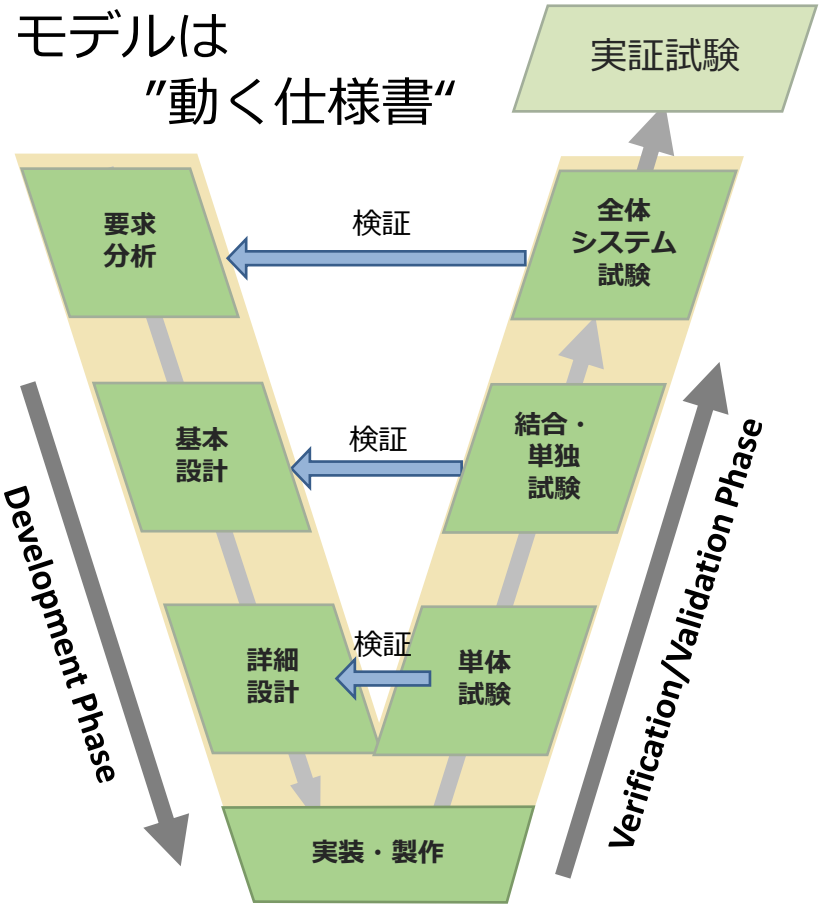
DFFASプロジェクトにおける船体運動モデルの開発と活用

2021年12月2日

株式会社MTI　船舶物流技術グループ
二木　崚佑

モデルの活用



※MILS…Model in the Loop Simulation, SILS…Simulation in the Loop Simulation, HILS…Hardware in the Loop Simulation

© 2021. MTI Co., Ltd. All rights reserved.

自律運航と制御

- 離散から着桟までの一連の航海作業を自律化

対象船「すざく」

乗組員による着桟時オペレーション

低速域の操縦運動を考慮した
モデルを活用し、制御系を開発

© 2021. MTI Co., Ltd. All rights reserved.

低速時の操縦運動

中高速域（大洋航海中）

- 前進運動＞横運動
- 流体力は
  慣性力と推力が主体

低速域（離着桟時）

- 港湾内は水深が浅い
- 外乱の影響
- バウスラスタや
  プロペラ逆転による
  減速

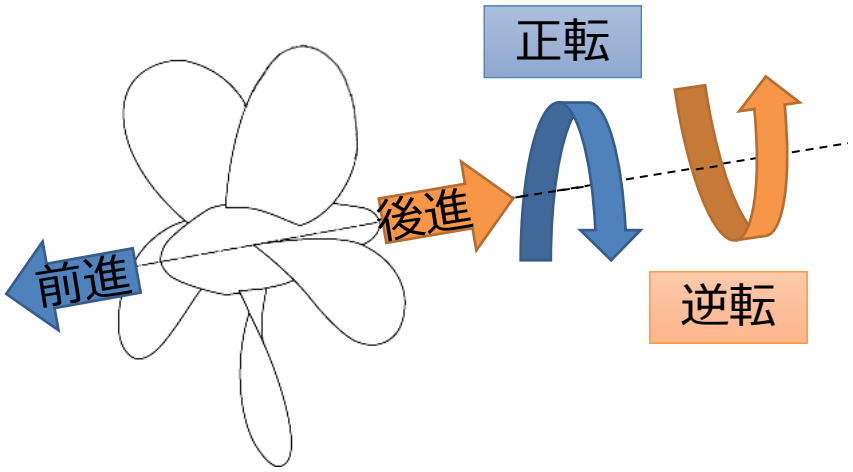
低速域では、従来の操縦運動数学モデルの
前提条件が成立しない

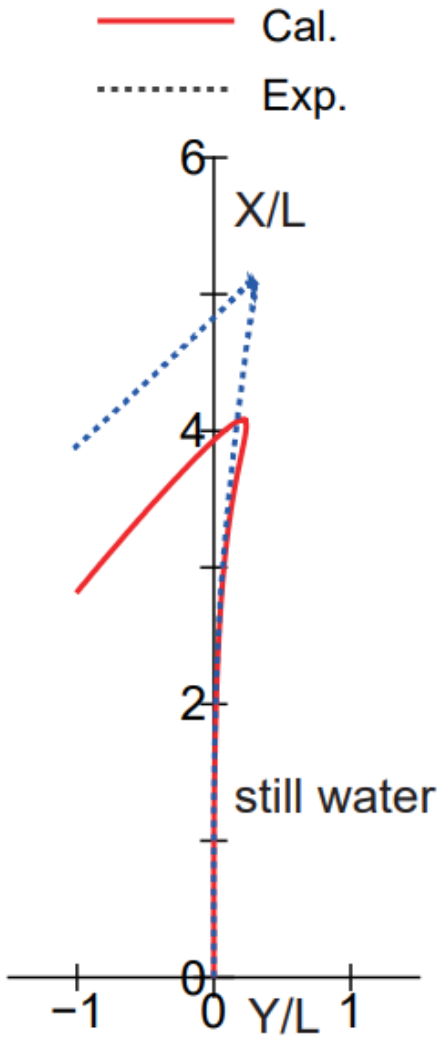
© 2021. MTI Co., Ltd. All rights reserved.

減速時の船体運動

減速のためプロペラ逆転
⇒不平衡流体力の発生

船体は直進状態では停止せず、
回頭する





平水中でのプロペラ逆転停止運動

安川宏紀,波浪中における船の操縦運動シミュレーション（第2報：zig-zag運動とプロペラ逆転停止運動）,日本船舶海洋工学論部bb集第7号,2008年6月, pp.163-170

© 2021. MTI Co., Ltd. All rights reserved.

水槽試験実施項目

試験種別	試験項目	平水中（深水）	波浪中（深水）	浅水域
自由航走試験	Z試験	○	○	○
	旋回試験	○	○	○
	定常横力試験	○	―	―
	バウスラスタによる旋回試験	○	―	○
	プロペラ逆転停止運動	○	―	―
拘束模型試験	抵抗・自航試験	○	○	○
	斜航・旋回試験（CMT)	○	○	○
	荷重度変更直進時操舵試験	○	―	○
	斜航・旋回運動時操舵試験（整流係数試験）	○	―	○
	プロペラ逆転時付加流体力試験	○	―	―
その他	**4象限POT**	○	―	―
	風洞試験	―		

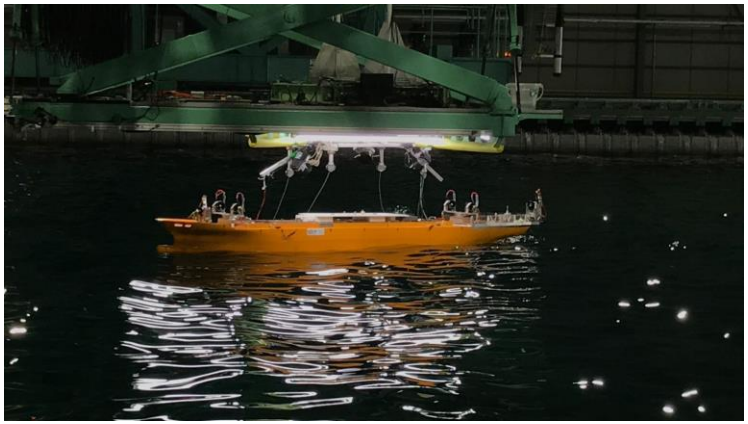
さらに Laden/Ballast、 Full/Low speedなど条件を変え実施

© 2021. MTI Co., Ltd. All rights reserved.

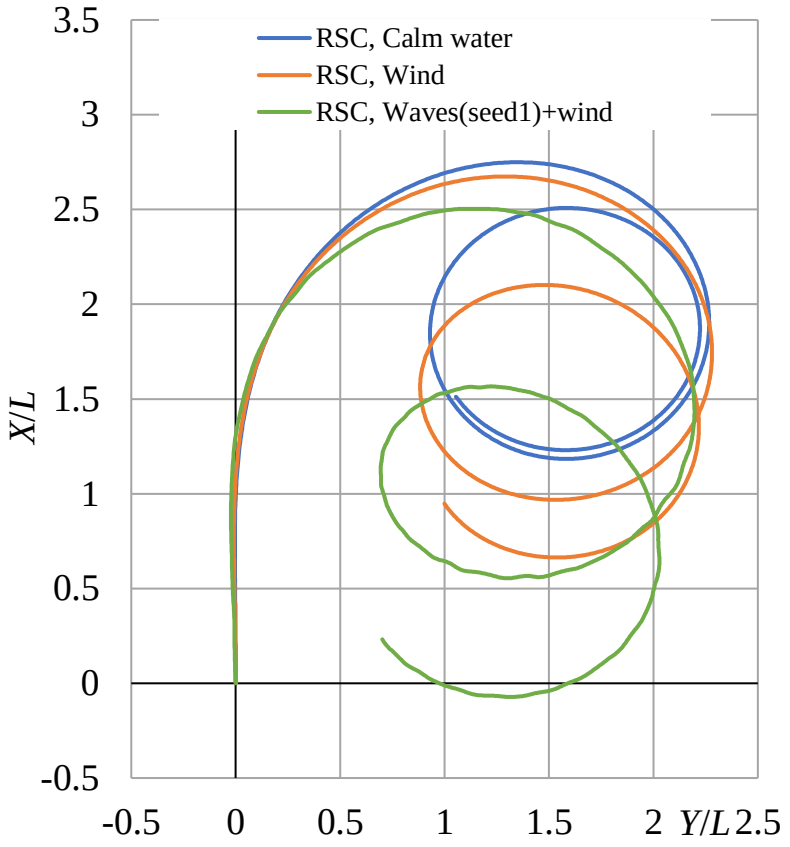
試験実施の様子

波浪中自由航走試験

全周囲型造波機を有す実海域再現水槽にて実施



不規則波中試験の様子



35度旋回試験の航跡
（平水中・風あり・不規則波中・波＋風）

※海上技術安全研究所にて実施

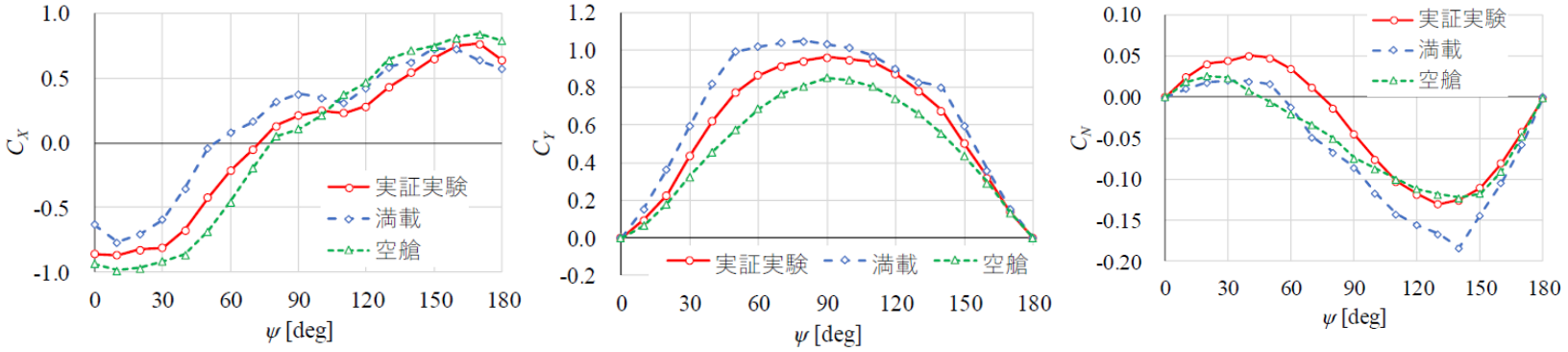
© 2021. MTI Co., Ltd. All rights reserved.

試験実施の様子

風洞試験

風圧下での操縦性予測の精度を向上させるため、それぞれの載荷状態で風圧力を計測

風洞と風洞試験用模型船



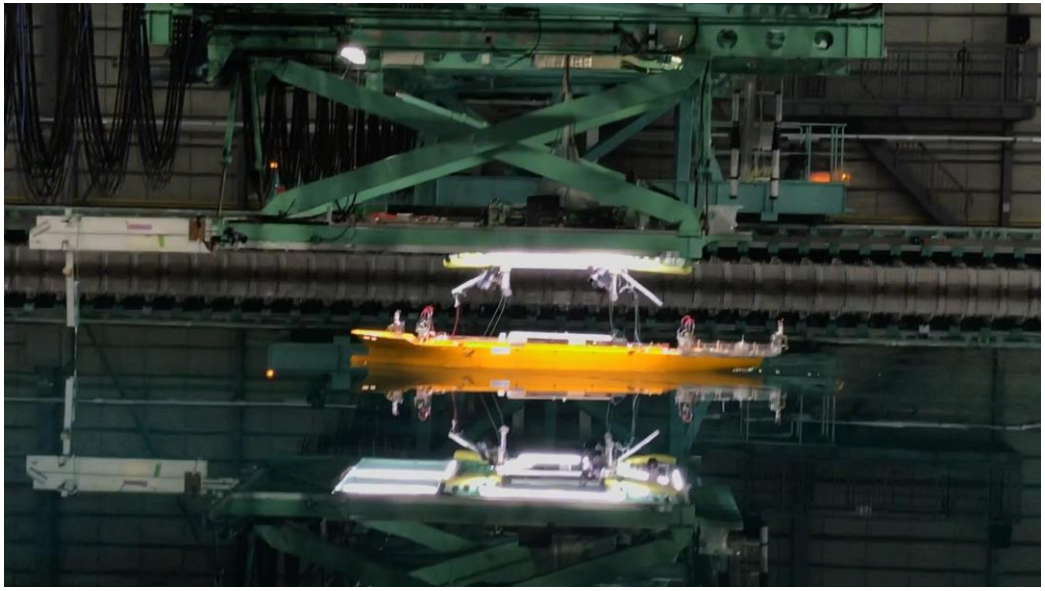
風圧力係数

※海上技術安全研究所にて実施

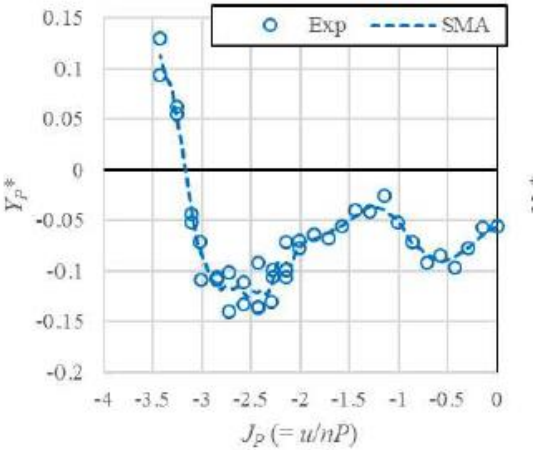
© 2021. MTI Co., Ltd. All rights reserved.

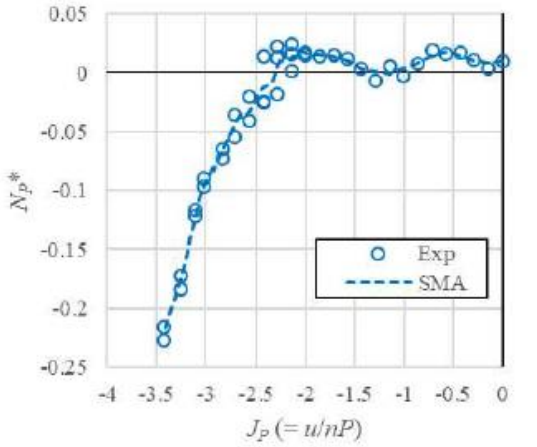
試験実施の様子

プロペラ逆転停止運動



平水中プロペラ逆転時の動画





不平衡流体力

※海上技術安全研究所にて実施

© 2021. MTI Co., Ltd. All rights reserved.

船体運動モデル

Fossenの6自由度船体運動モデル (Fossen, 2002)

$$\boldsymbol{M}_{RB}\dot{\boldsymbol{\nu}} + \boldsymbol{C}_{RB}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} = \sum \boldsymbol{\tau}_i$$

ここで、 $\boldsymbol{M}_{RB}$は慣性マトリクス、$\boldsymbol{C}_{RB}$は遠心力 / コリオリカ、$\boldsymbol{\nu}$は速度ベクトル

$$\boldsymbol{M}_{RB}\dot{\boldsymbol{\nu}} + \boldsymbol{C}_{RB}(\boldsymbol{\nu})\boldsymbol{\nu} = \boldsymbol{\tau}_{stat} + \boldsymbol{\tau}_{hyd} + \boldsymbol{\tau}_{visc} + \boldsymbol{\tau}_{wind} + \boldsymbol{\tau}_{wave1} + \boldsymbol{\tau}_{wave2} + \boldsymbol{\tau}_{ext} + \boldsymbol{\tau}_{prop}$$

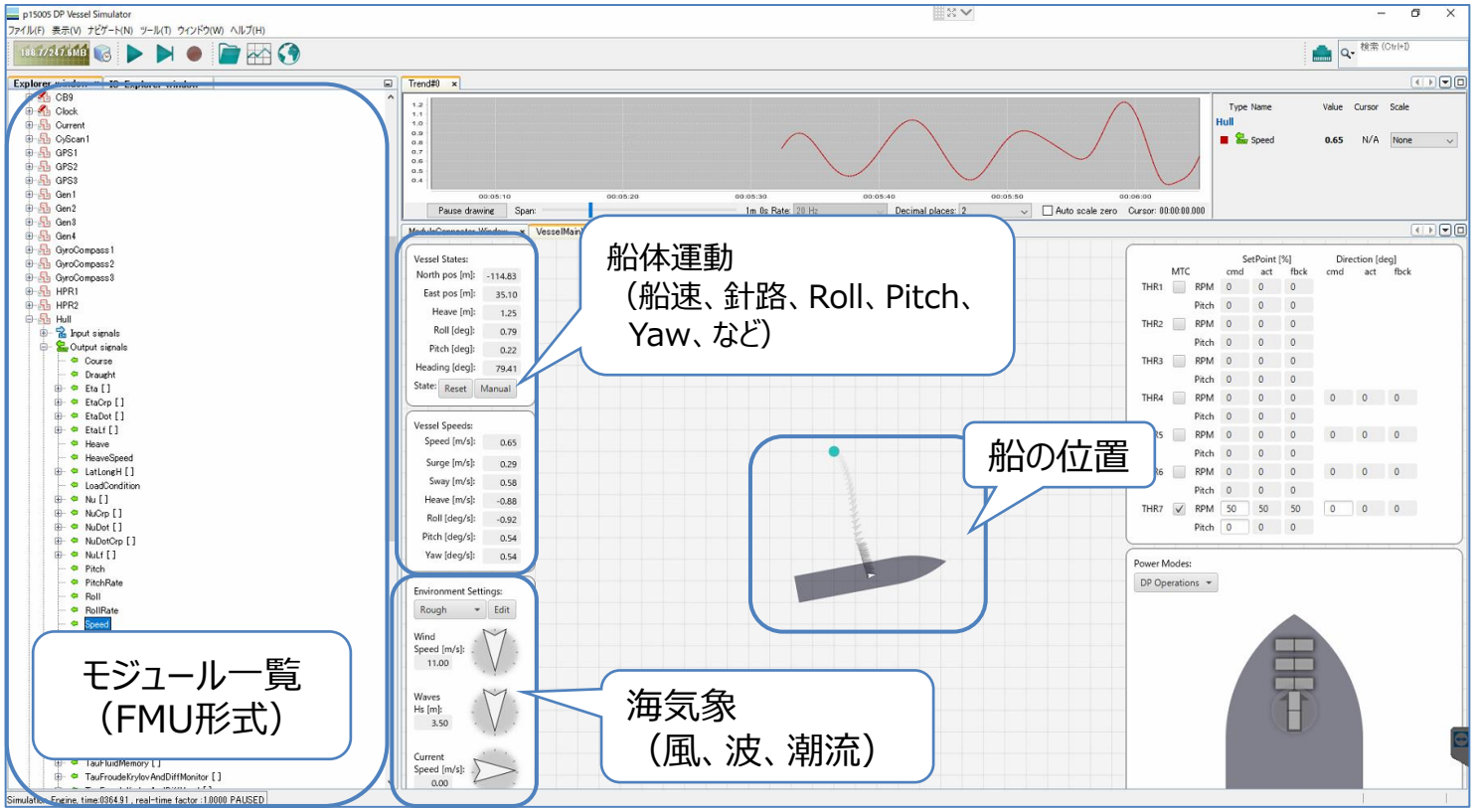
制御モデルの評価に実績。

MMGモデルとは式が異なる
⇒一部数式の修正や係数の追加

© 2021. MTI Co., Ltd. All rights reserved.

シミュレーション環境

各種MILS/SILS/HILSに対応したシミュレーションプラットフォームを利用



© 2021. MTI Co., Ltd. All rights reserved.

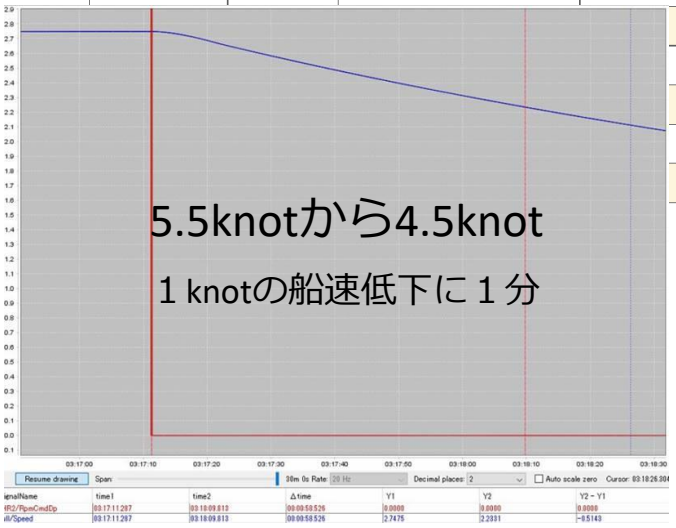
船体運動モデルの検証

クラッチ脱で自然減速を行った際の減速率

着桟時の「すざく」運航データ

時刻(from)	時刻to)	平均エンジン回転数	平均舵角	船速(from)	船速(to)	経過時間(秒)	船速変化率(knot/分)
18:19:32	18:24:00	90	10	1.0	6.0	268	1.1
18:24:00	18:24:						-1.0
18:24:06	18:24:						-0.6
18:24:16	18:24:24	クラッチ脱	0	5.8	5.0	8	-1.5
18:24:24	18:30:13	80	0	5.6	7.0	349	0.2
18:30:13	18:33:30	**クラッチ脱**	0	7.0	3.5	197	-1.1
18:33:30	18:34:14	80	0	3.5	4.7	44	1.6
				4.7	3.6	104	-0.6
				3.6	6.0	114	1.3
				6.0	4.5	99	-0.9
				4.5	6.0	114	0.8
				6.0	4.8	63	-1.1

およそ-1knot/分と判明

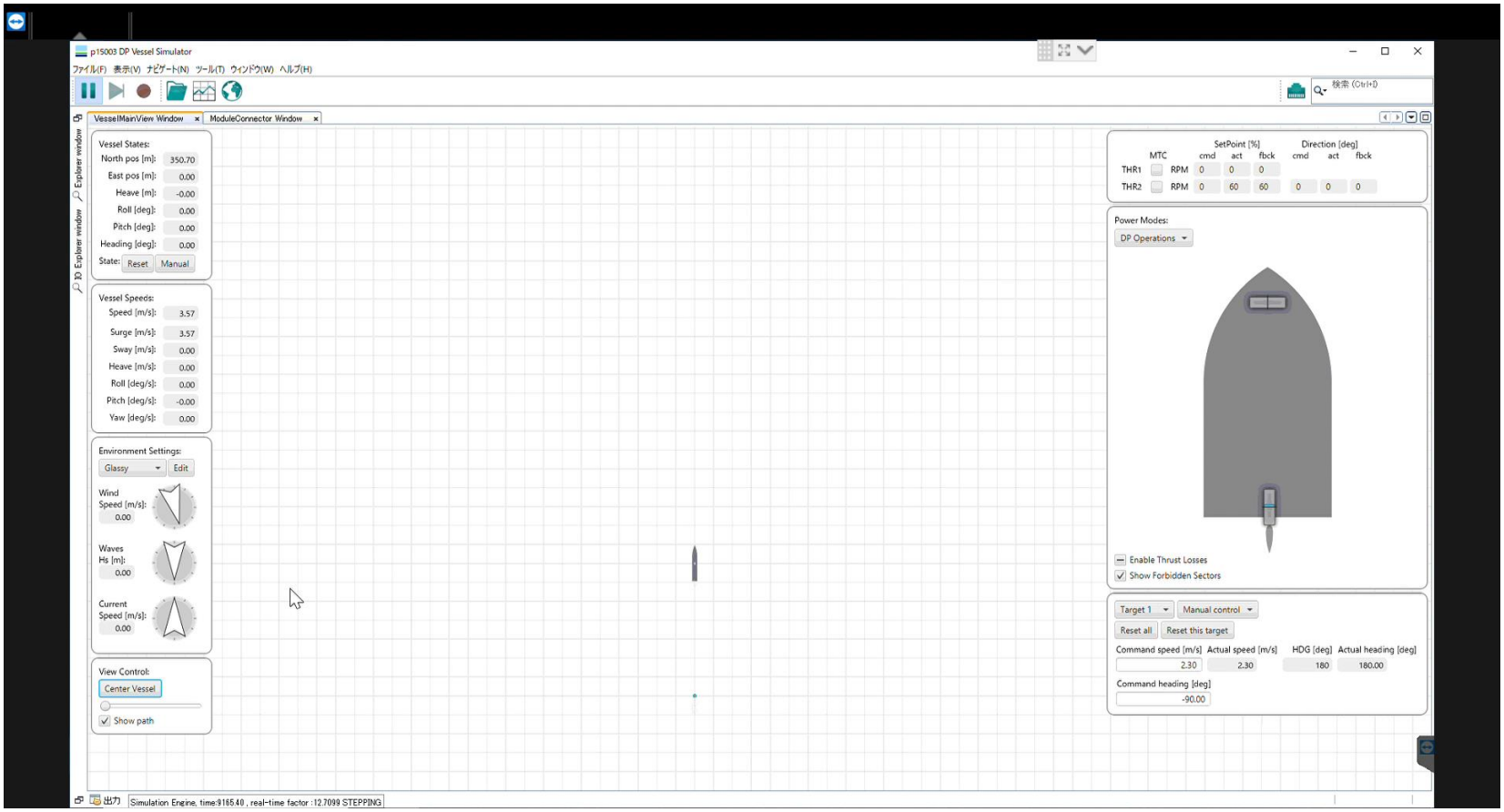


船体運動モデルを用いて単独テスト実行
⇒実船の減速率とほぼ一致

© 2021. MTI Co., Ltd. All rights reserved.

船体運動モデルの検証

プロペラ逆転時不平衡流体力をモデルに反映

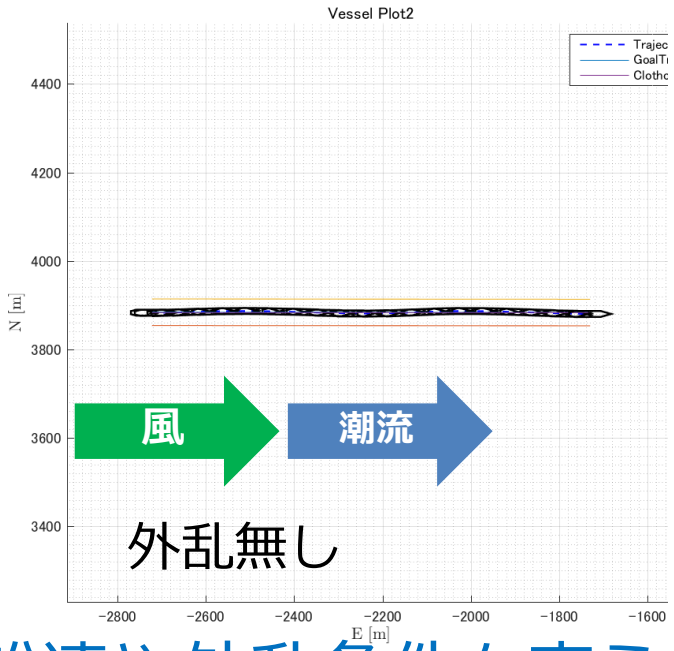


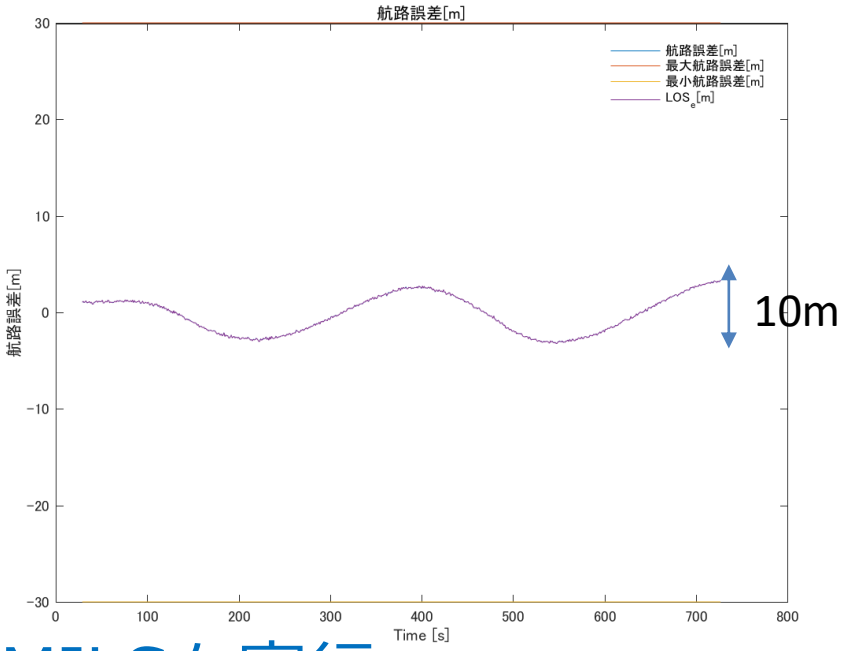
© 2021. MTI Co., Ltd. All rights reserved.

MILSの結果

航路を設定し、
航路誤差が許容値内に収まるか検証

3knotでの航行



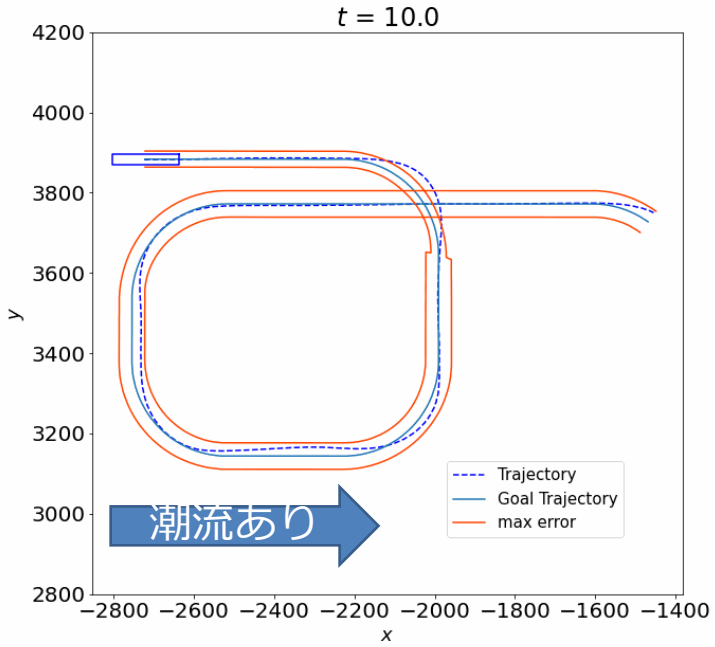


船速や外乱条件を変え、MILSを実行

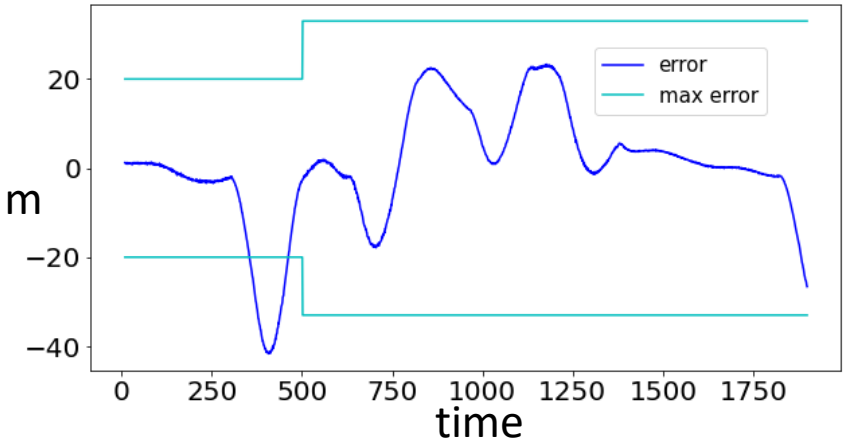
© 2021. MTI Co., Ltd. All rights reserved.

MILSの結果：

航路を設定し、
様々な外乱条件に対し許容航路誤差内に収まるか検証



低速（4knot）での旋回航跡



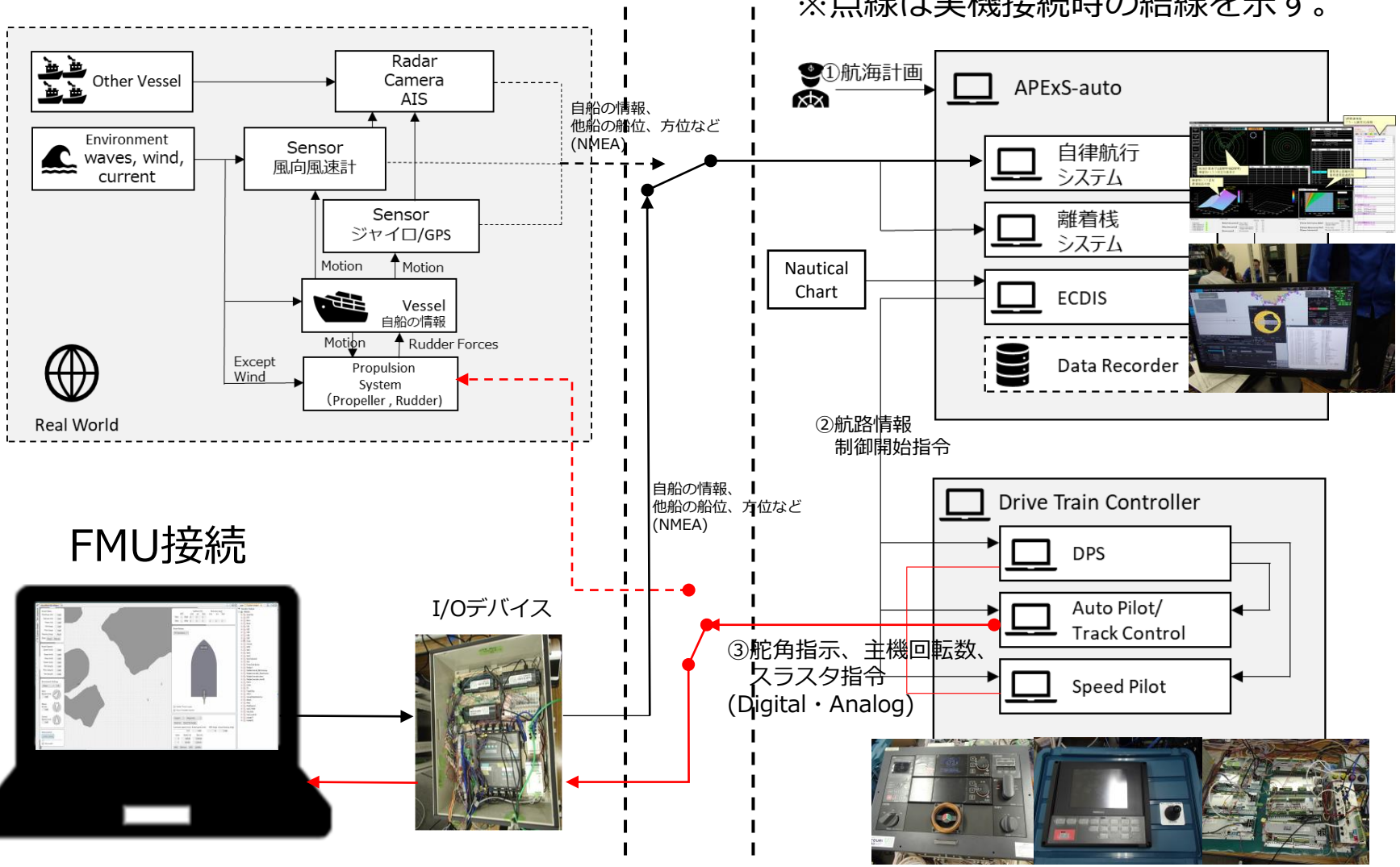
航路誤差

検証⇔修正を繰り返し性能改善が可能に

© 2021. MTI Co., Ltd. All rights reserved.

陸上統合試験(HILS)

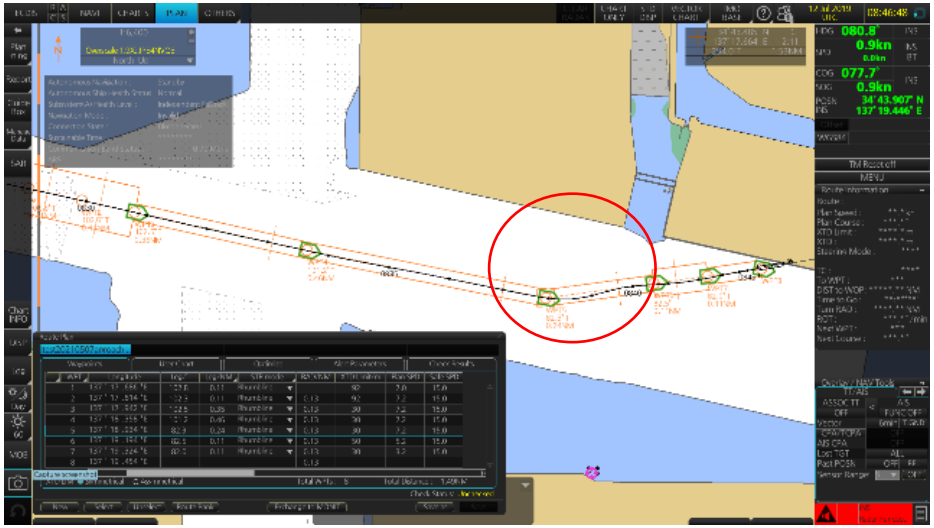
※赤線制御指令
※点線は実機接続時の結線を示す。



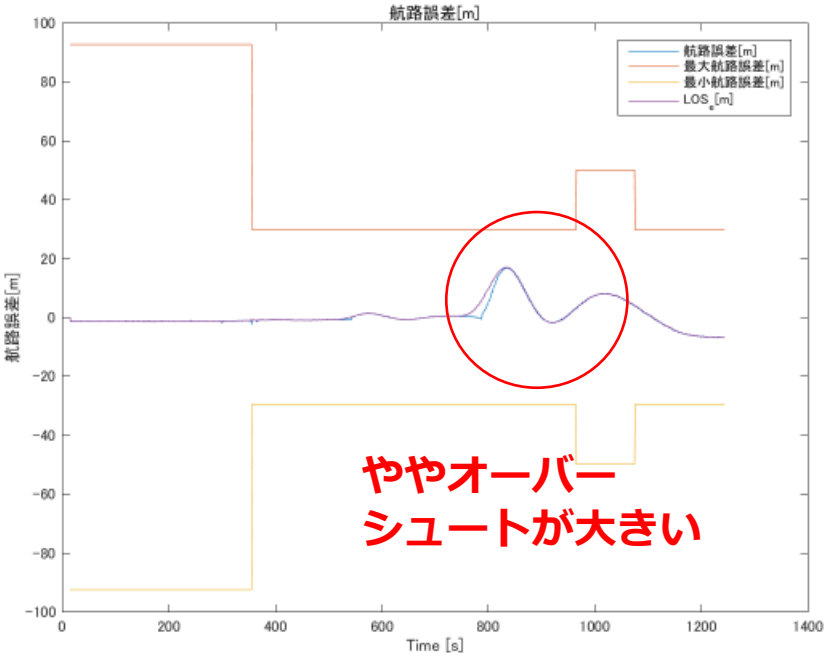
© 2021. MTI Co., Ltd. All rights reserved.

陸上統合試験で見つかった課題

減速中の変針により航路誤差がやや大きくなった



DPSに入力された航路計画



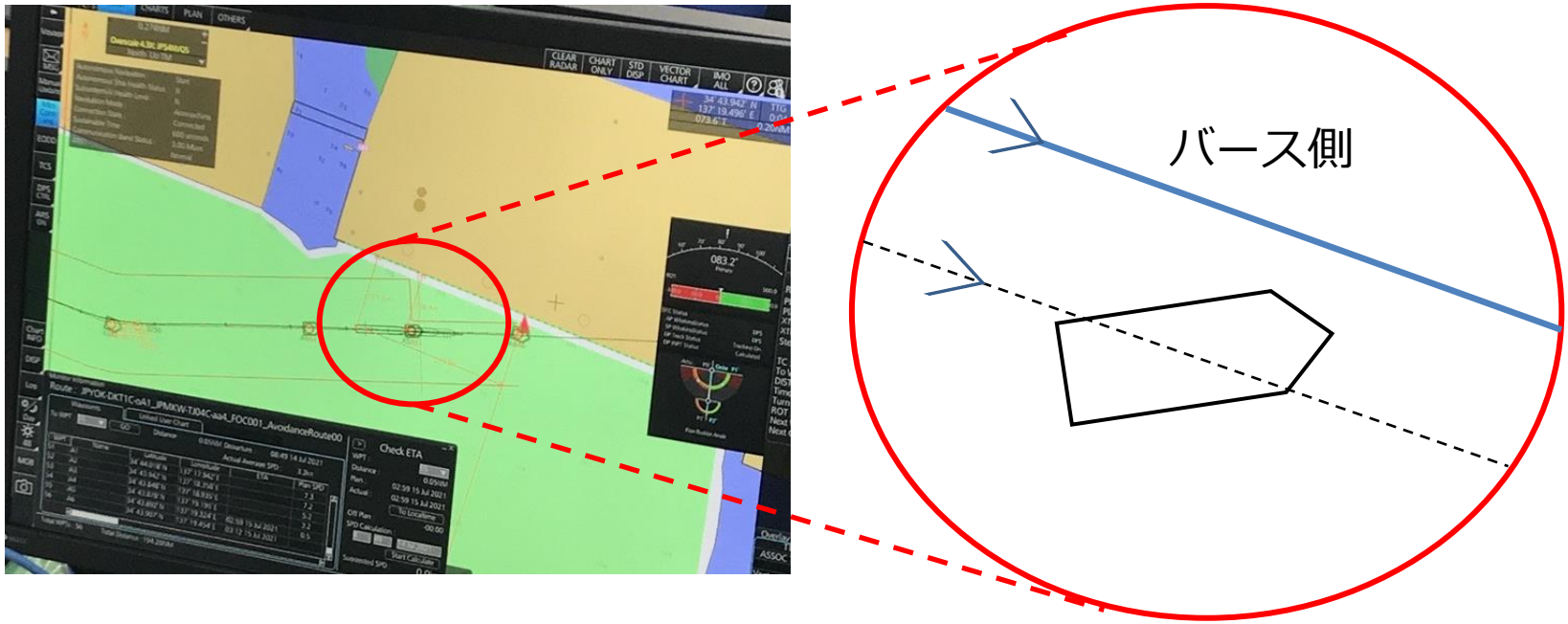
航路誤差評価結果

© 2021. MTI Co., Ltd. All rights reserved.

陸上統合試験で見つかった課題

着桟時の船速・姿勢制御

操縦性悪化・外乱の影響・機器の制約　など



統合試験で課題を発見し“本船搭載前に修正”

© 2021. MTI Co., Ltd. All rights reserved.

まとめ

- 水槽試験の結果を用いて船体運動モデルを開発した。
- DFFAS PJでは自律船システム検証のために、船体運動モデルを活用し統合試験を実施した。
- シミュレータを活用することで、事前に課題が抽出され、実証試験前のシステム調整を行うことができた。
- 船体運動モデルの活用は、DPSをはじめとする制御系の開発に有用である。

© 2021. MTI Co., Ltd. All rights reserved.

ご清聴ありがとうございました。

© 2021. MTI Co., Ltd. All rights reserved.