

令和2年(第20回)海上技術安全研究所講演会

自動運航船の実現に向けた避航操船技術の研究開発

知識・データシステム系 間島 隆博



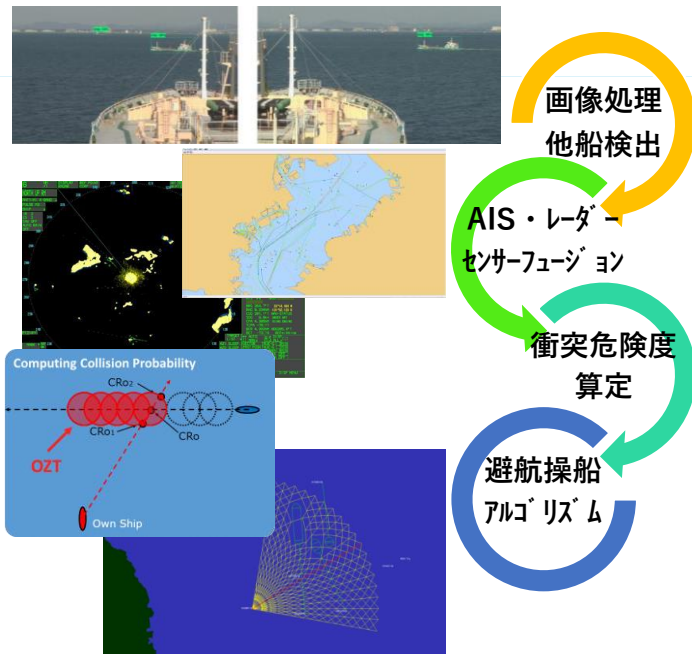
発表内容

- * 自動運航船の開発に係るテーマ
- * 自動運航船の重点研究
 - ・ 立体視による他船検出
 - ・ 自動着棧 & 陸上支援
- * 自動運航システムの研究
 - ・ 避航操船アルゴリズム
 - ・ シミュレーションシステム
- * まとめ

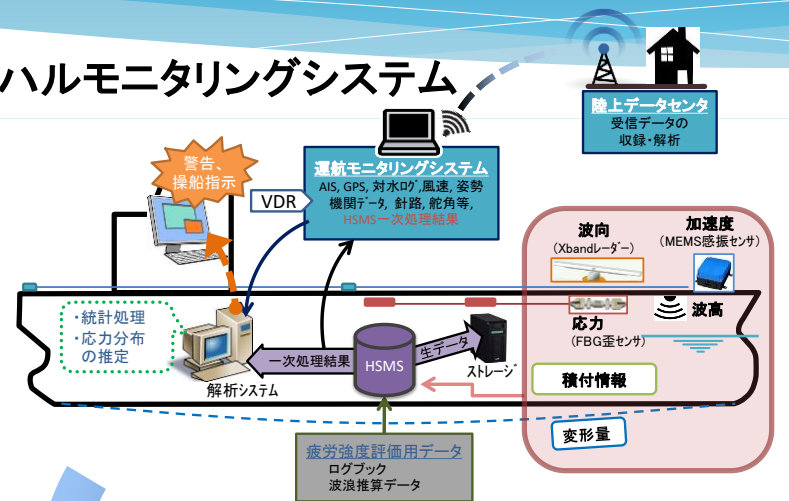
自律船関連技術の確立

自律船に係る、避航操船システム、ハルモニタリングシステム、自動離着岸システムに関する研究開発を進め、自律船の実現へ至る技術基盤を確立する。

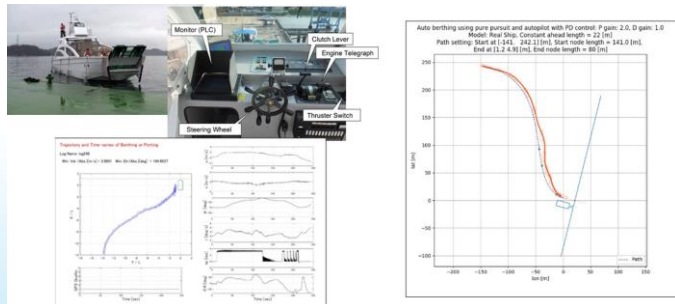
避航操船システム(輻輳海域対応)



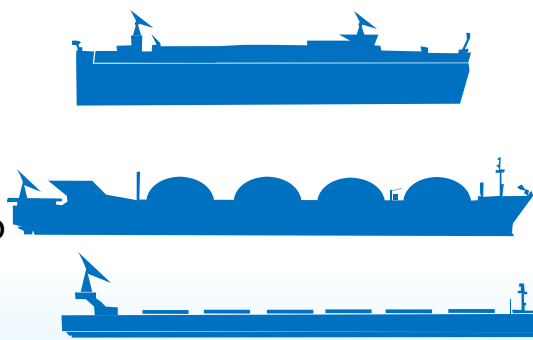
ハルモニタリングシステム



自動離着岸操船システムの研究



自律船実現に係る
基盤技術の確立



自動運航船に係る重点研究

令和2年度 研究内容

① 立体視による他船検出システムの研究

検出機能の向上と避航アルゴリズムとの連携。

② 自動運航船の陸上支援の研究

陸上からの支援機能に係る小型実験船への実装。

(自動運航船における陸上からの情報提供・収集・管制について調査。)

③ 自動離着棧操船システムの研究

離着棧操船システムについて支援から自動化へ向け、完成度を向上。

④ 自律運航システムの研究

自動避航操船システム、および、

避航操船機能の評価、開発支援のためのシミュレーションシステムを開発。

① 立体視による他船検出システムの研究

検出機能の向上と避航アルゴリズムとの連携。

② 自動運航船の陸上支援の研究

陸上からの支援機能に係る小型実験船への実装。

(自動運航船における陸上からの情報提供・収集・管制について調査。)

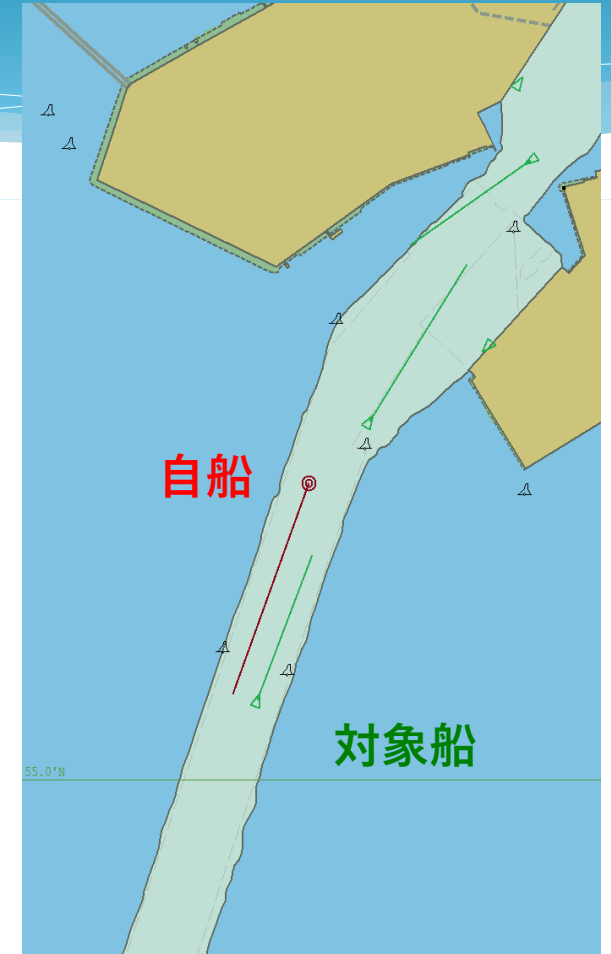
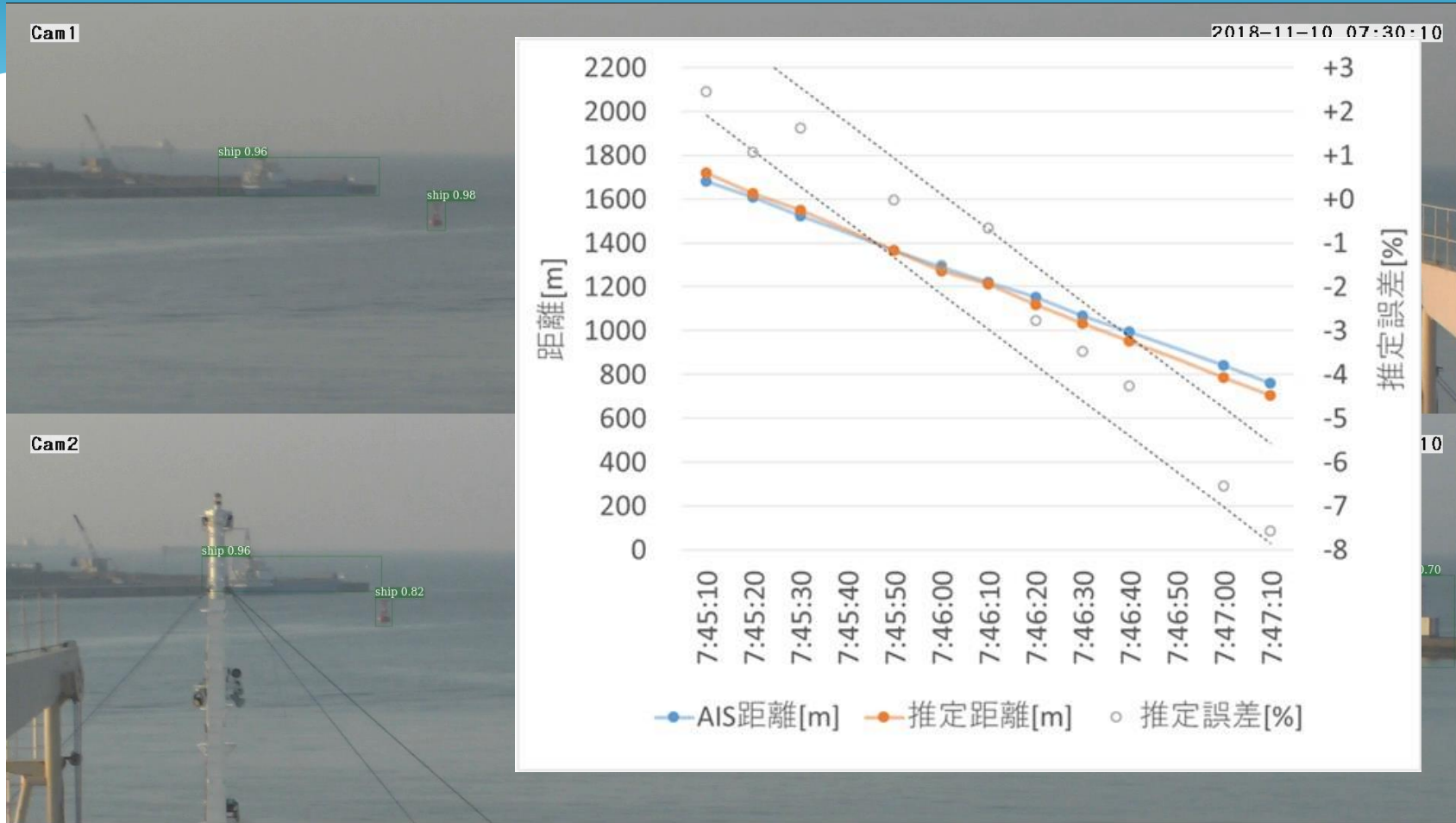
③ 自動離着棧操船システムの研究

離着棧操船システムについて支援から自動化へ向け、完成度を向上。

④ 自律運航システムの研究

自動避航操船システム、および、
避航操船機能の評価、開発支援のためのシミュレーションシステムを開発。

① 立体視による他船検出システム、デモ



* 約1マイル先の船舶を
誤差数%の精度で測距

① 立体視による他船検出システムの研究

検出機能の向上と避航アルゴリズムとの連携。

② 自動運航船の陸上支援の研究

陸上からの支援機能に係る小型実験船への実装。

(自動運航船における陸上からの情報提供・収集・管制について調査。)

③ 自動離着棧操船システムの研究

離着棧操船システムについて支援から自動化へ向け、完成度を向上。

④ 自律運航システムの研究

自動避航操船システム、および、

避航操船機能の評価、開発支援のためのシミュレーションシステムを開発。

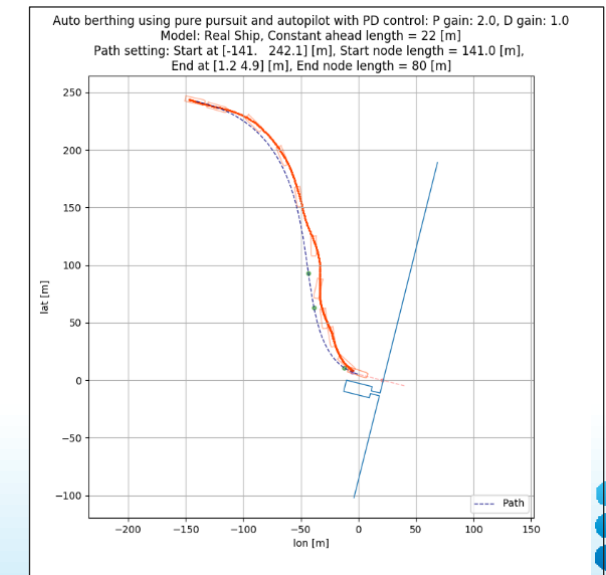
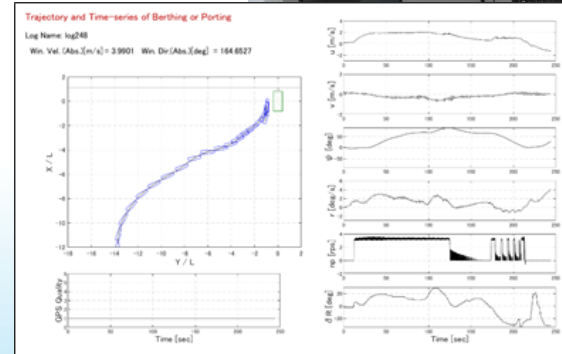
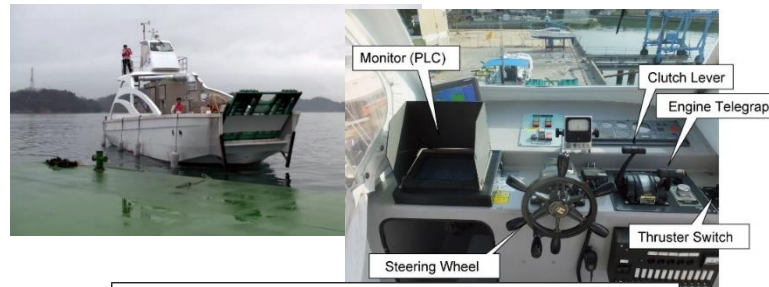
②陸上支援 & ③自動離着棧システム

- 航行する船舶において生成した右の画像を、4G回線等により陸上への転送を試行し、緯経度とともに転送速度を収集。

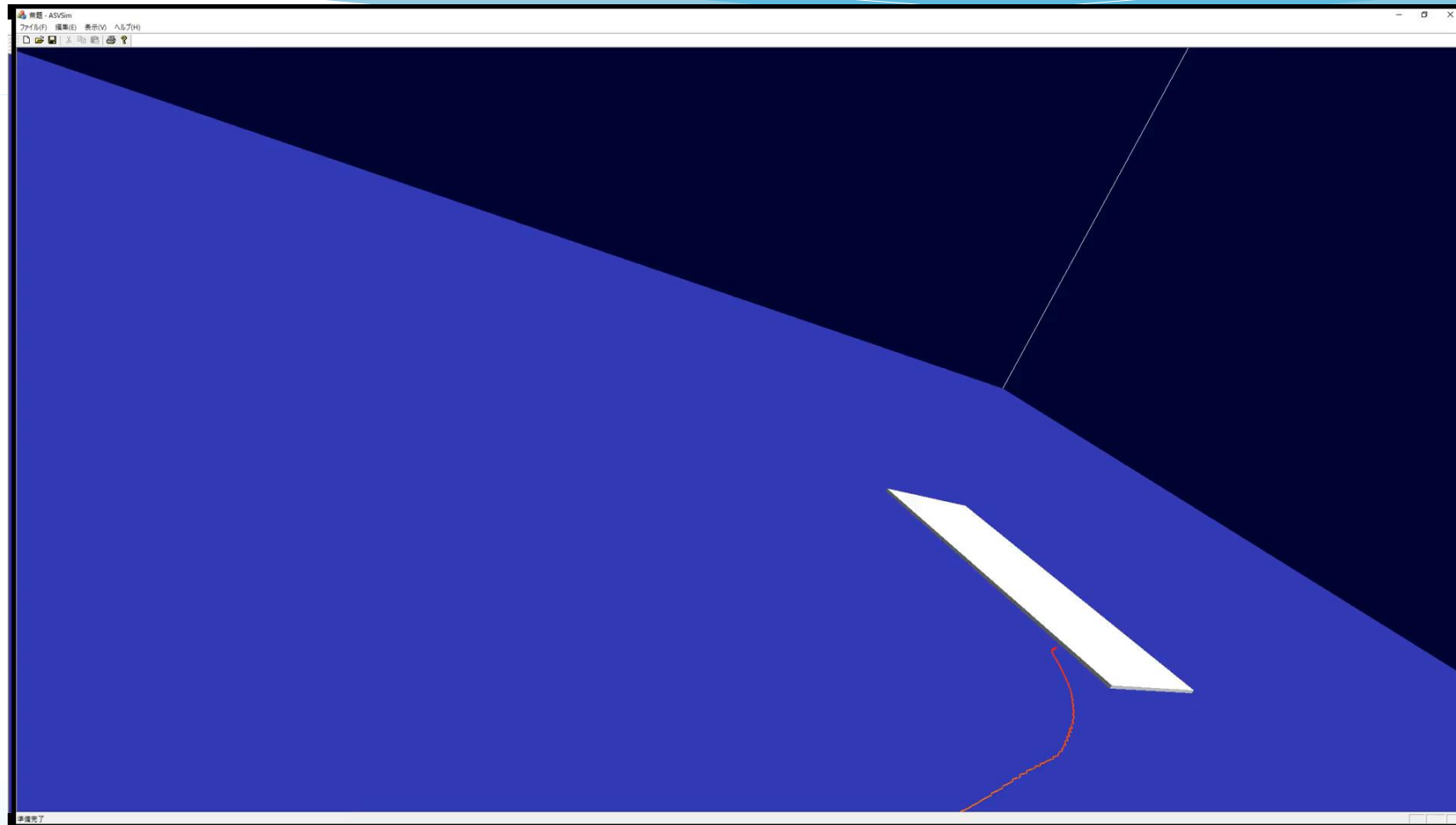


陸上モニタリング

- 風外乱の影響や、操船者の負荷が高い状況等、離着棧の支援及び自動化システムの開発を目指す。
- 小型実験船が低速で航行しているときの操縦運動モデルを構築。
- Pure PursuitとAutopilotを用いた自動着棧操船アルゴリズムを試作。
- 音声ガイダンスによる着棧操船支援システムを試作。
- 操船シミュレータ実験により、操船者の負荷の観点から、支援システムの評価を実施。



②陸上支援 & ③自動離着棧システム、小型船実験の再現デモ



① 立体視による他船検出システムの研究

検出機能の向上と避航アルゴリズムとの連携。

② 自動運航船の陸上支援の研究

陸上からの支援機能に係る小型実験船への実装。

(自動運航船における陸上からの情報提供・収集・管制について調査。)

③ 自動離着棧操船システムの研究

離着棧操船システムについて支援から自動化へ向け、完成度を向上。

④ 自律運航システムの研究

自動避航操船システム、および、

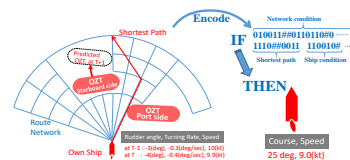
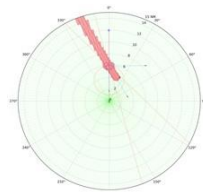
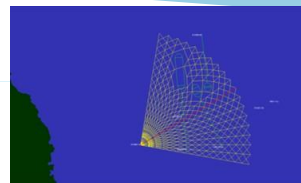
避航操船機能の評価、開発支援のためのシミュレーションシステムを開発。

④ 自動運航システムの研究

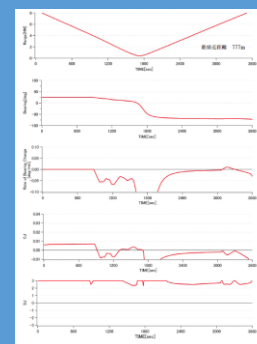
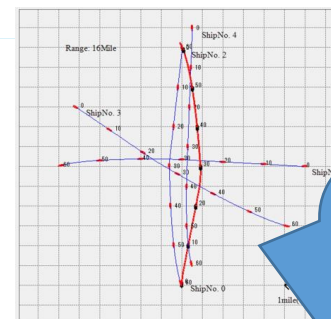
- シミュレーションシステムは避航アルゴリズムの評価が可能とすべく、入出力データの標準化を検討。
- 複数のテストケース(自船及び他船の位置、速度、進行方向などの初期状態及び航行中に起こるイベントの設定。組み合わせは多数)毎に走らせ、結果を出力。
- 衝突危険度の計算も組み込む。
- 実海域の交通流も模擬。

各種避航操船アルゴリズム

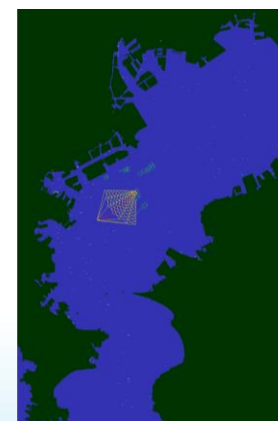
シミュレーションシステム



規格化



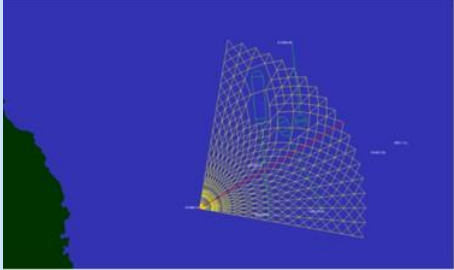
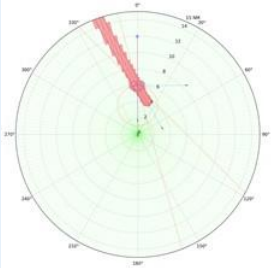
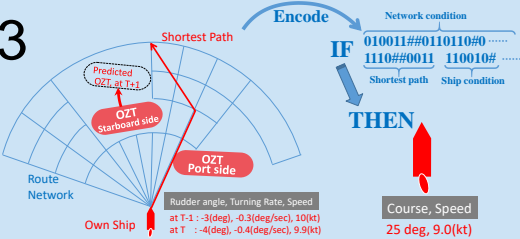
衝突危険度の指標



④ 自動運航システムの研究

- 避航操船アルゴリズム
- シミュレーションシステム

④ 自動運航システムの研究、避航操船アルゴリズム

アルゴリズム(輻輳海域対応)	特徴			
<p>Algorithm1</p> 	<p>知識ベース</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 操船結果の説明 : ○ ・ アルゴリズム開発速度 : 大 (開発者に依存) ・ 輻輳海域への適用 : △ 			
<p>Algorithm2</p> 	<p>深層強化学習</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 操船結果の説明 : X ・ アルゴリズム開発速度 : 中 (計算機に依存) ・ 輻輳海域への適用 : ? 			
<p>Algorithm3</p>  <table border="1" data-bbox="764 1178 1159 1222"> <tr> <td>Rudder angle, Turning Rate, Speed</td> </tr> <tr> <td>at T-1 : -3(deg), -0.3(deg/sec), 10(kt)</td> </tr> <tr> <td>at T : -4(deg), -0.4(deg/sec), 9.9(kt)</td> </tr> </table>	Rudder angle, Turning Rate, Speed	at T-1 : -3(deg), -0.3(deg/sec), 10(kt)	at T : -4(deg), -0.4(deg/sec), 9.9(kt)	<p>説明可能なAI</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 操船結果の説明 : ○ ・ アルゴリズム開発速度 : 小 (計算機に依存) ・ 輻輳海域への適用 : ?
Rudder angle, Turning Rate, Speed				
at T-1 : -3(deg), -0.3(deg/sec), 10(kt)				
at T : -4(deg), -0.4(deg/sec), 9.9(kt)				

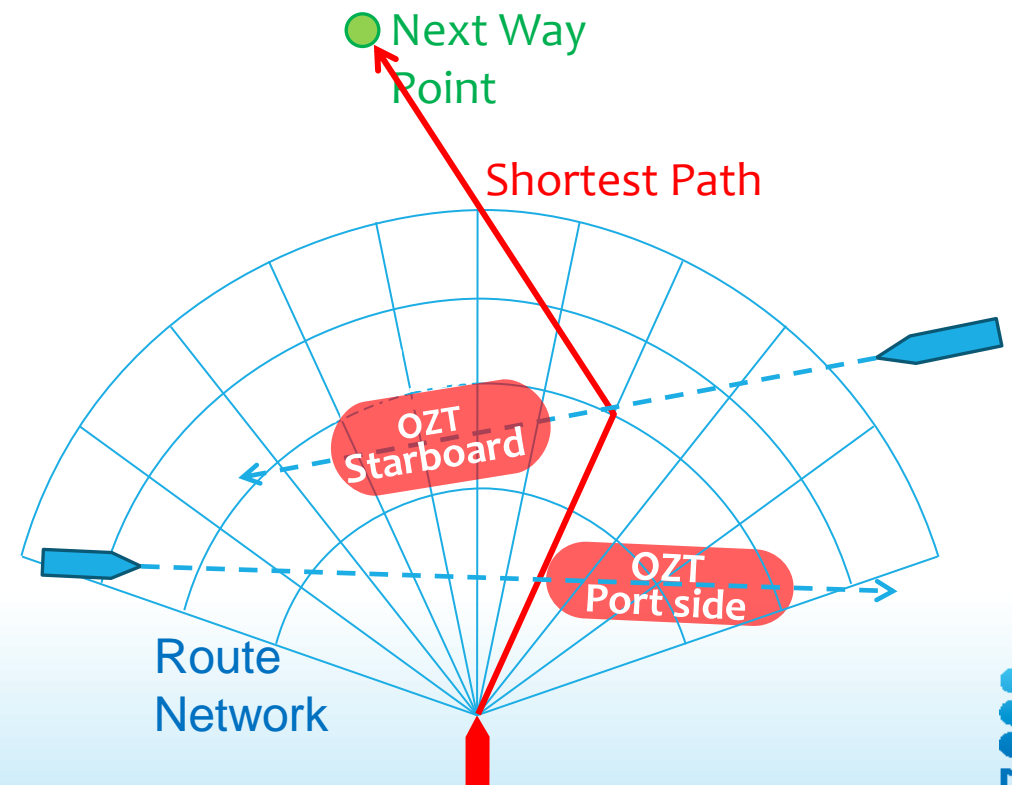
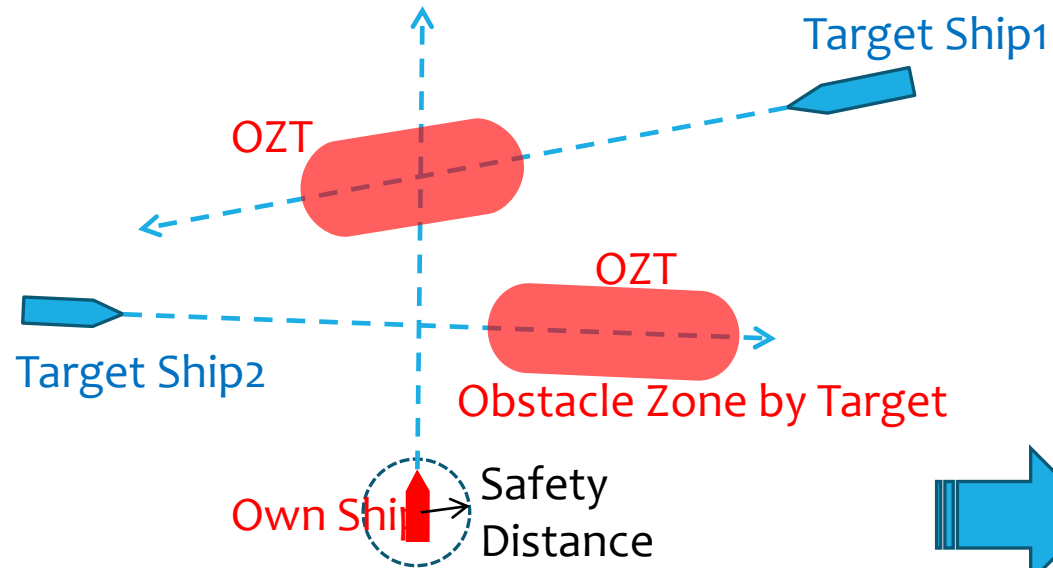
避航操船アルゴリズムI、知識ベース

衝突危険度：

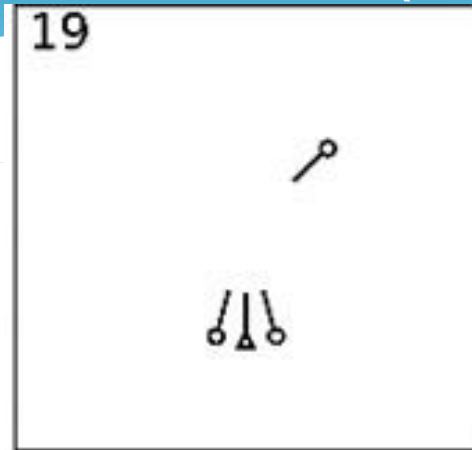
OZT (Obstacle Zone by Target)を活用

知識ベース：

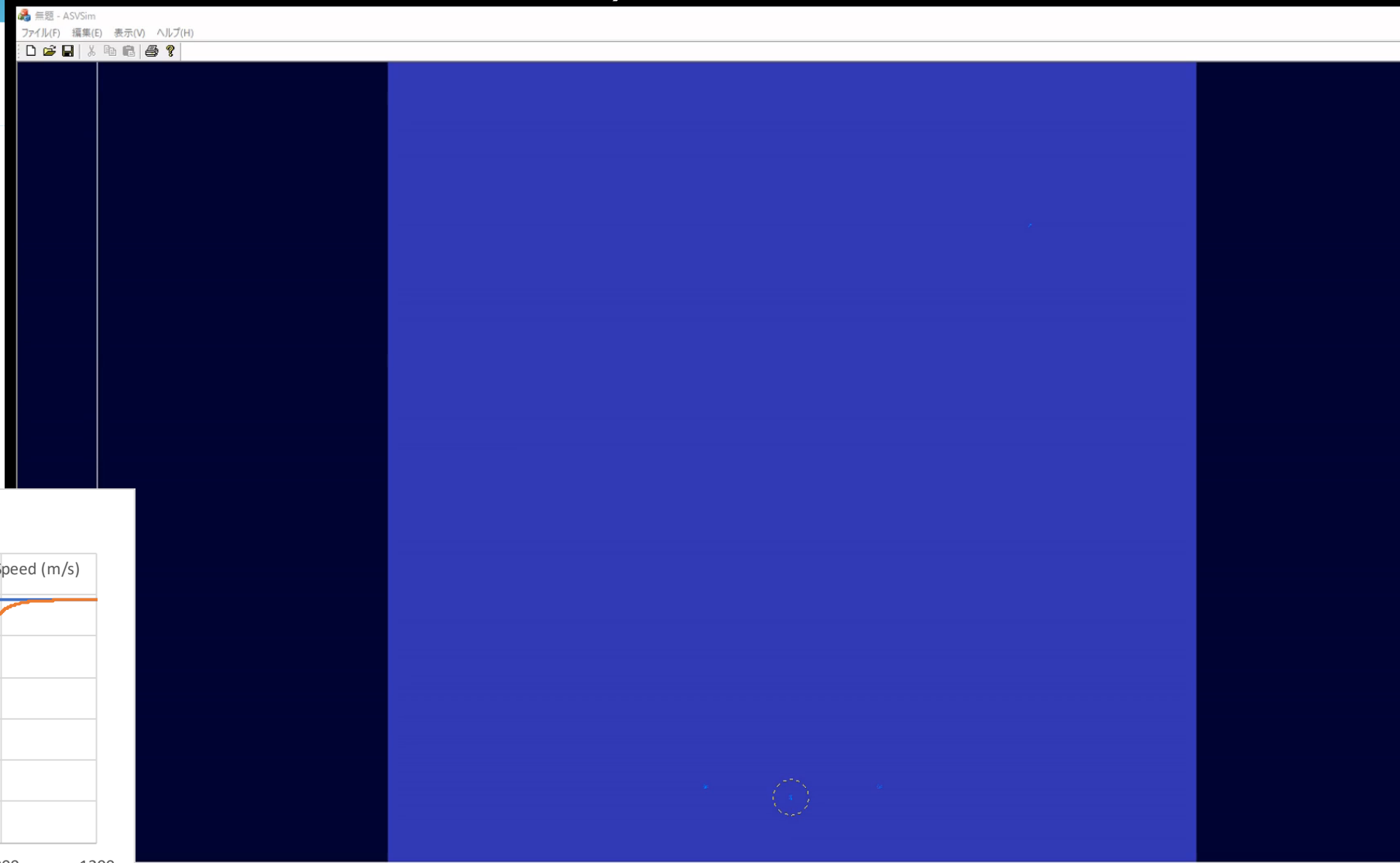
状況（環境、条件）に応じた、適切な操船方法（If Thenルール）をプログラマーが実装



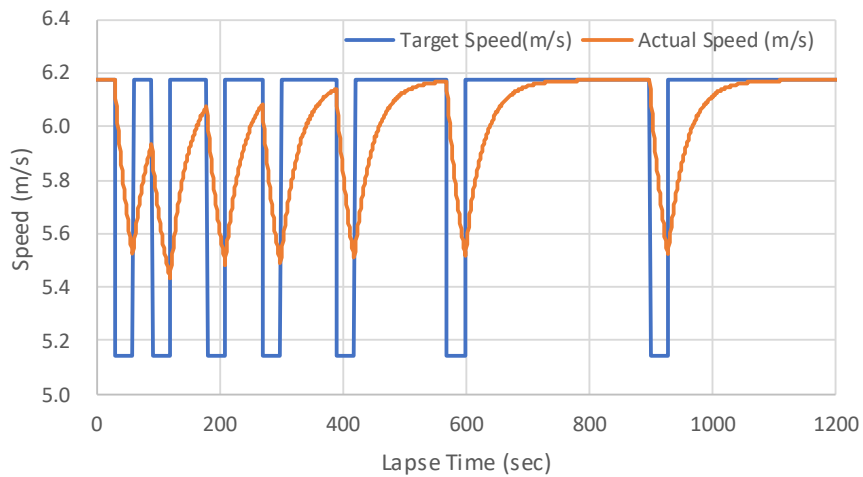
避航操船アルゴリズムI (知識ベース) 、デモ 今津問題(避航が必要な見合い関係をまとめた問題)No.19



- OZTで塞がれ、経路が見つからない
→ 減速
- 経路が見つかれば増速

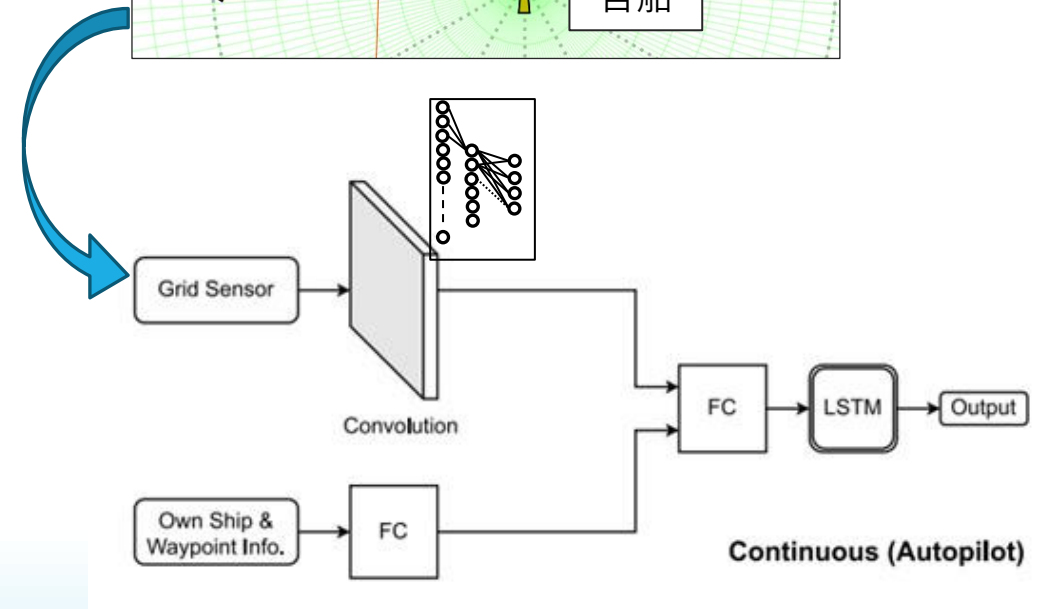
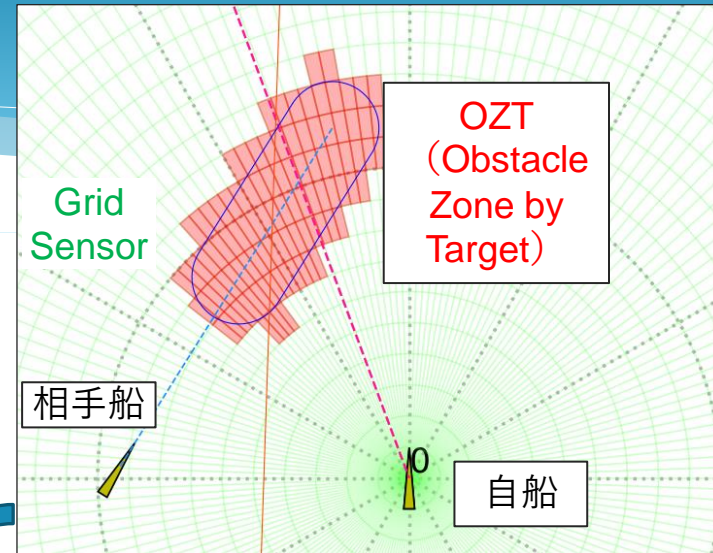
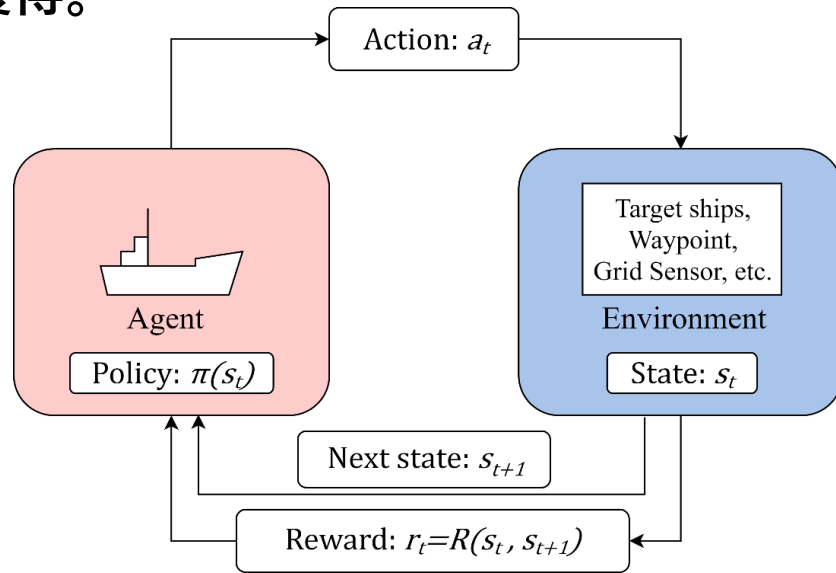


Imazu Problem, No.19



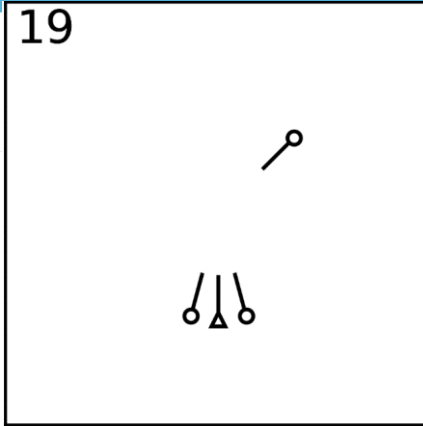
避航操船アルゴリズムII、深層強化学習 (Deep Reinforcement Learning)

状況（環境、条件）に応じた、
適切な操船方法を
AIが、
シミュレーションの中で経験を積み、
自動的に獲得。

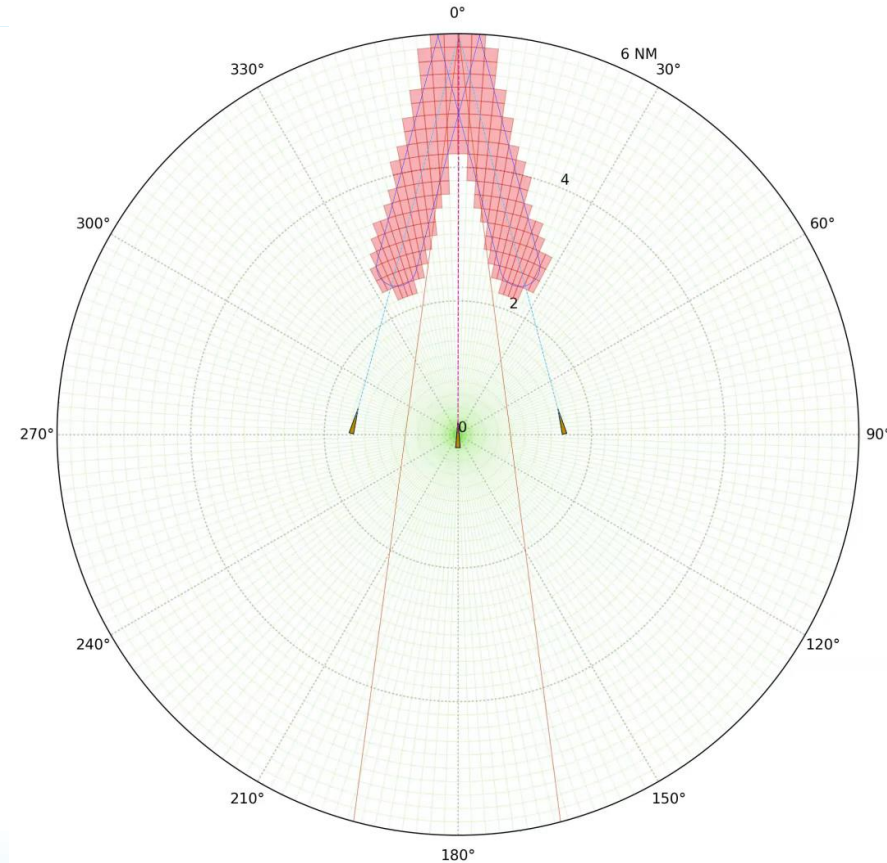


避航操船アルゴリズムII、深層強化学習（DRL）、デモ 今津問題19

19

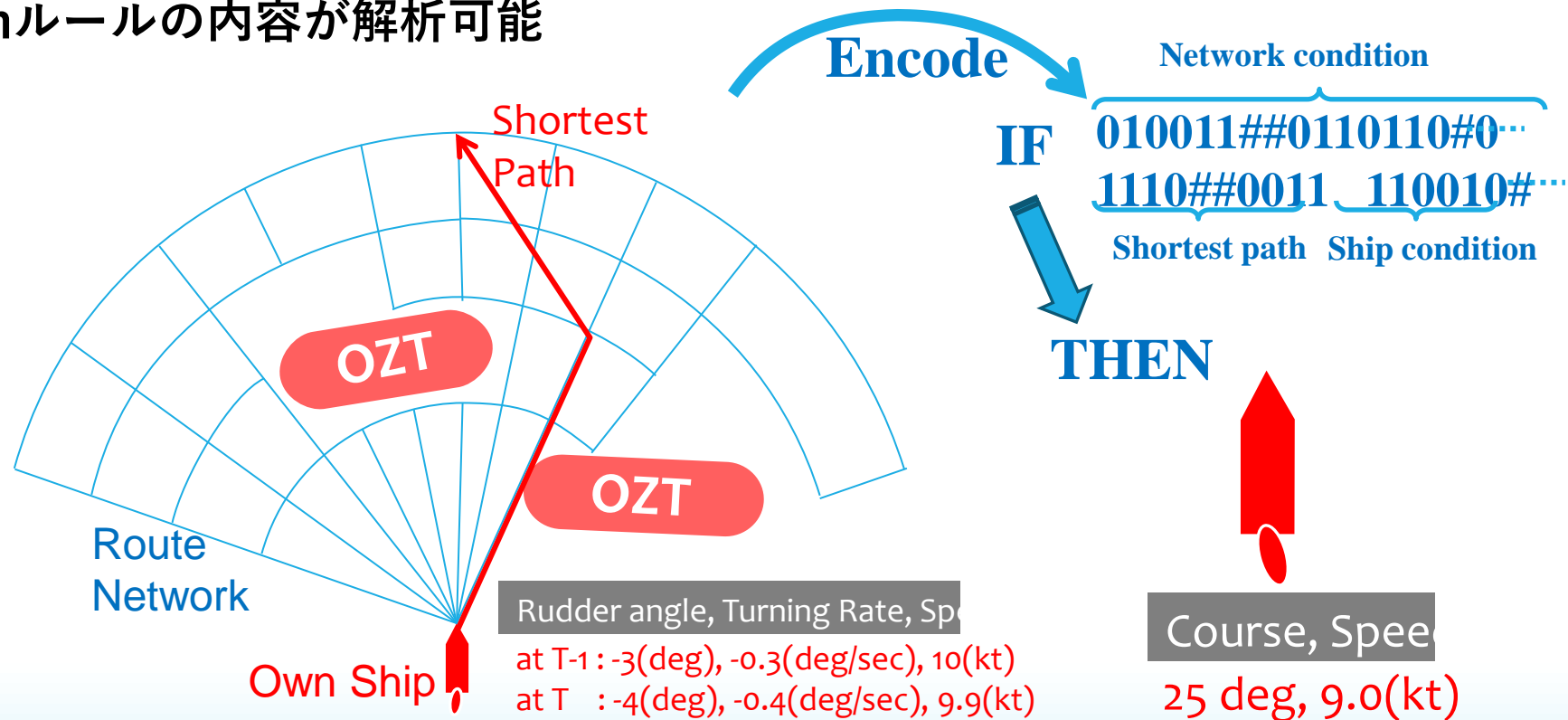


- 4船の見合いの場合で**極端に難易度の高い**見合い関係（今津問題の19番）
- 自船と距離が近い同航船が2隻あり、ウェイポイントまでの経路を2船のOZTが完全に塞いでいる状況
- 右舷手前の横切り船のOZTが自船から約2NMの距離に侵入した時点で避航を開始



避航操船アルゴリズムIII、説明可能なAI (XAI)

DRLでは獲得した操船方法（環境条件と操船との関係）の説明が困難
学習分類子法（Learning Classifier System, XAIの一種）は、
If Thenルールの内容が解析可能



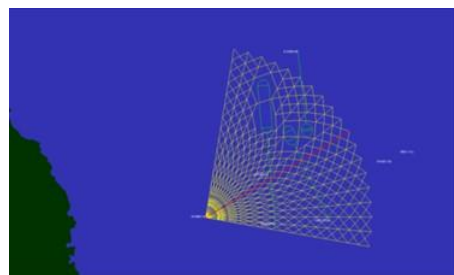
④ 自動運航システムの研究

- 避航操船アルゴリズム
- シミュレーションシステム

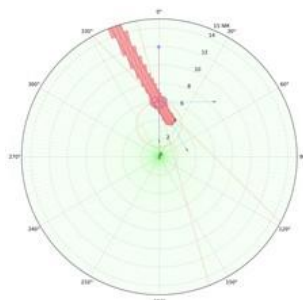
シミュレーションシステム

- ・アルゴリズムの試験環境
- ・アルゴリズム開発（初期段階）の効率化

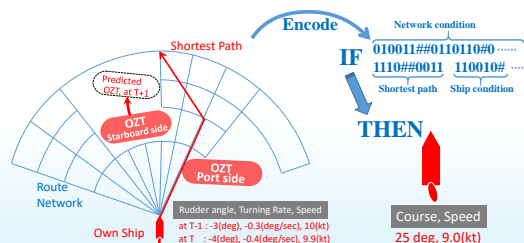
Algorithm1
知識ベース



Algorithm2
深層強化学習

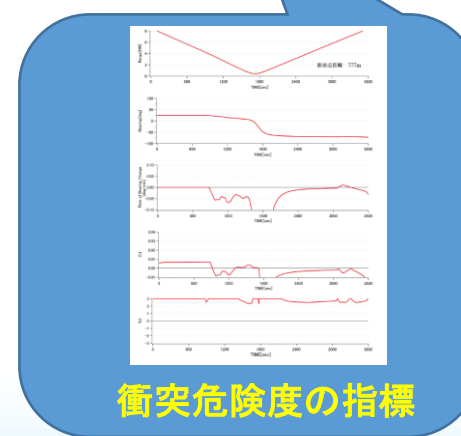
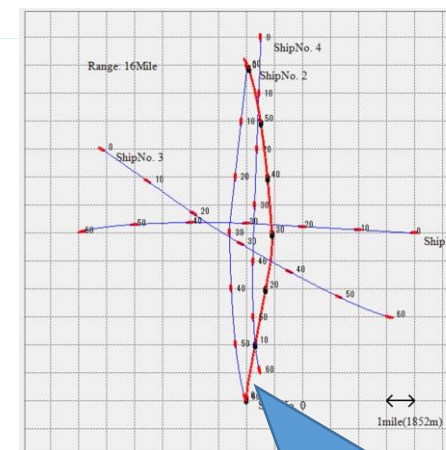


Algorithm3
学習分類子法



←アルゴリズム
を
シミュレーション→
に接続

規格化



避航操船アルゴリズム

シミュレーションシステム



操船アルゴリズムとシミュレーションシステム



次頁から6頁に亘り、接続のための詳細な情報

操船シミュレーションシステム、UDP通信内容の設定

Client(Algorithm) → Simulation

識別	ID	内容	データ内容
msg	0	通信設定	msg,0,ホストアドレス,ポート番号
msg	2	シミュレーションステップ時間間隔設定	msg,2,1ステップあたり時間間隔(秒)
msg	4	送信(Sim→Algorithm)ステップ間隔設定	msg,4,ステップ間隔
msg	6	検知距離(m)設定	msg,6,半径r(m)
msg	8	シナリオ番号	msg,8,msg0で返されたシナリオの番号
msg	10	自船パラメータ情報	msg,10,L(m),B(m),T(s),K(1/s),Te(s),SD(m),舵角上下限(度),船速下限(Kt),船速上限(Kt),PID_kP, PID_kI, PID_kD
msg	12	自船&半径 r(m)内他船情報の要請	msg,12,半径 r(m)
msg	14	自船計算結果WP更新要請	msg,14,WP数, {WP_id,緯度(度),経度(度),速度(kt),WP名} xWP数
msg	16	シミュレーション開始,再開の要請	msg,16
msg	18	シミュレーション停止の要請	msg,18

Simulation → Algorithm (Client)

識別	ID	内容	データ内容
msg	1	msg0への応答 通信設定確認情報&シナリオ送付	msg,1,ホストアドレス,ポート番号,シナリオファイル名
msg	13	msg4のステップ間隔, または msg12の緊急要請による応答	msg,13,area_code,yyyy/mm/dd hh:MM:ss, 自船ID, 緯度(度), 経度(度), 船速(Kt), 方位(度),自船WP数, {WP緯度(度), WP経度(度)}x 自船WP数,他船数,{他船ID, 緯度(度), 経度(度), 船速(Kt),方位(度)}x 他船数



通信内容、JSON形式(BOM無、CR&LF、Sim.→Algorithm)

Client(Algorithm)
→ Simulation

```
msg.0の例
{
  "msg":0,
  "hostAddress":"localhost",
  "portNo": 2012
}
```

```
msg.2の例
{
  "msg":2,
  "dt_s":1.0
}
```

```
msg.4の例
{
  "msg":4,
  "interval_step":30
}
```

```
msg.6の例
{
  "msg":6,
  "detectionRadius_m":5000.0
}
```

msg.6は、他船情報の
返信を求めない。

```
msg.8の例
{
  "msg":8,
  "scenario_no":0
}
```

```
msg.10の例
{
  "msg":10,
  "L_m": 150.0,
  "B_m": 20.0,
  "T_s": 50.0,
  "K_1/s": 0.05,
  "Te_s": 2.5,
  "SD_m": 600,
  "rudderLimit_deg": 20.0,
  "Ts_s": 30.0,
  "speedLowLimit_Kt": 10.0,
  "speedUpLimit_Kt": 14.0,
  "PIDkP": 0.5,
  "PIDkI": 0,
  "PIDkD": 20.0
}
```

```
msg.12の例
{
  "msg":12,
  "detectionRadius_m":10000.0
}
```

msg.12は、他船情報の
返信を求める。

```
req.14の例
{
  "msg":14,
  "wp_list": [
    { "ID": 0, "lat_deg": 33.9, "lon_deg": 138.0, "speed_kt": 12.0, "name": "No0"},
    { "ID": 1, "lat_deg": 34.1, "lon_deg": 138.0, "speed_kt": 12.0, "name": "No1"}
  ]
}
```

```
msg.16の例
{
  "msg":16
}
```

```
msg.18の例
{
  "msg":18
}
```

通信内容、JSON形式(BOM無、CR&LF、Algorithm→Sim.)

Simulation → Algorithm (Client)

```
msg.1の例
{
  "msg":1,
  "confirmationHost":localhost,
  "confirmationPort":2001,
  "scenario_list": [
    {"ID": 0, "test01.txt"},
    {"ID": 1, "imzu01.txt"}
  ]
}
```

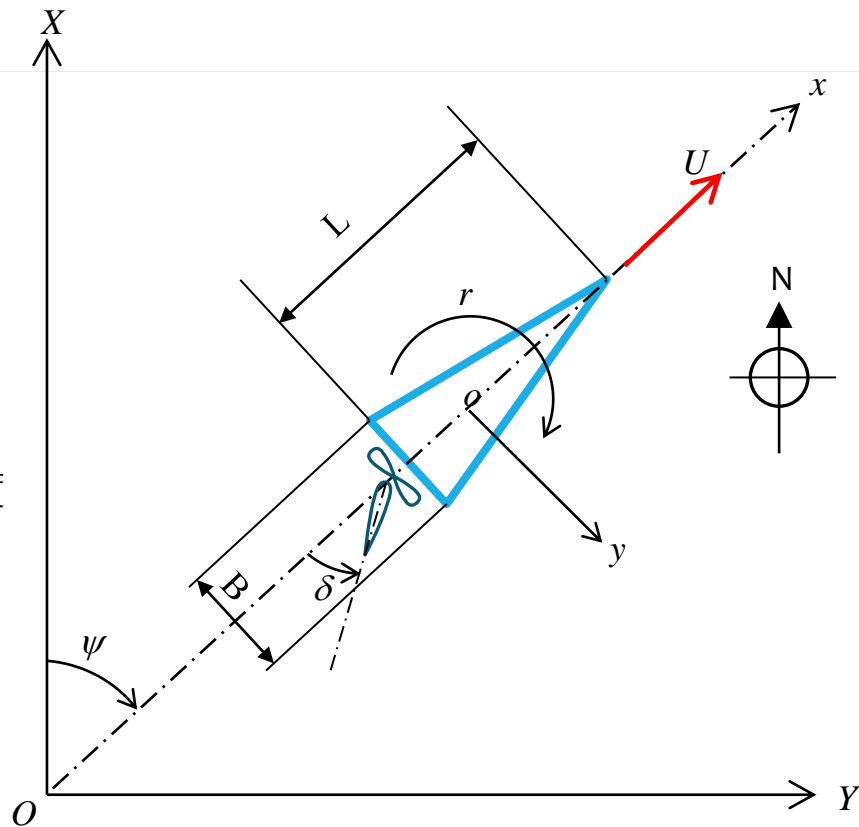
```
Msg 13の例
{
  "msg":13,
  "ownShipInfo":{
    "area":8,
    "DateTime": yyyy/mm/dd hh:MM:ss,
    "ID":0,
    "lat_deg":138.0,
    "lon_deg":38.0,
    "speed_Kt":12.0,
    "cog_deg":10.0,
    "own_wp_list": [
      {"lat_deg": 33.9, "lon_deg": 138.0, "speed_kt": 12.0},
      {"lat_deg": 34.1, "lon_deg": 138.0, "speed_kt": 12.0}
    ]
  }
  "targetShipList": [
    {"ID": 1, "lat_deg": 33.9, "lon_deg": 138.0, "speed_kt": 12.0, "cog_deg":300.0},
    {"ID": 2, "lat_deg": 33.9, "lon_deg": 138.1, "speed_kt": 11.2, "cog_deg":300.0}
  ]
}
```


座標系 & 運動モデル & 時間積分

■ 運動モデル

- ・KTモデル
(速度変化も追加)

T : 追従性指数
 K : 旋回性指数
 r : 重心軸の回頭角速度
 δ : 舵角
 δ_E : 指示舵角
 T_E : 舵角の追従性指数
 U : 船速
 U_S : 指示船速
 T_S : 指示船速の追従性指数



■ 時間積分

- ・4次精度Rung-Kutta法

$$T \frac{dr}{dt} + r = K\delta$$

$$\frac{dr}{dt} = \frac{K\delta - r}{T}$$

$$\frac{dr}{dt} = \frac{h}{K\delta - r}$$

$$f(r) = \frac{K\delta - r}{T}$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\delta_E - \delta}{T_E}$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{h}{\delta^{n+1} - \delta^n}$$

$$f(\delta) = \frac{\delta_E - \delta}{T_E}$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{U_S - U}{T_S}$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{h}{U^{n+1} - U^n}$$

$$f(U) = \frac{U_S - U}{T_S}$$

$$k_1 = hf(r^n)$$

$$k_2 = hf(r^n + k_1/2)$$

$$k_3 = hf(r^n + k_2/2)$$

$$k_4 = hf(r^n + k_3)$$

$$k = (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)/6$$

$$r^{n+1} = r^n + k$$

テストケース（シナリオ）

シナリオID	シナリオファイル名	内容
TST0	Test0.txt	相手船無し。360度回頭コース
IMZ1~22	Imazu01~22.txt	今津問題22例
TKY01	TokyoYYYYMMDDhhmmss.txt	東京湾内、YYYYMMDDhhmmss開始、過去の実交通流
OSK01	OsakaYYYYMMDDhhmmss.txt	大阪湾内、YYYYMMDDhhmmss開始、過去の実交通流
STO01	SetoYYYYMMDDhhmmss.txt	瀬戸内海、YYYYMMDDhhmmss開始、過去の実交通流

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18
19	20	21	22		

Collision Time (hour)	0.5
Own Ship's Speed(knots)	12
Over-taken Speed(knots)	8.4

今津問題の設定条件

△：自船、○：他船

衝突危険度の指標

- TCPA(Time to Closest Point of Approach)
- DCPA(Distance to Closest Point of Approach)
- OZT(Obstacle Zone by Target)
- CJ(Collision Judgement)

小林弘明、遠藤真、“船舶避航操縦の解析—入間・機械系解析の観点より—”、日本航海学会論文集、56号、pp.101-109、(1976)

- SJ(Subjective Judgement)

原 潔、“輻輳海域における避航操船基準の有効性”、日本航海学会論文集、85号、pp.33-40、(1991)

他の指標についても、導入を検討

- SS(Safety Score)、PS(Penalty Score) 【実装中】

P.K.E.Minne, Automatic testing of maritime collision avoidance algorithms , (2017)

シミュレーションシステム、デモ (知識ベースアルゴリズム)

The screenshot displays the ASVSim simulation environment. The main window shows a 3D model of a ship navigating through a harbor with several waypoints (wp1 to wp11). A 'Dialog' window is open on the left, showing network settings (Host: 127.0.0.1, Port: 2001) and a message string: `[\"msg\":14,\"wp_list\":[[\"ID\":0,\"lat_deg\":35.5774`. Below it, a 'Form1' window provides detailed simulation parameters:

通信設定
Host: localhost, Port: 2002, Message: [127.0.0.1 (2001)]

シミュレーション設定
Time step: 1, Communication step: 30, Other ship radius: 5000, Scenario: case_tokyo06.txt

自船パラメータ
L(m): 150.0, B(m): 20.0, T(s): 50.0, K(1/s): 0.05, Te(s): 2.5, SD(m): 300, Ts(s): 30.0, Rudder Limit(deg): 20.0, Velocity Lower: 10.0, Upper Limit(Kt): 14.0, PID for rudder control: forP 0.5, forI 0.0, forD 20.0

On the right, a 'Collision Indices' window shows four line graphs for parameters: SJ (0.0), SJ (-2.0), TOPA (-10.0), and DOP (0.0). The Windows taskbar at the bottom shows the date 2020/11/29 and time 9:38.

シミュレーションシステム、応用先

初期の避航操船アルゴリズムの開発段階での利用を想定

- * 避航操船アルゴリズムの性能確認、評価
- * AIの学習環境の提供

- * (他の活用事例として
遠隔操船のバーチャル環境)

まとめ

- * 海技研における自動運航船研究開発の概要のまとめ。
 - ・ 立体視のデモ
 - ・ 自動着棧実験の再現デモ
- * 避航操船アルゴリズム（3手法）の概要を報告。
- * シミュレーションシステム（簡易版）を報告。
 - ・ 開発初期段階の避航操船アルゴリズムの評価、開発支援
 - ・ シミュレーションの重要性が今後も、増大



ご清聴ありがとうございました。



*以降、付録



衝突危険度の指標, CJ

小林弘明、遠藤真、“船舶避航操縦の解析—入間・機械系解析の観点より—”、日本航海学会論文集、56号、pp.101-109、(1976)

CJ(Collision Judgement)=

第1項：危険度
第2項：安全度

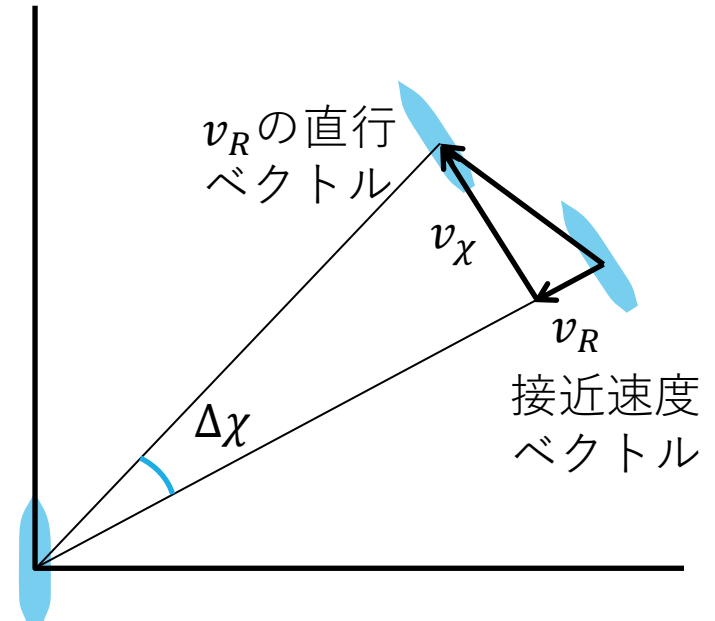
$$CJ = v_R - av_\chi = -\dot{R} - aR|\dot{\chi}|$$

第1項：危険度に
距離情報を加味

$$CJ = -\frac{\dot{R}}{R} - aR|\dot{\chi}| \quad \begin{array}{l} a \doteq 3.75 \times 10^{-5} \\ b \doteq (1.3 \sim 1.7) \times 10^{-4} \end{array}$$

自船船首方向にある
相手船ほど避航が容易

$$CJ = -\frac{\dot{R}}{R} - aR|\dot{\chi}| + b\chi$$



$$TCPA \doteq \frac{R}{v_R} = -\frac{R}{\dot{R}}$$

$$DCPA \doteq v_\chi \times TCPA = -\frac{R^2}{\dot{R}} \dot{\chi}$$

衝突危険度の指標, SJ

原 潔、“輻輳海域における避航操船基準の有効性”、日本航海学会論文集、85号、pp.33-40、(1991)

衝突危険判断に関するファジー推論モデルを用いて検討

SJ = Subjective Judgement : 主観的指標、出会い状況下における操船者の感じる衝突危険度（現在の衝突危険度）

操船者は衝突危険度を主として

相対距離と相対方位の変化率で判断。追越し時は、さらに接近速度を加えた指標から判断。

$$SJ_{ij} = a_{ij} + b_{ij} \times R' + c_{ij} \times \Omega$$

R' : R/L船の長さ (L) で無次元化した相対距離

Ω : $\dot{\theta} \times L/V$ 、船の長さ と船速で無次元化した相対方位 (θ) の変化率

a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} : 回帰係数

: 相対距離のグループ (i=1遠い, 2中くらい, 3近い)

: 方位の変化率のグループ (j=1大きい, 2中くらい, 3小さい)

きわめて危険

$$SJ = -3$$

きわめて安全

$$SJ = +3$$

危険

$$SJ = -2$$

安全

$$SJ = +2$$

やや危険

$$SJ = -1$$

やや安全

$$SJ = +1$$

どちらともいえない

$$SJ = 0$$

Nakamura et al “Study on Automatic Collision Avoidance System and Method for Evaluating Collision Avoidance Manoeuvring Results”, J. Phys.: Conf. Ser. 1357 012033, (2019)

Risk of Collision

$$R(X_{i,j}) = (R_x, R_y) \cdot \left(1 - \frac{TCPA}{WTCPA}\right)$$

collision avoidance manoeuvring space model ($X_{i,j}$)

R_y : the risk in direction of the fore and aft line of a target ship,

R_x : such as the transverse direction.

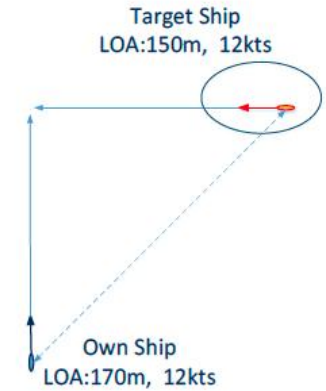
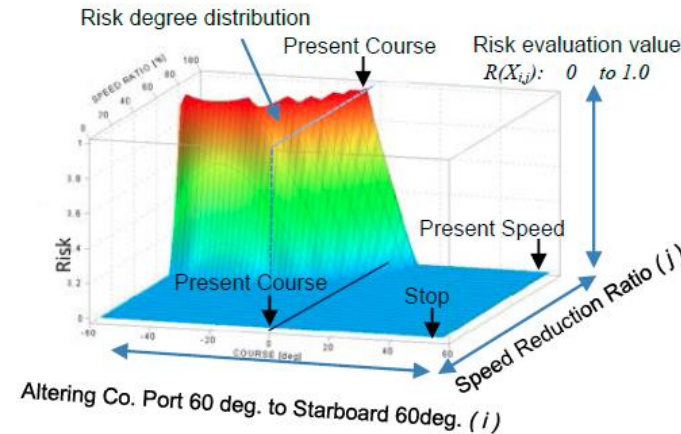
Then the larger one was adopted as the risk of collision on such manoeuvre $X_{i,j}$. (R_x, R_y ; 0: No risk, 1: Maximum risk).

TCPA : Time to Closest Point to Approach ($Pb(X_{i,0}) = \exp(-a_c \cdot \Delta C_0)$)

WTCPA : certain constant time;

$$Pb(X_{0,j}) = \exp(-a_v \cdot \Delta V)$$

$$Pb(X_{i,j}) = Pb(X_{i,0}) \cdot Pb(X_{0,j}) = \exp(-a_c \cdot \Delta C_0 - a_v \cdot \Delta V)$$



The horizontal axis is a course (i), the longitudinal axis is a speed (j) and the evaluation value of each manoeuvre ($Pb(X_{i,j})$)

is extended perpendicularly upward.