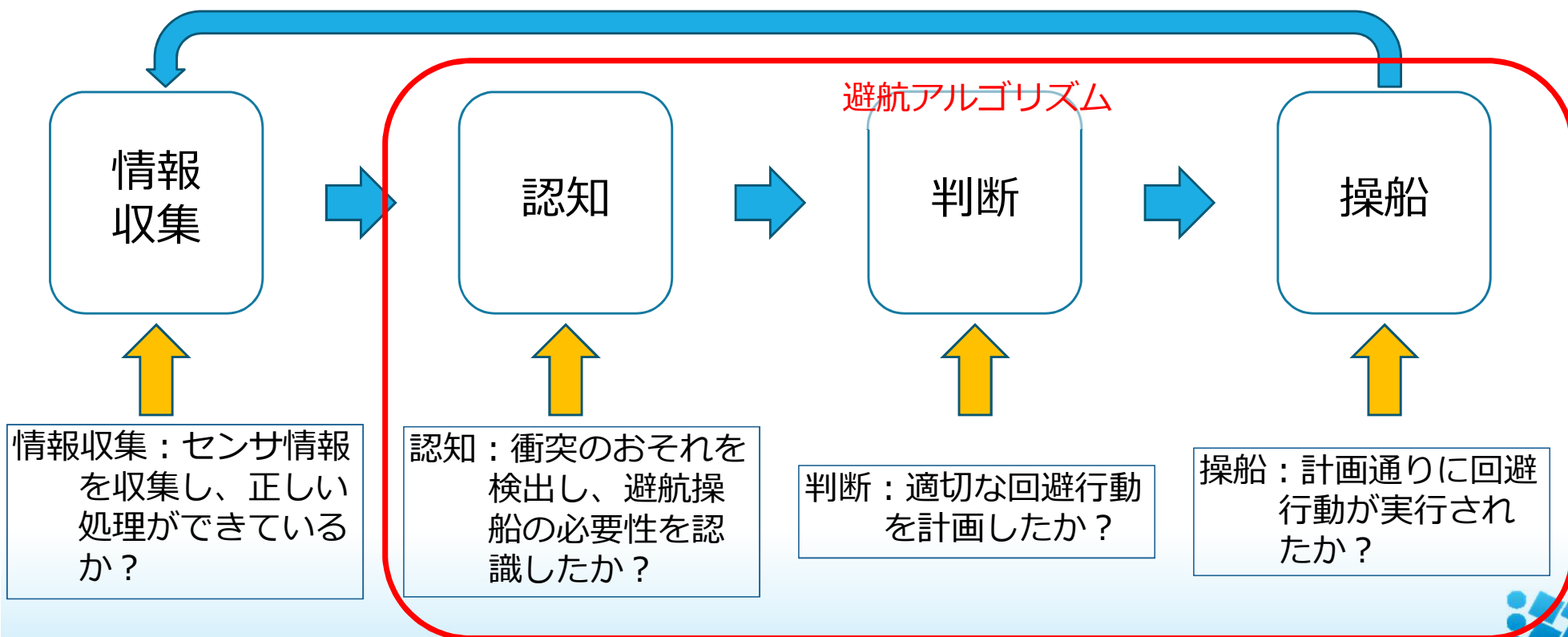
- * システムの使用経験に基づく人間による主観的評価

* 実船による機能確認



シミュレーションによる機能確認_自動避航システムで要求される機能

* 避航操船のプロセス



シミュレーションによる機能確認

* シナリオの作成

- * 基本機能を確認するシナリオ
 - * 基本的なパターンを網羅的に確認
- * 考慮の必要な複雑な状況のシナリオ
 - * 今津問題等、遭遇が予想される困難な状況の確認
- * 航行海域に即したシナリオ

* 評価指標

- * 操船時の指標（方位角変化、離隔距離、TCPA、DCPA）
- * 状況認識
 - * 衝突危険度（CJ、SJ、OZT）
- * 行動計画
 - * 操船困難度（避航操船閉塞度、OZTの方位閉塞度）
- * 操船実施
 - * 操船結果（海上衝突予防法/COLREGsの遵守度、行動計画との偏差）



人の操船と同等であること

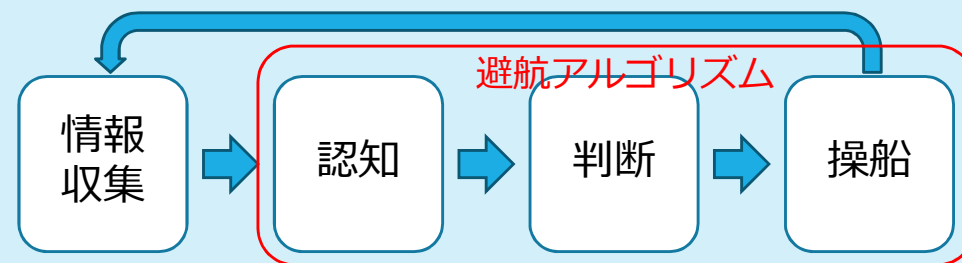
避航アルゴリズムの評価



避航アルゴリズムの評価

- * 国際海上衝突予防規則 COLREGs : The Convention on the International Regulations for Preventing Collision at Sea
 - * 国際海上衝突予防規則は、衝突回避のための行動、2船間の見合い関係およびその際の航行優先権を定義しており、船舶はこれに基づき運航することを求められる。
- * 衝突回避に用いられる主な規則
 - * 規則 8 衝突回避行動
 - * 規則13 追い越し
 - * 規則14 行会い
 - * 規則15 横切り
 - * 規則16 避航義務船の行動
 - * 規則17 保持船の行動

避航操船のプロセス



避航アルゴリズムの評価

* 避航操船の評価

- ① 避航回避時のセーフティスコア(SS)* 計算
- ② 見合い関係に応じた規則に基づくペナルティスコア(PS)* 計算
- ③ SSとPSから遭遇のスコアを計算

* SSは(1:安全, 0:危険)、PSは(0:安全, 1:危険)を表し、各見合い関係に応じた計算式で求める



参照 : P.K.E.Minne : Automatic testing of maritime collision avoidance algorithms



避航アルゴリズムの評価

*セーフティースコアの計算式

$$S_{safety}(r_{cpa}) = \begin{cases} 1, & R_{min} \leq r_{cpa} \\ 1 - \gamma_{nm} \left(\frac{R_{min} - r_{cpa}}{R_{min} - R_{nm}} \right), & R_{nm} \leq r_{cpa} < R_{min} \\ 1 - \gamma_{nm} - \gamma_{col} \left(\frac{R_{nm} - r_{cpa}}{R_{nm} - R_{col}} \right), & R_{col} \leq r_{cpa} < R_{nm} \\ 0, & r_{cpa} < R_{col} \end{cases}$$

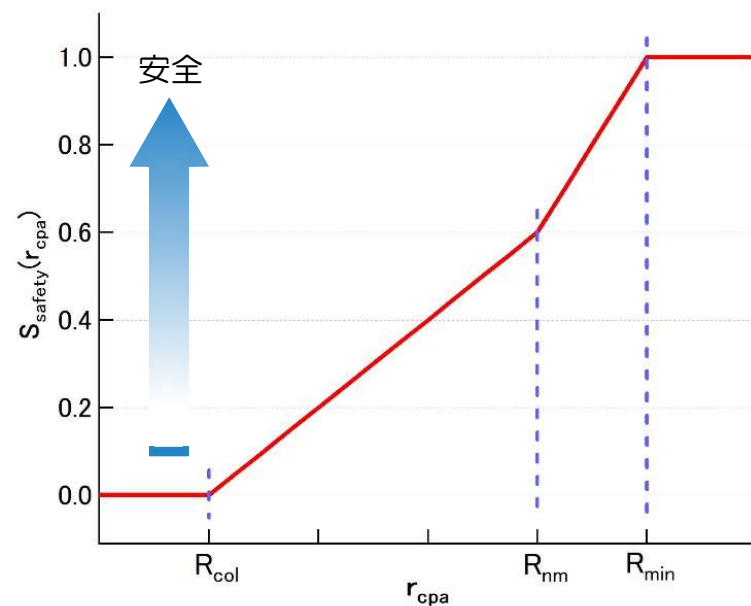
r_{cpa} CPA時の2船間距離

R_{min} CPA時の許容最小2船間距離

R_{nm} ニアミスと判定される2船間距離

R_{col} 衝突が発生する可能性がある2船間距離

$\gamma_{nm}, \gamma_{col}$ 各距離範囲の重要度を示すパラメータ

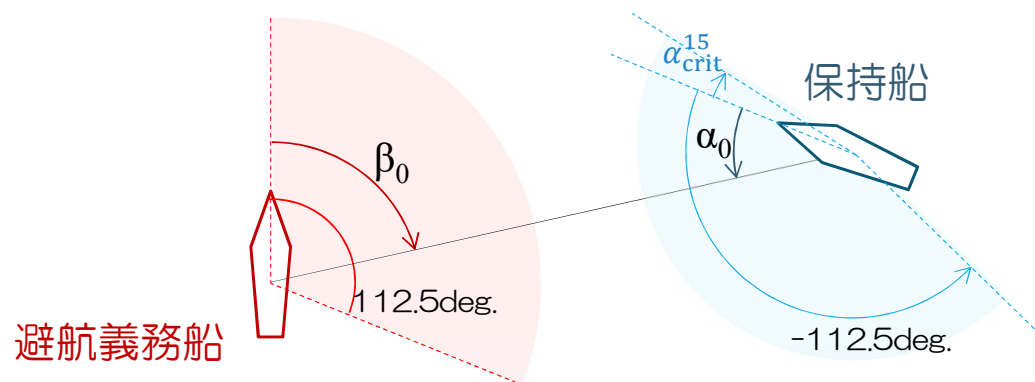


避航アルゴリズムの評価

* 見合い関係に応じたスコア計算（横切りの例）

* 見合い関係の決定

自船が避航義務船となる横切り 対応する規則…15,16
自船が保持船となる横切り 対応する規則…15,17



α_0, β_0 相対方位

α_{crit}^{15} 横切りと判断する保持船からの相対方位

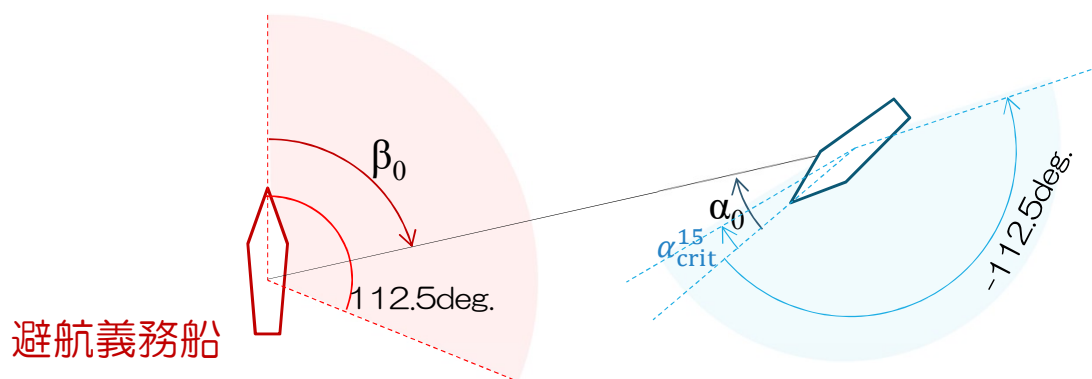
参照：P.K.E.Minne：Automatic testing of maritime collision avoidance algorithms

避航アルゴリズムの評価

* 見合い関係に応じたスコア計算（横切りの例）

* 見合い関係の決定

自船が避航義務船となる横切り 対応する規則…15,16
自船が保持船となる横切り 対応する規則…15,17



α_0, β_0 相対方位

α_{crit}^{15} 横切りと判断する保持船からの相対方位

参照：P.K.E.Minne：Automatic testing of maritime collision avoidance algorithms

避航アルゴリズムの評価

*見合い関係に応じたスコア計算（横切りの例）

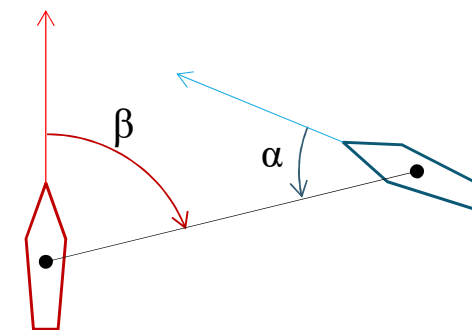
*規則15 横切り

$$S^{15} \triangleq \begin{cases} S^{16} - \gamma_{ahead}^{15} \mathcal{P}_{ahead}^{15} & , \text{避航義務船} \\ S^{17} & , \text{保持船} \end{cases}$$

\mathcal{P}_{ahead}^{15} : 前方通過に対するPS

$$\mathcal{P}_{ahead}^{15} \triangleq \begin{cases} 1, & \text{if } \alpha_{cpa} > -25deg \cap \alpha_{cpa} < 90deg \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

γ_{ahead}^{15} : ペナルティスコアの重要度を示すパラメータ



避航アルゴリズムの評価

* 見合い関係に応じたスコア計算（横切りの例）

* 規則16 避航義務船

$$S^{16} \triangleq S_{safety} (1 - P_{delay}) * (1 - P_{\Delta})$$

$$P_{\Delta} \triangleq P_{\Delta U_{app}} P_{\Delta \chi_{app}}$$

$P_{\Delta U_{app}}$: 明確でない速度変化に対するペナルティスコア

$P_{\Delta \chi_{app}}$: 明確でない変針に対するペナルティスコア

P_{delay} : 操作の遅れに対するペナルティスコア

避航アルゴリズムの評価

* 見合い関係に応じたスコア計算（横切りの例）

* 規則17 保持船

$$S^{17} \triangleq 1 - \gamma_{safety}^{17} (1 - S_{safety}) - \mathcal{P}_{\Delta}^{17} (\mathcal{P}_{\Delta V}^{17} + \mathcal{P}_{\Delta t}^{17}) - \gamma_{Pturn}^{17} \mathcal{P}_{Pturn}^{17}$$

$\mathcal{P}_{\Delta\chi}^{17}$: 保持船の変針に対するペナルティスコア

$\mathcal{P}_{\Delta U}^{17}$: 保持船の速度変化に対するペナルティスコア

$\mathcal{P}_{\Delta}^{17}$: 保持船の操船タイミングに対するペナルティスコア

\mathcal{P}_{Pturn}^{17} : 保持船の左転に対するペナルティスコア

$\gamma_{safety}^{17}, \gamma_{Pturn}^{17}$: ペナルティスコアの重要度を示すパラメータ



参照 : P.K.E.Minne : Automatic testing of maritime collision avoidance algorithms

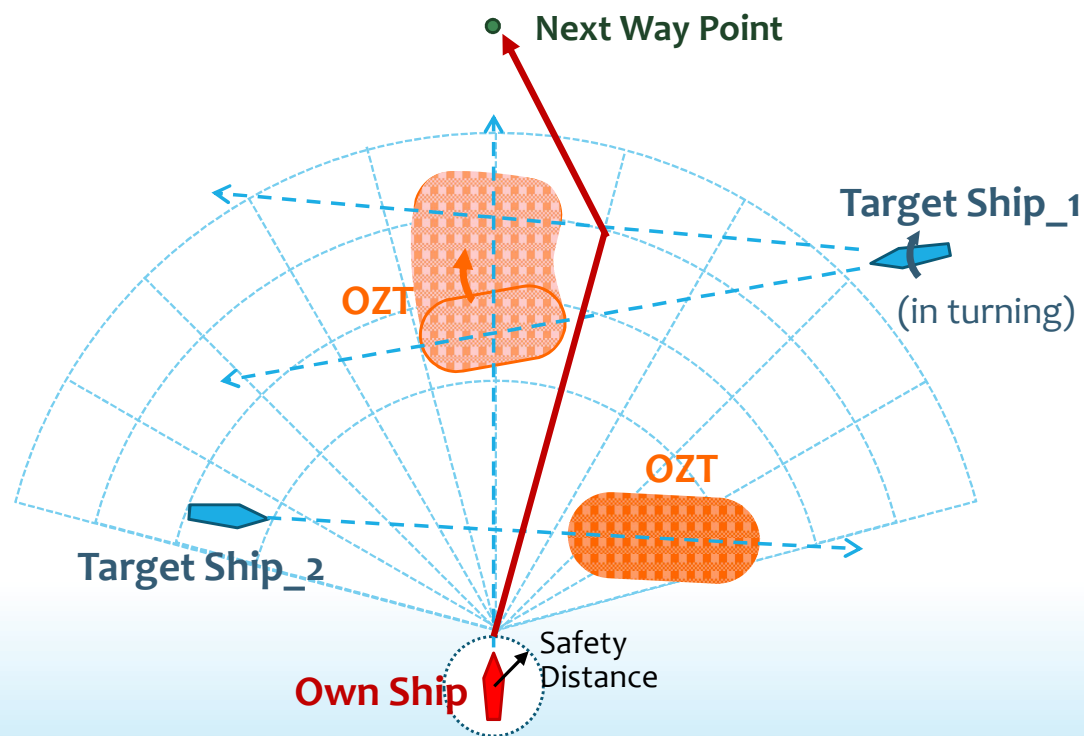


シミュレーションによる評価例



避航アルゴリズム

- *OZT (Obstacle Zone by Target: 相手船による航行妨害ゾーン)を避けるように避航経路を決定。

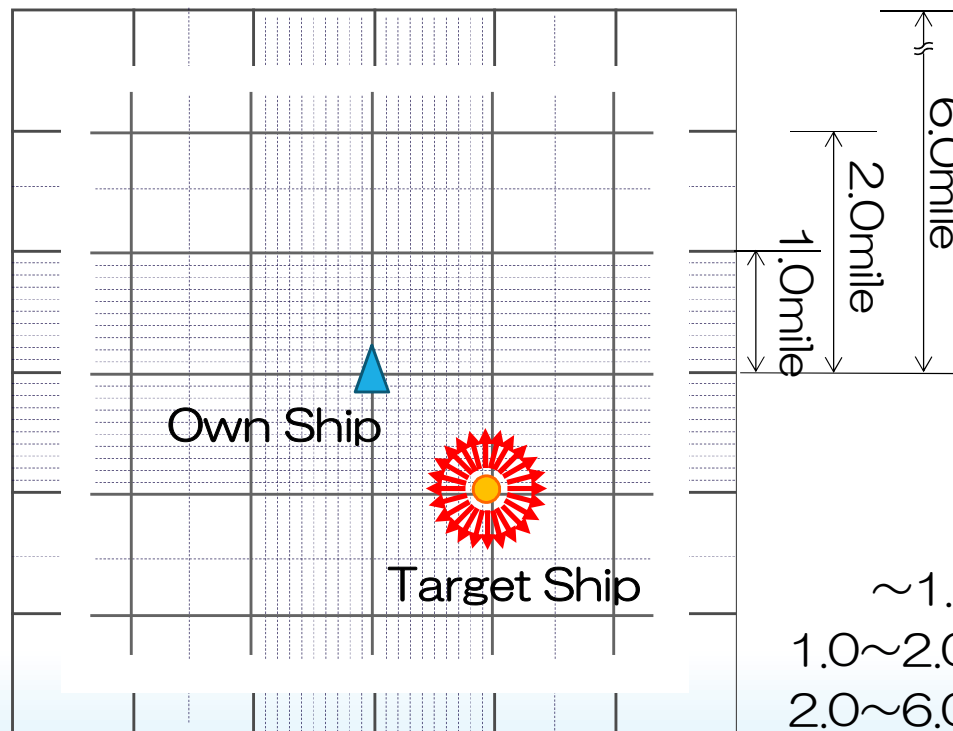


シミュレーションシナリオ

*1対1の基本機能を評価

Own Ship
Speed 12 kt
Course 0 deg

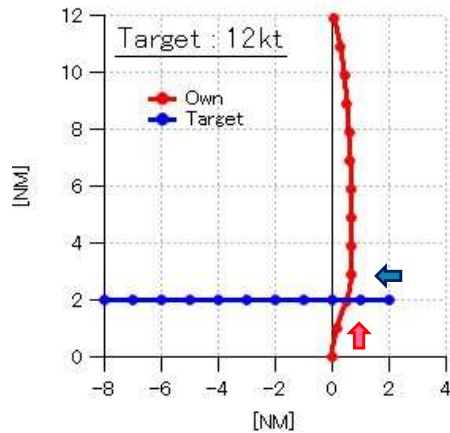
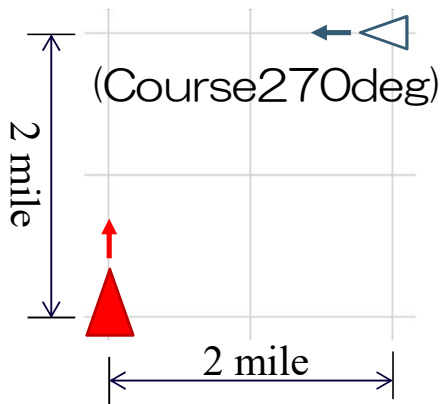
Target Ship
Speed 12kt, 9kt, 15kt
Course 全方位
(15deg.刻み)



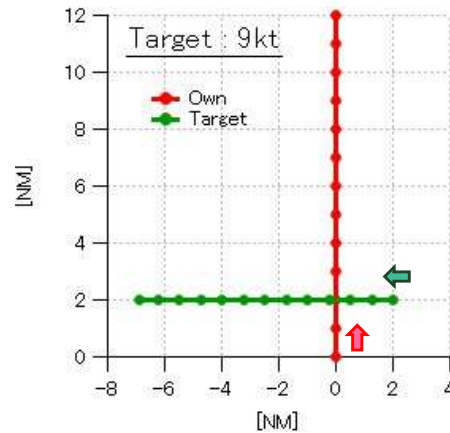
~1.0mile 0.1mile 刻み
1.0~2.0mile 0.5mile 刻み
2.0~6.0mile 1.0mile 刻み

Case 12kt:7,300件, 9kt:3819件, 15kt:4,297件

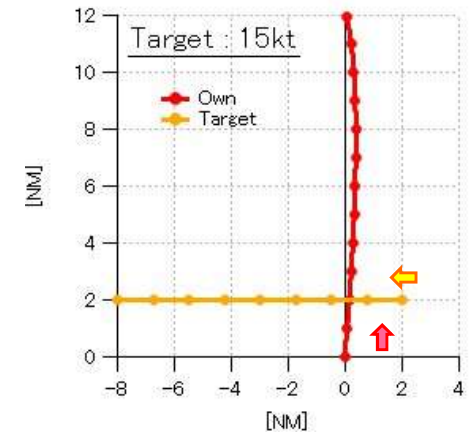
シミュレーション結果



CPA時の2船間距離 618m



CPA時の2船間距離 741m
(他船の船首を通過)

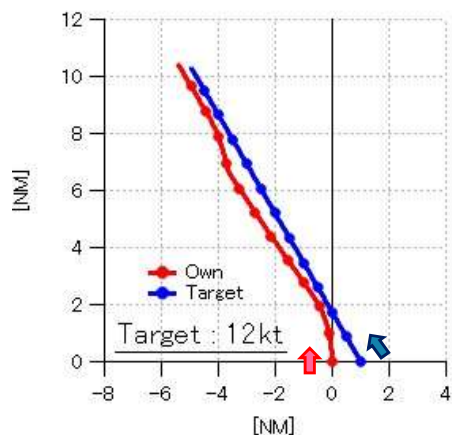
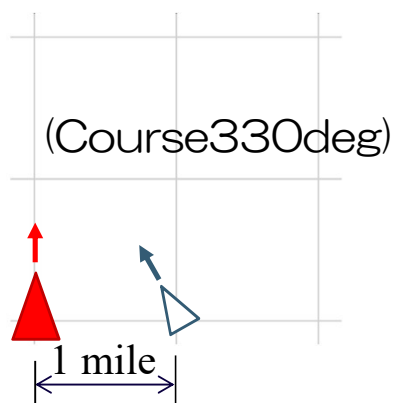


CPA時の2船間距離 730m

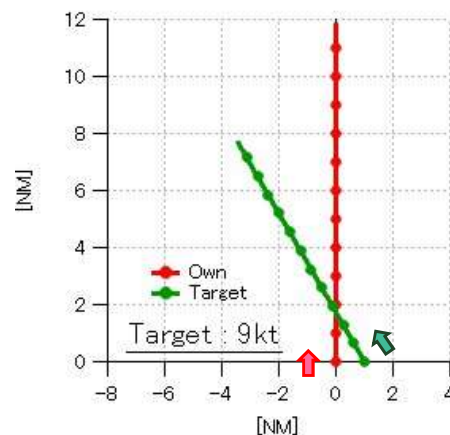
	Score	S ¹⁵	S ¹⁶	S _{safety}	P _{delay}	P _Δ	P ¹⁵ _{ahead}
12kt	0.28	0.28	0.28	0.42	0.13	0.24	0.00
9kt	0.00	0.00	0.00	0.54	1.00	1.00	1.00
15kt	0.07	0.07	0.07	0.53	0.26	0.83	0.00



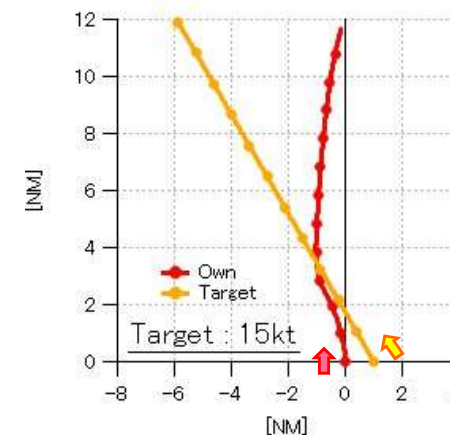
シミュレーション結果



他船をかわすことが
できなかった



CPA時の2船間距離 1265m CPA時の2船間距離 577m
(他船の船首を通過)

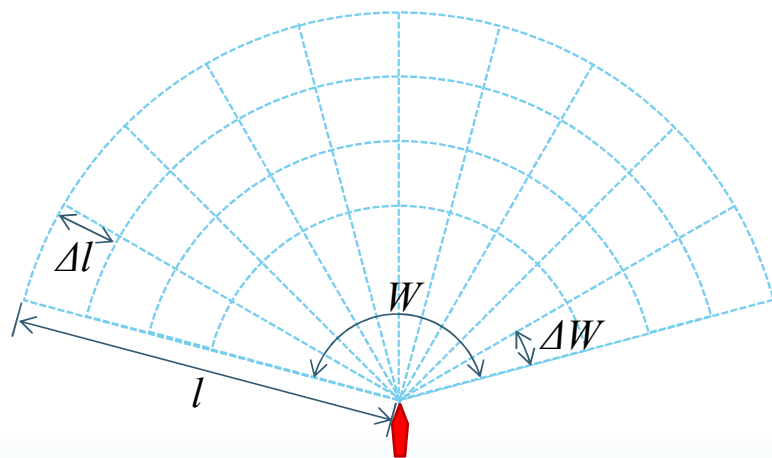


	Score	S^{15}	S^{16}	S_{safety}	P_{delay}	P_{Δ}	P_{ahead}^{15}
12kt	0.59	0.59	0.59	0.75	0.21	0.00	0.00
9kt	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00
15kt	0.23	0.23	0.23	0.38	0.20	0.23	0.00



シミュレーション結果

* 避航経路ネットワークの変更

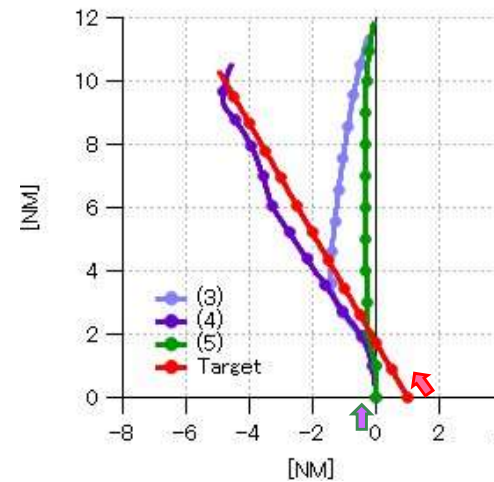
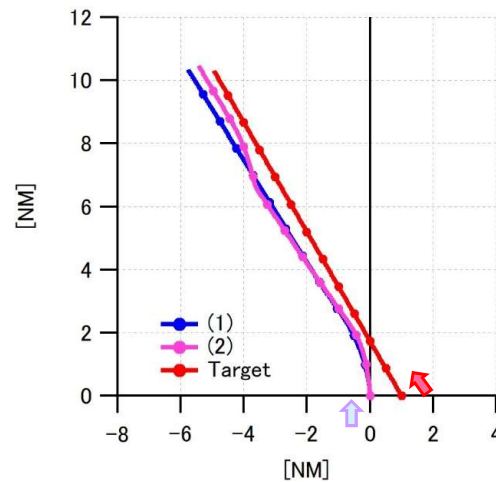
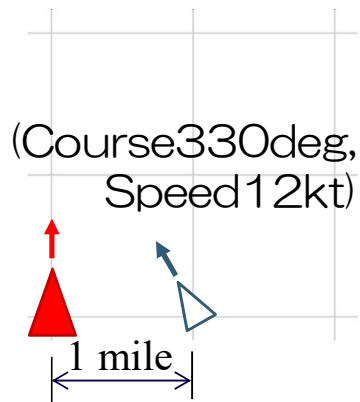


避航経路ネットワーク

進行方向 (l)	刻み (Δl)	幅方向 (W)	刻み (ΔW)
7500m	500m	100deg	10deg
7500m	500m	100deg	20deg
7500m	500m	60deg	10deg
7500m	250m	100deg	10deg
7500m	250m	100deg	20deg
7500m	250m	60deg	10deg

シミュレーション結果

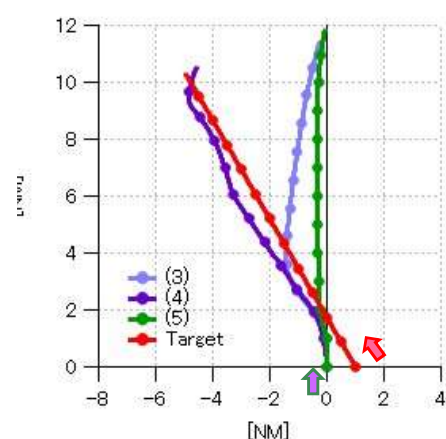
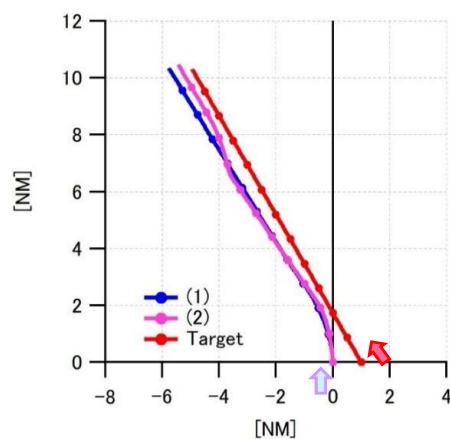
* 避航経路ネットワークの変更



	Δl	W	ΔW		Δl	W	ΔW
(1)	500m	100deg	20deg	(3)	250m	100deg	10deg
(2)		60deg	10deg	(4)		100deg	20deg
Original	500m	100deg	10deg	(5)		60deg	10deg

シミュレーション結果

* 避航経路ネットワークの変更



	Δl	W	ΔW
(1)	500m	100deg	20deg
(2)		60deg	10deg
(3)	250m	100deg	10deg
(4)		100deg	20deg
(5)		60deg	10deg

	Score	S^{15}	S^{16}	S_{safety}	$\mathcal{P}_{\text{delay}}$	\mathcal{P}_{Δ}	$\mathcal{P}_{\text{ahead}}^{15}$
(1)	0.79	0.79	0.79	1.00	0.20	0.01	0.00
(2)	0.59	0.59	0.59	0.75	0.21	0.00	0.00
(3)	0.00	0.00	0.11	0.22	0.53	0.00	1.00
(4)	0.00	0.00	0.12	0.14	0.11	0.00	1.00
(5)	0.00	0.00	0.08	0.36	0.59	0.44	1.00



まとめ

- * 自動化システムの認証時、見合い関係に関する網羅的なシミュレーションを実施するため、自動的に試行結果を判断するシステムの構築が必要である。
- * COLREGsで規定される避航操船との比較により操船結果を唯一のスコアで示すことができる。
- * パラメータの決定方法、計画航路からの偏差を評価する機能の追加等の検討が必要。
- * 本評価法以外にいくつかの評価法が提案されている。それぞれの評価法のメリットやデメリットを考慮し、検証の対象により使用する評価法を変えることも有効である。



本発表内容の一部は、交通運輸技術開発推進制度JPJ002223の支援、およびJSPS科研費JP19K15228, JP19H02371, JP20K14968の助成を受けたものです。

