

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2021-181301
(P2021-181301A)

(43) 公開日 令和3年11月25日(2021.11.25)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
B 63 H 25/04 (2006.01)	B 63 H 25/04 D	5 H 3 0 1
G 05 D 1/02 (2020.01)	B 63 H 25/04 F	
	G 05 D 1/02 W	

審査請求 未請求 請求項の数 25 O L (全 37 頁)

(21) 出願番号 特願2021-82534 (P2021-82534)
 (22) 出願日 令和3年5月14日 (2021.5.14)
 (31) 優先権主張番号 特願2020-86108 (P2020-86108)
 (32) 優先日 令和2年5月15日 (2020.5.15)
 (33) 優先権主張国・地域又は機関
 日本国 (JP)

(71) 出願人 501204525
 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術
 研究所
 東京都三鷹市新川6丁目38番1号
 (74) 代理人 100098545
 弁理士 阿部 伸一
 (74) 代理人 100189717
 弁理士 太田 貴章
 (72) 発明者 澤田 涼平
 東京都三鷹市新川6丁目38番1号 国立
 研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究
 所内
 Fターム(参考) 5H301 AA04 AA10 CC03 CC06 DD05
 DD07 DD15 FF11 GG14 GG16
 HH01 HH02 HH18

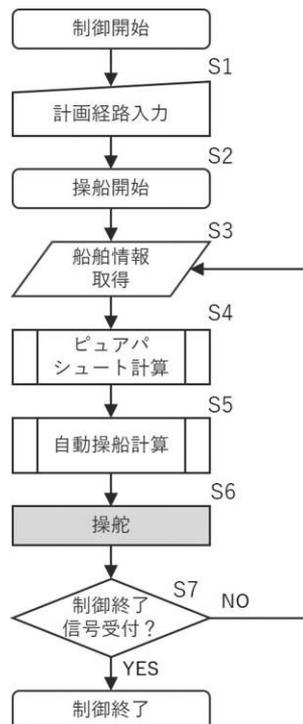
(54) 【発明の名称】 船舶の自動誘導方法、船舶の自動誘導プログラム、船舶の自動誘導システム、及び船舶

(57) 【要約】

【課題】 大量の計算を必要とすることなく、外乱があっても計画経路からの偏差を一定以下に抑制することができる船舶の自動誘導方法、船舶の自動誘導プログラム、船舶の自動誘導システム、及び船舶を提供すること。

【解決手段】 航走する船舶の少なくとも操舵を自動的に行う自動操船装置を用いた船舶の自動誘導方法においては、計画経路を取得又は計画経路の計算を行う計画経路生成過程 S 1 と、船舶の位置及び船首方位を取得する船舶情報取得過程 S 3 と、位置及び船首方位に基づいて、船舶の進行方向の計画経路の上に所定の条件を満たす目標点を計算する又は目標点の方位を計算するピュアパシユート計算過程 S 4 と、目標点又は方位と、位置又は船首方位に基づいて船舶の操舵角を計算する自動操船計算過程 S 5 と、計算した操舵角に基づいて自動操船装置を制御する制御過程 S 6 とを有する。

【選択図】 図 2



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

航走する船舶の少なくとも操舵を自動的に行う自動操船装置を用いた船舶の自動誘導方法であって、
計画経路を取得又は前記計画経路の計算を行う計画経路生成過程と、前記船舶の位置及び船首方位を取得する船舶情報取得過程と、前記位置及び前記船首方位に基づいて、前記船舶の進行方向の前記計画経路の上に所定の条件を満たす目標点を計算する又は前記目標点の方位を計算するピュアパシュート計算過程と、前記目標点又は前記方位と、前記位置又は前記船首方位に基づいて前記船舶の操舵角を計算する自動操船計算過程と、計算した前記操舵角に基づいて前記自動操船装置を制御する制御過程とを有することを特徴とする船舶の自動誘導方法。

10

【請求項 2】

前記船舶情報取得過程において前記船舶の速度を取得し、前記ピュアパシュート計算過程及び前記自動操船計算過程において前記速度を用いて計算を行うことを特徴とする請求項 1 に記載の船舶の自動誘導方法。

【請求項 3】

前記計画経路生成過程において、入力された前記船舶の到着点の到着位置と到着方位を取得し、前記船舶情報取得過程で取得した前記位置、前記船首方位、及び前記速度を用いて、前記到着位置に至り前記到着方位を確保できる前記計画経路を計算することを特徴とする請求項 2 に記載の船舶の自動誘導方法。

20

【請求項 4】

前記計画経路生成過程において、海域情報を取得し、航行不能な海域情報を加味して前記計画経路を計算することを特徴とする請求項 2 又は請求項 3 に記載の船舶の自動誘導方法。

【請求項 5】

前記計画経路生成過程において、曲線を成す前記計画経路を変更するための設定した制御点を調整する制御点調整過程をさらに有し、前記調整した前記制御点に基づき前記計画経路を生成することを特徴とする請求項 2 から請求項 4 のいずれか 1 項に記載の船舶の自動誘導方法。

【請求項 6】

前記計画経路生成過程において、前記計画経路を前記制御のモードを切り替えることを想定した複数の区分経路に分割することを特徴とする請求項 2 から請求項 5 のいずれか 1 項に記載の船舶の自動誘導方法。

30

【請求項 7】

前記自動操船計算過程で前記船舶の前記計画経路を航走する前記速度を計算し、前記制御過程において、計算した前記速度に基づいて、前記自動操船装置のクラッチを含む速度制御手段を制御することを特徴とする請求項 2 から請求項 6 のいずれか 1 項に記載の船舶の自動誘導方法。

【請求項 8】

前記計画経路生成過程において、前記到着位置において予め設定された前記船舶の前記速度がゼロの場合、前記船舶と前記到着位置までの距離が予め定められた距離に達した時点で前記船舶の前記到着位置への進入角度が予め定められた角度になるような前記区分経路を含む前記計画経路を生成すること特徴とする請求項 3 若しくは請求項 4 を引用する請求項 6、又は請求項 3 若しくは請求項 4 を引用する請求項 6 をさらに引用する請求項 7 に記載の船舶の自動誘導方法。

40

【請求項 9】

前記計画経路生成過程において、前記到着位置において予め設定された前記船舶の速度がゼロであり、かつ前記船舶の前記進行方向が予め定められた前記到着位置への進入角度となっている時、前記船舶と前記到着位置との距離が予め定められた距離より短い位置に達した時点で前記船舶の速度をゼロとなるように速度制御を行うための略直線の前記区分

50

経路を含む前記計画経路を生成することを特徴とする請求項 3 若しくは請求項 4 を引用する請求項 6、請求項 3 若しくは請求項 4 を引用する請求項 6 をさらに引用する請求項 7、又は請求項 8 に記載の船舶の自動誘導方法。

【請求項 10】

前記船舶情報取得過程で前記船舶の周辺の気象海象情報を取得し、前記自動操船計算過程において前記気象海象情報に基づいた前記船舶に対する外力を加味して前記操舵角及び前記速度を補正することを特徴とする請求項 2 から請求項 9 のいずれか 1 項に記載の船舶の自動誘導方法。

【請求項 11】

前記気象海象情報として取得した風向及び風速による前記船舶に対する前記外力を求め、前記外力による船体運動を予測し、前記外力による前記船体運動を打ち消すような前記操舵角又は前記速度を導出して風による外乱を補償するように前記自動操船装置を制御することを特徴とする請求項 10 に記載の船舶の自動誘導方法。

10

【請求項 12】

航走する船舶の少なくとも操舵の制御を自動的に行う自動操船装置を用いた船舶の自動誘導プログラムであって、

コンピュータに、

請求項 1 から請求項 11 のいずれか 1 項に記載の船舶の自動誘導方法における、条件の入力に従った前記計画経路生成過程と、前記船舶情報取得過程と、前記ピュアパシュート計算過程と、前記自動操船計算過程と、前記制御過程を実行させることを特徴とする船舶の自動誘導プログラム。

20

【請求項 13】

航走する船舶の少なくとも操舵の制御を自動的に行う自動操船装置を用いた船舶の自動誘導システムであって、

計画経路を取得又は前記計画経路の計算を行う計画経路生成手段と、前記船舶の位置及び船首方位を取得する船舶情報取得手段と、前記船舶の位置及び前記船首方位に基づいて、前記船舶の進行方向の前記計画経路の上に所定の条件を満たす目標点を計算する又は前記目標点の方位を計算するピュアパシュート計算手段と、前記目標点又は前記方位と、前記位置又は前記船首方位に基づいて前記船舶の操舵角を計算する自動操船計算手段と、前記船舶の操舵角に基づいて前記自動操船装置を制御する制御手段とを備えたことを特徴とする船舶の自動誘導システム。

30

【請求項 14】

前記船舶情報取得手段において前記船舶の速度を取得し、前記ピュアパシュート計算手段及び前記自動操船計算手段において前記速度を用いて計算を行うことを特徴とする請求項 13 に記載の船舶の自動誘導システム。

【請求項 15】

前記計画経路生成手段において、入力された前記船舶の到着点の到着位置と到着方位を取得し、前記船舶情報取得手段で取得した前記位置、前記船首方位、及び前記速度を用いて、前記到着位置に至り前記到着方位を確保できる前記計画経路を計算することを特徴とする請求項 14 に記載の船舶の自動誘導システム。

40

【請求項 16】

前記計画経路生成手段において、海域情報を取得し、航行不能な海域情報を加味して前記計画経路を計算することを特徴とする請求項 14 又は請求項 15 に記載の船舶の自動誘導システム。

【請求項 17】

前記計画経路生成手段において、曲線を成す前記計画経路を変更するための設定した制御点を乗組員が確認し変更を行う制御点調整部、又は前記船舶情報取得手段で得られた船舶情報に基づいて前記制御点の調整を自動的に行う自動制御点調整部を有し、前記調整した前記制御点に基づき前記計画経路を生成することを特徴とする請求項 14 から請求項 16 のいずれか 1 項に記載の船舶の自動誘導システム。

50

【請求項 18】

前記計画経路生成手段において、前記計画経路を前記制御のモードを切り替える複数の区分経路に分割することを特徴とする請求項 14 から請求項 17 のいずれか 1 項に記載の船舶の自動誘導システム。

【請求項 19】

前記自動操船計算手段で前記船舶の前記計画経路を航走する前記速度を計算し、前記制御手段において、計算した前記速度を得るように、前記自動操船装置のクラッチを含む速度制御手段を制御することを特徴とする請求項 14 から請求項 18 のいずれか 1 項に記載の船舶の自動誘導方法。

【請求項 20】

前記計画経路生成手段において、前記到着位置において予め設定された前記船舶の前記速度がゼロの場合、前記船舶と前記到着位置までの距離が予め定められた距離に達した時点で前記船舶の前記到着位置への進入角度が予め定められた角度になるような前記区分経路を含む前記計画経路を生成することを特徴とする請求項 15 若しくは請求項 16 を引用する請求項 18、又は請求項 15 若しくは請求項 16 を引用する請求項 18 をさらに引用する請求項 19 に記載の船舶の自動誘導システム。

【請求項 21】

前記計画経路生成手段において、前記到着位置において予め設定された前記船舶の速度がゼロであり、かつ前記船舶の前記進行方向が予め定められた前記到着位置への進入角度となっている時、前記船舶と前記到着位置との距離が予め定められた距離より短い位置に達した時点で前記船舶の速度をゼロとなるように速度制御を行うための略直線の前記区分経路を含む前記計画経路を生成することを特徴とする請求項 15 若しくは請求項 16 を引用する請求項 18、請求項 15 若しくは請求項 16 を引用する請求項 18 をさらに引用する請求項 19、又は請求項 20 に記載の船舶の自動誘導システム。

【請求項 22】

前記船舶情報取得手段で前記船舶の周辺の気象海象情報を取得し、前記自動操船計算手段において前記気象海象情報に基づいた前記船舶に対する外力を加味して前記操舵角及び前記速度を補正することを特徴とする請求項 14 から請求項 21 のいずれか 1 項に記載の船舶の自動誘導システム。

【請求項 23】

前記気象海象情報として取得した風向及び風速による前記船舶に対する前記外力を求め、前記外力による船体運動を予測し、前記外力による前記船体運動を打ち消すような前記操舵角又は前記速度を導出して風による外乱を補償するように前記自動操船装置を制御することを特徴とする請求項 22 に記載の船舶の自動誘導システム。

【請求項 24】

前記計画経路、前記船舶の位置、前記船首方位、前記目標点、又は前記目標点の方位、のうち少なくともいずれか 1 つを表示する表示手段を備えたことを特徴とする請求項 13 から請求項 23 のいずれか 1 項に記載の船舶の自動誘導システム。

【請求項 25】

請求項 13 から請求項 24 のいずれか 1 項に記載の船舶の自動誘導システムを備えたことを特徴とする船舶。

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、航走する船舶の少なくとも操舵を自動的に行う自動操船装置を用いた船舶の自動誘導方法、船舶の自動誘導プログラム、船舶の自動誘導システム、及び船舶に関する。

【背景技術】**【0002】**

着棧操船は船舶の操縦作業の中でも最も船員に対する負荷が高い作業の一つであり、そ

10

20

30

40

50

の上、低速状態での高度な操船技術が要求される。通常、低速航行時の船舶は舵直圧力の低下により操縦性が悪化し、さらに風や潮流等の外乱を受けやすくなるため着棧操船は一般に高い技量が必要とされる。一方で近年、内航海運においては熟練船員の不足や船員の高齢化が深刻化している。

【 0 0 0 3 】

ここで、特許文献 1 には、複数の目標地点の各々の位置に基づいて船の旋回航路を算出する航路算出部と、船の前方の間接目標地点を算出する間接目標地点算出部と、旋回航路と間接目標地点との位置関係に基づいて、指令舵角を算出する指令舵角算出部と、指令舵角に基づいて、船の操舵機構を制御する操舵制御部とを備えた自動操舵装置が開示されている。

10

また、特許文献 2 には、現航路から一定のターンレートでもって旋回して新航路へ航路変更（変針）する自動操舵方法において、ターンレートおよび船速より、変針点を現航路上に求め、この変針点を通り、新航路に平行な変針ラインを求め、この変針ラインを自船が通過すれば、ターンレートに基づく変針を開始し、又、このターンレートに基づく変針よりも、航路よりのコースずれ量に基づき進路方位を修正する航路キープ制御に切り替えた方が精度良く変針できると判定した時点で、ターンレートに基づく変針から、航路キープ制御に切り替えることが開示されている。

また、特許文献 3 には、所定の位置情報に基づいた航路、並びに、航路上でのエンジン回転数の変化及び舵の向きに関する操船操作を予めコントローラに記録し、記録された航路並びに操船操作に基づいて船舶を自動航行する操船システムが開示されている。

20

また、特許文献 4 には、操船者が自動操舵装置の表示部により、自動操舵に切り替えると、その時点における船舶の船首方位および船舶の位置を自動操舵装置の制御部が取り込み、設定航路および設定方位を算出し、以後は、各時点における船舶の船首方位と船舶の位置を随時取り込み、設定航路と設定方位との方位偏差を計算し、これに基づき舵を制御するための命令舵角を算出する船舶の自動操舵装置が開示されている。

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 0 4 】

【 特許文献 1 】 特開 2 0 1 9 - 1 9 6 1 0 3 号公報

【 特許文献 2 】 特開平 7 - 2 4 2 1 9 9 号公報

【 特許文献 3 】 特開 2 0 1 4 - 1 8 4 8 4 6 号公報

【 特許文献 4 】 特開 2 0 1 1 - 1 6 3 8 4 号公報

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 0 5 】

着棧操船の自動化に関しては最適制御理論、Neural networkとPDコントローラ、進化計算を用いたものなど多くの研究がある。一方で、システム設計の難易度や制御計算のリアルタイム性能、コストや安全性などの種々の課題を解決するには、舵とプロペラで構成される一般的な船舶にも適用可能な、よりシンプルなコントローラの開発が求められている。

40

ここで、特許文献 1 は、自船が航路変更する際に経由する円弧状の旋回航路を算出して間接目標地点との位置関係に基づいて指令舵角を算出する必要があり、計算が複雑化する。

また、特許文献 2 は、現航路から新航路へ航路変更する際の精度を向上させようとするものであり、現航路又は新航路において精度よく計画航路に追従させるものではない。

また、特許文献 3 には、設定された航路に基づいて自動航行する間に、舵角センサ、スロットルセンサ、GPS装置、及びヘディングセンサによって船舶の航行状況を検出し、フィードバック制御を行うことが記載されているが、検出した航行状況を基にどのようにフィードバック制御を行うかについての詳細は何ら記載されていない。

また、特許文献 4 は、船首方位及び自船の位置と設定方位及び設定航路との偏差に基づ

50

いて船舶が設定航路上を航行するように自動的に制御するものであり、計算が複雑化する。

そこで本発明は、大量の計算を必要とすることなく、外乱があっても計画経路からの偏差を一定以下に抑制することができる船舶の自動誘導方法、船舶の自動誘導プログラム、船舶の自動誘導システム、及び船舶を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0006】

請求項1記載に対応した船舶の自動誘導方法においては、航走する船舶の少なくとも操舵を自動的に行う自動操船装置を用いた船舶の自動誘導方法であって、計画経路を取得又は計画経路の計算を行う計画経路生成過程と、船舶の位置及び船首方位を取得する船舶情報取得過程と、位置及び船首方位に基づいて、船舶の進行方向の計画経路の上に所定の条件を満たす目標点を計算する又は目標点の方位を計算するピュアパシュート計算過程と、目標点又は方位と、位置又は船首方位に基づいて船舶の操舵角を計算する自動操船計算過程と、計算した操舵角に基づいて自動操船装置を制御する制御過程とを有することを特徴とする。

10

請求項1に記載の本発明によれば、ピュアパシュート計算に基づく制御（ピュアパシュート制御）と自動操船装置を組合せ、計画経路を追従する自動誘導を行うことで、大量の計算を必要とすることなく制御を行い、外乱があっても計画経路からの偏差を一定以下に抑制することができる。特に、ピュアパシュート制御により計画経路が曲線部を有するような経路の追従が、オートパイロット等の自動操船装置と組み合わせると容易に可能となる。

20

【0007】

請求項2記載の本発明は、船舶情報取得過程において船舶の速度を取得し、ピュアパシュート計算過程及び自動操船計算過程において速度を用いて計算を行うことを特徴とする。

請求項2に記載の本発明によれば、速度に応じて船舶をより精度よく計画経路に追従させることができる。

【0008】

請求項3記載の本発明は、計画経路生成過程において、入力された船舶の到着点の到着位置と到着方位を取得し、船舶情報取得過程で取得した位置、船首方位、及び速度を用いて、到着位置に至り到着方位を確保できる計画経路を計算することを特徴とする。

30

請求項3に記載の本発明によれば、到着方位の向き（角度）で到着位置へ接続する滑らかな曲線を描く計画経路を生成することができる。

【0009】

請求項4記載の本発明は、計画経路生成過程において、海域情報を取得し、航行不能な海域情報を加味して計画経路を計算することを特徴とする。

請求項4に記載の本発明によれば、船舶の自動誘導方法の安全性を向上させ、また、船舶の自動誘導方法を適用可能な海域を広げることができる。

ここで、「航行不能な海域情報」とは、船舶等の移動物体や浮遊物体等の障害物、又は浅瀬等が存在し、航行不能な海域に関する情報である。

40

【0010】

請求項5記載の本発明は、計画経路生成過程において、曲線を成す計画経路を変更するための設定した制御点を調整する制御点調整過程をさらに有し、調整した制御点に基づき計画経路を生成することを特徴とする。

請求項5に記載の本発明によれば、例えば障害物の回避や到着時の進入角度の調整等が反映された計画経路を柔軟に調整して生成することができる。

【0011】

請求項6記載の本発明は、計画経路生成過程において、計画経路を制御のモードを切り替えることを想定した複数の区分経路に分割することを特徴とする。

請求項6に記載の本発明によれば、区分経路に応じた制御のモードが行われることで、

50

特に着積を含む到着点に至る計画経路に対して、区分経路に応じてモードを切り替えて制御を行い、到着点まで船舶を精度よく追従させることができる。

【 0 0 1 2 】

請求項 7 記載の本発明は、自動操船計算過程で船舶の計画経路を航走する速度を計算し、制御過程において、計算した速度に基づいて、自動操船装置のクラッチを含む速度制御手段を制御することを特徴とする。

請求項 7 に記載の本発明によれば、クラッチ等の速度制御手段で速度を調節することで、例えば着積を含む到着点への船舶の誘導を容易にできる。

【 0 0 1 3 】

請求項 8 記載の本発明は、計画経路生成過程において、到着位置において予め設定された船舶の速度がゼロの場合、船舶と到着位置までの距離が予め定められた距離に達した時点で船舶の到着位置への進入角度が予め定められた角度になるような区分経路を含む計画経路を生成すること特徴とする。

請求項 8 に記載の本発明によれば、到着位置までの距離が所定の距離に達した時点で到着位置へ向けた回頭を行わせ、適切な進入角度で到着位置に進入させて到着方位を確保できる区分経路を生成することができる。

【 0 0 1 4 】

請求項 9 記載の本発明は、計画経路生成過程において、到着位置において予め設定された船舶の速度がゼロであり、かつ船舶の進行方向が予め定められた到着位置への進入角度となっている時、船舶と到着位置との距離が予め定められた距離より短い位置に達した時点で船舶の速度をゼロとなるように速度制御を行うための略直線の区分経路を含む計画経路を生成することを特徴とする。

請求項 9 に記載の本発明によれば、速度制御を行い船舶を確実にかつより安全に到着位置まで誘導可能な区分経路を生成することができる。

【 0 0 1 5 】

請求項 10 記載の本発明は、船舶情報取得過程で船舶の周辺の気象海象情報を取得し、自動操船計算過程において気象海象情報に基づいた船舶に対する外力を加味して操舵角及び速度を補正することを特徴とする。

請求項 10 に記載の本発明によれば、外力を加味して補正した操舵角及び速度により船舶をより精度よく計画経路に追従させることができる。

【 0 0 1 6 】

請求項 11 記載の本発明は、気象海象情報として取得した風向及び風速による船舶に対する外力を求め、外力による船体運動を予測し、外力による船体運動を打ち消すような操舵角又は速度を導出して風による外乱を補償するように自動操船装置を制御することを特徴とする。

請求項 11 に記載の本発明によれば、強風時においても計画経路からの偏差を一定以下に抑制することができる。

【 0 0 1 7 】

請求項 12 記載に対応した船舶の自動誘導プログラムにおいては、航走する船舶の少なくとも操舵の制御を自動的に行う自動操船装置を用いた船舶の自動誘導プログラムであって、コンピュータに、船舶の自動誘導方法における、条件の入力に従った計画経路生成過程と、船舶情報取得過程と、ピュアパシュート計算過程と、自動操船計算過程と、制御過程を実行させることを特徴とする。

請求項 12 に記載の本発明によれば、ピュアパシュート計算に基づく制御（ピュアパシュート制御）と自動操船装置を組合せ、計画経路を追従する自動誘導を行うことで、大量の計算を行うことなく制御を行い、外乱があっても計画経路からの偏差を一定以下に抑制するプログラムを提供することができる。

【 0 0 1 8 】

請求項 13 記載に対応した船舶の自動誘導システムにおいては、航走する船舶の少なくとも操舵の制御を自動的に行う自動操船装置を用いた船舶の自動誘導システムであって、

10

20

30

40

50

計画経路を取得又は計画経路の計算を行う計画経路生成手段と、船舶の位置及び船首方位を取得する船舶情報取得手段と、船舶の位置及び船首方位に基づいて、船舶の進行方向の計画経路の上に所定の条件を満たす目標点を計算する又は目標点の方位を計算するピュアパシユート計算手段と、目標点又は方位と、位置又は船首方位に基づいて船舶の操舵角を計算する自動操船計算手段と、船舶の操舵角に基づいて自動操船装置を制御する制御手段とを備えたことを特徴とする。

請求項 13 に記載の本発明によれば、ピュアパシユート計算に基づく制御（ピュアパシユート制御）と自動操船装置を組合せ、計画経路を追従する自動誘導を行うことで、大量の計算を必要とすることなく制御を行い、外乱があっても計画経路からの偏差を一定以下に抑制することができる。

【 0 0 1 9 】

請求項 14 に記載の本発明は、船舶情報取得手段において船舶の速度を取得し、ピュアパシユート計算手段及び自動操船計算手段において速度を用いて計算を行うことを特徴とする。

請求項 14 に記載の本発明によれば、速度に応じて船舶をより精度よく計画経路に追従させることができる。

【 0 0 2 0 】

請求項 15 に記載の本発明は、計画経路生成手段において、入力された船舶の到着点の到着位置と到着方位を取得し、船舶情報取得手段で取得した位置、船首方位、及び速度を用いて、到着位置に至り到着方位を確保できる計画経路を計算することを特徴とする。

請求項 15 に記載の本発明によれば、到着方位の向き（角度）で到着位置へ接続する滑らかな曲線を描く計画経路を生成することができる。

【 0 0 2 1 】

請求項 16 に記載の本発明は、計画経路生成手段において、海域情報を取得し、航行不能な海域情報を加味して計画経路を計算することを特徴とする。

請求項 16 に記載の本発明によれば、船舶の自動誘導システムの安全性を向上させ、また、船舶の自動誘導システムを適用可能な海域を広げることができる。

【 0 0 2 2 】

請求項 17 に記載の本発明は、計画経路生成手段において、計画経路の設定した制御点を乗組員が確認し変更を行う制御点調整部、又は船舶情報取得手段で得られた船舶情報に基づいて制御点の調整を自動的に行う自動制御点調整部を有し、調整した制御点に基づき計画経路を生成することを特徴とする。

請求項 17 に記載の本発明によれば、例えば障害物の回避や到着時の進入角度の調整等が反映された計画経路を柔軟に調整して、人的に又は自動的に生成することができる。

【 0 0 2 3 】

請求項 18 に記載の本発明は、計画経路生成手段において、計画経路を制御のモードを切り替える複数の区分経路に分割することを特徴とする。

請求項 18 に記載の本発明によれば、区分経路に応じた制御のモードが行われることで、特に着積を含む到着点に至る計画経路に対して、区分経路に応じてモードを切り替えて制御を行い、到着点まで船舶を精度よく追従させることができる。

【 0 0 2 4 】

請求項 19 に記載の本発明は、自動操船計算手段で船舶の計画経路を航走する速度を計算し、制御手段において、計算した速度を得るように、自動操船装置のクラッチを含む速度制御手段を制御することを特徴とする。

請求項 19 に記載の本発明によれば、クラッチ等の速度制御手段で速度を調節することで、例えば着積を含む到着点への船舶の誘導を容易にできる。

【 0 0 2 5 】

請求項 20 に記載の本発明は、計画経路生成手段において、到着位置において予め設定された船舶の速度がゼロの場合、船舶と到着位置までの距離が予め定められた距離に達した時点で船舶の到着位置への進入角度が予め定められた角度になるような区分経路を含む計

画経路を生成することを特徴とする。

請求項 20 に記載の本発明によれば、到着位置までの距離が所定の距離に達した時点で到着位置へ向けた回頭を行わせ、適切な進入角度で到着位置に進入させて到着方位を確保できる区分経路を生成することができる。

【0026】

請求項 21 に記載の本発明は、計画経路生成手段において、到着位置において予め設定された船舶の速度がゼロであり、かつ船舶の進行方向が予め定められた到着位置への進入角度となっている時、船舶と到着位置との距離が予め定められた距離より短い位置に達した時点で船舶の速度をゼロとなるように速度制御を行うための略直線の区分経路を含む計画経路を生成することを特徴とする。

10

請求項 21 に記載の本発明によれば、速度制御を行い船舶を確実にかつより安全に到着位置まで誘導可能な区分経路を生成することができる。

【0027】

請求項 22 に記載の本発明は、船舶情報取得手段で船舶の周辺の気象海象情報を取得し、自動操船計算手段において気象海象情報に基づいた船舶に対する外力を加味して操舵角及び速度を補正することを特徴とする。

請求項 22 に記載の本発明によれば、外力を加味して補正した操舵角及び速度により船舶をより精度よく計画経路に追従させることができる。

【0028】

請求項 23 に記載の本発明は、気象海象情報として取得した風向及び風速による船舶に対する外力を求め、外力による船体運動を予測し、外力による船体運動を打ち消すような操舵角又は速度を導出して風による外乱を補償するように自動操船装置を制御することを特徴とする。

20

請求項 23 に記載の本発明によれば、強風時においても計画経路からの偏差を一定以下に抑制することができる。

【0029】

請求項 24 に記載の本発明は、計画経路、船舶の位置、船首方位、目標点、又は目標点の方位、のうち少なくともいずれか 1 つを表示する表示手段を備えたことを特徴とする。

請求項 24 に記載の本発明によれば、乗組員が計画経路の確認や、自動誘導システムの作動状況の監視等を行うことができる。

30

【0030】

請求項 25 に記載に対応した船舶においては、船舶の自動誘導システムを備えたことを特徴とする。

請求項 25 に記載の本発明によれば、ピュアパシュート制御と自動操船装置を組合せた、外乱があっても精度よく計画経路を追従する自動誘導システムを備えた船舶を提供することができる。

【発明の効果】

【0031】

本発明の船舶の自動誘導方法によれば、ピュアパシュート計算に基づく制御（ピュアパシュート制御）と自動操船装置を組合せ、計画経路を追従する自動誘導を行うことで、大量の計算を必要とすることなく制御を行い、外乱があっても計画経路からの偏差を一定以下に抑制することができる。特に、ピュアパシュート制御により計画経路が曲線部を有するような経路の追従が、オートパイロット等の自動操船装置と組み合わせると容易に可能となる。

40

【0032】

また、船舶情報取得過程において船舶の速度を取得し、ピュアパシュート計算過程及び自動操船計算過程において速度を用いて計算を行う場合は、速度に応じて船舶をより精度よく計画経路に追従させることができる。

【0033】

また、計画経路生成過程において、入力された船舶の到着点の到着位置と到着方位を取

50

得し、船舶情報取得過程で取得した位置、船首方位、及び速度を用いて、到着位置に至り到着方位を確保できる計画経路を計算する場合は、到着方位の向き（角度）で到着位置へ接続する滑らかな曲線を描く計画経路を生成することができる。

【 0 0 3 4 】

また、計画経路生成過程において、海域情報を取得し、航行不能な海域情報を加味して計画経路を計算する場合は、船舶の自動誘導方法の安全性を向上させ、また、船舶の自動誘導方法を適用可能な海域を広げることができる。

【 0 0 3 5 】

また、計画経路生成過程において、曲線を成す計画経路を変更するための設定した制御点を調整する制御点調整過程をさらに有し、調整した制御点に基づき計画経路を生成する場合は、例えば障害物の回避や到着時の進入角度の調整等が反映された計画経路を柔軟に調整して生成することができる。

10

【 0 0 3 6 】

また、計画経路生成過程において、計画経路を制御のモードを切り替えることを想定した複数の区分経路に分割する場合は、区分経路に応じた制御のモードが行われることで、特に着栈を含む到着点に至る計画経路に対して、区分経路に応じてモードを切り替えて制御を行い、到着点まで船舶を精度よく追従させることができる。

【 0 0 3 7 】

また、自動操船計算過程で船舶の計画経路を航走する速度を計算し、制御過程において、計算した速度に基づいて、自動操船装置のクラッチを含む速度制御手段を制御する場合は、クラッチ等の速度制御手段で速度を調節することで、例えば着栈を含む到着点への船舶の誘導を容易にできる。

20

【 0 0 3 8 】

また、計画経路生成過程において、到着位置において予め設定された船舶の速度がゼロの場合、船舶と到着位置までの距離が予め定められた距離に達した時点で船舶の到着位置への進入角度が予め定められた角度になるような区分経路を含む計画経路を生成する場合は、到着位置までの距離が所定の距離に達した時点で到着位置へ向けた回頭を行わせ、適切な進入角度で到着位置に進入させて到着方位を確保できる区分経路を生成することができる。

【 0 0 3 9 】

30

また、計画経路生成過程において、到着位置において予め設定された船舶の速度がゼロであり、かつ船舶の進行方向が予め定められた到着位置への進入角度となっている時、船舶と到着位置との距離が予め定められた距離より短い位置に達した時点で船舶の速度をゼロとなるように速度制御を行うための略直線の区分経路を含む計画経路を生成する場合は、速度制御を行い船舶を確実にかつより安全に到着位置まで誘導可能な区分経路を生成することができる。

【 0 0 4 0 】

また、船舶情報取得過程で船舶の周辺の気象海象情報を取得し、自動操船計算過程において気象海象情報に基づいた船舶に対する外力を加味して操舵角及び速度を補正する場合は、外力を加味して補正した操舵角及び速度により船舶をより精度よく計画経路に追従させることができる。

40

【 0 0 4 1 】

また、気象海象情報として取得した風向及び風速による船舶に対する外力を求め、外力による船体運動を予測し、外力による船体運動を打ち消すような操舵角又は速度を導出して風による外乱を補償するように自動操船装置を制御する場合は、強風時においても計画経路からの偏差を一定以下に抑制することができる。

【 0 0 4 2 】

また、本発明の船舶の自動誘導プログラムによれば、ピュアパシュート計算に基づく制御（ピュアパシュート制御）と自動操船装置を組合せ、計画経路を追従する自動誘導を行うことで、大量の計算を行うことなく制御を行い、外乱があっても計画経路からの偏差を

50

一定以下に抑制するプログラムを提供することができる。

【0043】

また、本発明の船舶の自動誘導システムによれば、ピュアパシユート計算に基づく制御(ピュアパシユート制御)と自動操船装置を組合せ、計画経路を追従する自動誘導を行うことで、大量の計算を必要とすることなく制御を行い、外乱があっても計画経路からの偏差を一定以下に抑制することができる。

【0044】

また、船舶情報取得手段において船舶の速度を取得し、ピュアパシユート計算手段及び自動操船計算手段において速度を用いて計算を行う場合は、速度に応じて船舶をより精度よく計画経路に追従させることができる。

【0045】

また、計画経路生成手段において、入力された船舶の到着点の到着位置と到着方位を取得し、船舶情報取得手段で取得した位置、船首方位、及び速度を用いて、到着位置に至り到着方位を確保できる計画経路を計算する場合は、到着方位の向き(角度)で到着位置へ接続する滑らかな曲線を描く計画経路を生成することができる。

【0046】

また、計画経路生成手段において、海域情報を取得し、航行不能な海域情報を加味して計画経路を計算する場合は、船舶の自動誘導システムの安全性を向上させ、また、船舶の自動誘導システムを適用可能な海域を広げることができる。

【0047】

また、計画経路生成手段において、曲線を成す計画経路を変更するための設定した制御点を乗組員が確認し変更を行う制御点調整部、又は船舶情報取得手段で得られた船舶情報に基づいて制御点の調整を自動的に行う自動制御点調整部を有し、調整した制御点に基づき計画経路を生成する場合は、例えば障害物の回避や到着時の進入角度の調整等が反映された計画経路を柔軟に調整して、人的に又は自動的に生成することができる。

【0048】

また、計画経路生成手段において、計画経路を制御のモードを切り替える複数の区分経路に分割する場合は、区分経路に応じた制御のモードが行われることで、特に着栈を含む到着点に至る計画経路に対して、区分経路に応じてモードを切り替えて制御を行い、到着点まで船舶を精度よく追従させることができる。

【0049】

また、自動操船計算手段で船舶の計画経路を航走する速度を計算し、制御手段において、計算した速度を得るように、自動操船装置のクラッチを含む速度制御手段を制御する場合は、クラッチ等の速度制御手段で速度を調節することで、例えば着栈を含む到着点への船舶の誘導を容易にできる。

【0050】

また、計画経路生成手段において、到着位置において予め設定された船舶の速度がゼロの場合、船舶と到着位置までの距離が予め定められた距離に達した時点で船舶の到着位置への進入角度が予め定められた角度になるような区分経路を含む計画経路を生成する場合は、到着位置までの距離が所定の距離に達した時点で到着位置へ向けた回頭を行わせ、適切な進入角度で到着位置に進入させて到着方位を確保できる区分経路を生成することができる。

【0051】

また、計画経路生成手段において、到着位置において予め設定された船舶の速度がゼロであり、かつ船舶の進行方向が予め定められた到着位置への進入角度となっている時、船舶と到着位置との距離が予め定められた距離より短い位置に達した時点で船舶の速度をゼロとなるように速度制御を行うための略直線の区分経路を含む計画経路を生成する場合は、速度制御を行い船舶を確実にかつより安全に到着位置まで誘導可能な区分経路を生成することができる。

【0052】

10

20

30

40

50

また、船舶情報取得手段で船舶の周辺の気象海象情報を取得し、自動操船計算手段において気象海象情報に基づいた船舶に対する外力を加味して操舵角及び速度を補正する場合は、外力を加味して補正した操舵角及び速度により船舶をより精度よく計画経路に追従させることができる。

【 0 0 5 3 】

また、気象海象情報として取得した風向及び風速による船舶に対する外力を求め、外力による船体運動を予測し、外力による船体運動を打ち消すような操舵角又は速度を導出して風による外乱を補償するように自動操船装置を制御する場合は、強風時においても計画経路からの偏差を一定以下に抑制することができる。

【 0 0 5 4 】

また、計画経路、船舶の位置、船首方位、目標点、又は目標点の方位、のうち少なくともいずれか1つを表示する表示手段を備えた場合は、乗組員が計画経路の確認や、自動誘導システムの作動状況の監視等を行うことができる。

【 0 0 5 5 】

また、本発明の船舶によれば、ピュアパシユート制御と自動操船装置を組合せた、外乱があっても精度よく計画経路を追従する自動誘導システムを備えた船舶を提供することができる。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 5 6 】

【 図 1 】 本発明の第一の実施形態による船舶の自動誘導システムの概要図

【 図 2 】 同船舶の自動誘導システムを用いた自動誘導方法のフローチャート

【 図 3 】 同ピュアパシユートのアルゴリズムを示す図

【 図 4 】 同計画経路に対する追従性能の概念図

【 図 5 】 同自動操船装置による自動操舵とピュアパシユートを組み合わせた制御を行った場合の追従性能を航跡トレースにより評価した図

【 図 6 】 同自動誘導システムを用いた自動着岸操船のフローチャート

【 図 7 】 同生成された着岸経路と制御モードの例を示す図

【 図 8 】 同着岸操船のための座標系を示す図

【 図 9 】 同ベジェ曲線による着岸経路の概略図

【 図 1 0 】 同自動着岸操船における制御過程の詳細を示すフローチャート

【 図 1 1 】 同船体運動の座標系を示す図

【 図 1 2 】 本発明の第二の実施形態による Hybrid - state A* の探索方法と古典的な A* アルゴリズムとの比較図

【 図 1 3 】 本発明の第三の実施形態におけるピュアパシユートアルゴリズムによる経路追従制御を示す図

【 図 1 4 】 同風による経路追従制御の乱れを示す図

【 図 1 5 】 同解析結果を示す図

【 図 1 6 】 同実施例 1 における実験船の風圧力係数を示す図

【 図 1 7 】 本発明の実施例 1 による船体制御システムの構成図

【 図 1 8 】 同旋回試験の計測結果と調整 / シミュレーション結果の比較を示す図

【 図 1 9 】 同仮想岸橋での自動着岸操船の実験結果を示す図

【 図 2 0 】 同仮想岸橋での自動着岸操船の実験において船舶情報取得手段が取得した各計測値を示す図

【 図 2 1 】 同実岸橋での自動着岸操船の実験結果を示す図

【 図 2 2 】 同実岸橋での自動着岸操船の実験において船舶情報取得手段が取得した各計測値を示す図

【 図 2 3 】 同強風下における仮想岸橋での自動着岸操船の実験結果を示す図

【 図 2 4 】 同強風下における仮想岸橋での自動着岸操船の実験において船舶情報取得手段が取得した各計測値を示す図

【 図 2 5 】 本発明の実施例 2 による Hybrid - state A* を用いて生成した着岸

10

20

30

40

50

までの計画経路を示す図

【図26】同LiDARにより計測された点群を用いて着岸経路を計算した例を示す図

【図27】同LiDARで計測した位置から船体位置を意図的に変えて経路を計算した例を示す図

【図28】本発明の実施例3によるフィードバック制御ありのピュアパシュートとHCSによる着岸制御の実船試験結果を示す図

【図29】同図28に示す状態の実測値を示す図

【図30】同強風下でのフィードバック制御ありのピュアパシュートとHCSによる着岸制御の実船試験結果を示す図

【図31】同図30に示す状態の実測値を示す図

10

【発明を実施するための形態】

【0057】

以下に、本発明の第一の実施形態による船舶の自動誘導方法、船舶の自動誘導プログラム、船舶の自動誘導システム、及び船舶について説明する。

【0058】

図1は船舶の自動誘導システムの概要図である。

船舶の自動誘導システムは、計画経路を取得又は計画経路の計算を行う計画経路生成手段10と、船舶の位置及び船首方位を取得する船舶情報取得手段20と、船舶の位置及び船首方位に基づいて、船舶の進行方向の計画経路の上に所定の条件を満たす目標点を計算する又は目標点の方位を計算するピュアパシュート計算手段30と、目標点又は目標点の方位に基づいて船舶の操舵角を計算する自動操船計算手段40と、船舶の操舵角に基づいて自動操船装置60を制御する制御手段50と、自動操船装置60のクラッチ等の速度制御手段61と、画面等の表示手段70を備える。

20

なお、自動操船装置60には、操舵を行う舵や速度を制御するクラッチ等のアクチュエータを含むこと、舵やクラッチ等の制御機能部だけを含むこと、また舵やクラッチ等の制御を行うための指令値を出す機能だけを含むこと、及びこれらを舵やクラッチ等で組み合わせて用いることの何れも可能である。

【0059】

図2は船舶の自動誘導システムを用いた自動誘導方法のフローチャート、図3はピュアパシュートのアルゴリズムを示す図である。

30

まず、計画経路生成手段10は、船舶の計画経路を生成する(計画経路生成過程S1)。生成された計画経路は、ピュアパシュート計算手段30及び自動操船計算手段40に入力される。計画経路生成手段10は、自動的に計画経路を生成することができる他、予め設定された計画経路の入力を受け付けることにより生成することができる。なお、計画経路の生成の詳細については後述する。

計画経路生成過程S1の後、制御手段50は、取得した計画経路に基づいて操船を開始する(操船開始過程S2)。

船舶情報取得手段20は、例えば位置センサーや方位角センサー等であり、船舶の位置及び船首方位を取得する(船舶情報取得過程S3)。

【0060】

40

ピュアパシュート計算手段30は、船舶の位置及び船首方位に基づいて、船舶の進行方向の計画経路の上に所定の条件を満たす目標点を計算するか、又は目標点の方位を計算する(ピュアパシュート計算過程S4)。

ピュアパシュート(Pure pursuit)とは、経路追従制御アルゴリズムとして、ロボティクスや車の自動運転などの分野で広く使われる経路追従アルゴリズムである。ピュアパシュートは、図3のように予め設定された有向経路に対して、船舶に搭載されたGNSSセンサー等の位置センサーの設置位置から一定距離前方の経路上の点を目標点としてこれに到達するように旋回制御を行う。この目標点までの距離を前方注視距離(Look ahead distance)と呼ぶ。

目標点(前方注視距離)を決める際は、経路追従時に想定される経路曲線において、最

50

大の曲率半径を求め、この曲率半径を持つ円周経路を用意して、円周経路を追従できるように前方注視距離を設定する。なお、実船試験を行い追従できるか否かを確かめてもよく、また、K T等の操縦性指数が分かっている場合は簡易的なシミュレーションから決定することもできる。

ピュアパシュート計算過程S 4においてピュアパシュート計算手段3 0は、計画経路生成手段1 0が計画経路生成過程S 1で生成した計画経路に基づき、進行方向の計画経路の上に、例えば所定の距離で目標点を計算し、又は目標点の方位を計算し、例えば計算した方位を自動操船計算手段4 0に送出する。またピュアパシュート計算手段3 0は、航行に伴って次々と目標点の方位を更新する(設定値を更新する)。

【0 0 6 1】

自動操船計算手段4 0は、目標点又は目標点の方位と、船舶の位置又は船首方位に基づいて船舶の操舵角を計算する(自動操船計算過程S 5)。

制御手段5 0は、自動操船計算手段4 0が算出した船舶の操舵角に基づいて、操舵の制御を自動的に行う自動操船装置6 0を制御する(制御過程S 6)。これにより、計画経路に沿った航跡が得られる。

自動操船装置6 0は、ジャイロ等と連動し、方位等の設定値を設定するとP I D制御や適応制御により、設定された方位等が得られるように操舵装置を制御する。

制御手段5 0は、制御過程S 6の後、制御終了信号を受け付けたか否かを判定する(制御終了判定過程S 7)。制御終了信号は、例えば目的地に所定距離まで近づいた場合等に自動又は乗組員等により手動で入力される。

制御手段5 0は、制御終了判定過程S 7で制御終了信号を受け付けたと判定した場合は、自動操船装置6 0の制御を終了する。一方、制御終了判定過程S 7で制御終了信号を受け付けていないと判定した場合は、船舶情報取得過程S 3に戻り制御を継続する。

【0 0 6 2】

図4は計画経路に対する追従性能の概念図であり、図4(a)は自動操船装置による自動操舵のみの場合の追従性能を示し、図4(b)は自動操船装置による自動操舵とピュアパシュート(単純追跡)を組み合わせた制御を行った場合の追従性能を示している。また、図5は自動操船装置による自動操舵とピュアパシュートを組み合わせた制御を行った場合の追従性能を航跡トレースにより評価した図であり、図5(a)は自動操船装置による自動操舵とピュアパシュートを組み合わせた制御により計画経路に追従させた結果を示し、図5(b)は舵角一定(+15°)で計画経路に追従させた結果を示している。

図4(a)に示すように、方位ジャイロを用いた既存の自動操舵(オートパイロット)は船舶の船首方位のみを制御するため、風や潮流の影響を受けると経路から逸脱する。

一方、図4(b)及び図5(a)に示すように、ピュアパシュート計算に基づく制御(ピュアパシュート制御)と自動操舵を組合せ、計画経路を追従する自動誘導を行うことで、モデル予測制御のように大量の計算を必要とすることなく制御を行い、外乱があっても計画経路からの偏差を一定以下に抑制し、経路に沿った自動制御を行うことができる。特に、ピュアパシュート制御により計画経路が曲線部を有するような経路の追従が、オートパイロット等の自動操船装置6 0と組み合わせて容易に可能となる。

このように、ピュアパシュートと自動操舵とを組合せた制御は、自動操舵のみの場合と比べて外乱に対して補償する制御が入っているため、経路からの逸脱を一定の量以下に抑制できる。また、経路上の目標点に対する操舵量を計算するのみのため計算負荷が軽い。また、制御に必要なパラメータは本質的に前方注視距離の一つだけで済む。また、制御の安定性は、経路の曲率が小さく前進速度がある程度あれば、自動操舵の安定性によってシステムの安定性を議論できる。すなわち、安定的な制御のパラメータを設計する上では、古典的な安定性解析を用いることができる上、基本的な安定性は自動操舵の制御安定性を根拠に保証できる。

【0 0 6 3】

次に、船舶を到着点に誘導する自動誘導方法について説明する。なお、本実施形態では到着点を棧橋とする。

10

20

30

40

50

図 6 は自動誘導システムを用いた自動着棧操船のフローチャートである。

自動着棧制御が開始されると、船舶情報取得手段 20 は、船舶の位置（緯度経度）、船首方位、及び船舶の速度を取得する（第一の船舶情報取得過程 S 11）。

第一の船舶情報取得過程 S 11 の後、着棧位置座標と着棧時方位角を乗組員等が自動誘導システムに入力する（着棧情報入力過程 S 12）。

着棧情報入力過程 S 12 の後、制御手段 50 は操船を開始する（操船開始過程 S 13）。

【0064】

操船開始過程 S 13 の後、計画経路生成手段 10 は、入力された船舶の到着点の到着位置（着棧位置座標）と到着方位（着棧時方位角）を取得し、第一の船舶情報取得過程 S 11 で取得した船舶の位置、船首方位、及び速度を用いて、計画経路として到着位置と到着方位を考慮した到着点へ接続する曲線を計算することで、到着位置に至り船舶の到着方位を確保できる計画経路を生成する（計画経路生成過程 S 14）。これにより、到着方位の向き（角度）で到着位置へ接続する滑らかな曲線を描く計画経路（着棧経路）を生成することができる。

ここで、図 7 は生成された着棧経路と制御モードの例を示す図、図 8 は着棧操船のための座標系を示す図である。

着棧に至るまでの計画経路において制御手段 50 による制御のモードを切り替えることを想定し、計画経路生成手段 10 は、計画経路を複数の区分経路に分割する。

本実施形態において計画経路生成手段 10 は、図 7 に示すように、破線で示される着棧経路を、経路追従モードで制御される第一の区分経路 1A、ニュートラル航行モードで制御される第二の区分経路 1B、回頭モードで制御される第三の区分経路 1C、停止モードで制御される第四の区分経路 1D の四つの区分経路に分ける。制御手段 50 は、それぞれの区分経路で制御モードを切り替える。この切替は、例えば実際に操船者が着棧操船する際の手順をベースとする。さらに本実施形態では、主機への過度な負荷を減らすため、最後の停止モード以外でプロペラ逆転による減速を行わず、ニュートラル状態で減速する。このため、制御モードの切り替え位置は、船毎に各区分で十分に減速するのに必要な航行距離を考慮し、減速に必要な距離を確保できるように、例えば着棧位置から経路に沿って 10, 70, 100 [m] の位置に配置する。

また、位置情報の取り扱いを容易にするため、船舶情報取得手段 20 から得た緯度経度の情報は、着棧位置を原点 O_{berth} とする、長さの単位をメートルに変換した X - Y 平面の座標系で扱う。このとき、X 軸は北を正に、Y 軸は東を正に取る。さらに、棧橋 2 との位置関係を明確にするときは、X - Y 座標系を棧橋 2 の向きに合わせて回転させた $x_{berth} - y_{berth}$ 座標系を用いる（原点は同じく O_{berth} ）。図 8 にはこの二つの座標系の関係を示している。図 8 において θ_{berth} は棧橋 2 の方位角に対応する。

【0065】

図 9 はベジェ曲線による着棧経路の概略図である。

実際の操船例等から、左右舷付の着棧経路としては、操船開始時の船舶の位置から船首の方向へ伸び、棧橋 2 に平行な角度で着棧位置へと接続する滑らかな曲線であればよいと考えられる。この形状は 3 次のベジェ (Bezier) 曲線で表しうる。一般に N - 1 次ベジェ曲線は N 個の制御点 $B_0 \cdots B_{N-1}$ から定義される N - 1 次曲線であり t をパラメータとして下式 (1)、(2) のように表される。

【数 1】

$$Bezier(t; N) = \sum_{i=0}^{N-1} B_i J_{N-1,i}(t) \cdots (1)$$

10

20

30

40

【数 2】

$$J_{n,i}(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i} \quad \dots (2)$$

ただし $0 < t < 1$ 、 $J_{n,i}(t)$ は B e r n s t e i n 基底関数である。

N 次ベジェ曲線は経路形状を t の N 次関数として表すことができるため、3 次のベジェ曲線は t の高々 3 次式として表現できる。図 9 において、制御点 B_1 は自動操船開始時の船体位置、制御点 B_2 は制御点 B_1 から船首方位角 θ の方向に $0.6 |y_{berth}|$ [m] の距離にある点、制御点 B_3 は制御点 B_4 から $\theta_{berth} + 180$ [deg] の方向に 80 [m] の距離にある点、制御点 B_4 は着棧目標位置である。着棧目標位置は、係船用のロープが受け渡しできる距離と安全面を考慮して、例えば $(x_{berth}, y_{berth}) = (5, 0)$ [m] に設定する。この設計は、制御点 B_1 が棧橋 2 との距離に応じて伸縮するため、制御開始時の船体位置に関わらず制御点 B_3 と制御点 B_4 の距離によって棧橋 2 へのアプローチ時の角度を設定できる。他の船舶に適用する際には、必要に応じて制御点 B_3 を設定する際の距離を変えることでより浅い角度からの着棧経路を設定することができる。

なお、ベジェ曲線を用いることで最も一般的な着棧経路を生成しやすくなるが、B スプライン曲線やクロソイド曲線等、他の曲線を用いて着棧経路を生成することもできる。また、制御点を増やして、より高次のベジェ曲線を用いることもできる。また、着棧経路（計画経路）は、ベジェ曲線を用いた経路計画アルゴリズムに代えて、後述のように H y b r i d - s t a t e A * アルゴリズムを用いて生成することもできる。

【0066】

到着点が棧橋 2 の場合、到着位置における船舶の速度はゼロとして予め設定される。

計画経路生成手段 10 は、計画経路生成過程 S 14 において、船舶と到着位置までの距離が予め定められた距離に達した時点で船舶の到着位置への進入角度が予め定められた角度になるような区分経路を含む計画経路を生成する。これにより、到着位置までの距離が所定の距離に達した時点で到着位置へ向けた回頭を行わせ、適切な進入角度で到着位置に進入させて到着方位を確保できる区分経路を生成することができる。本実施形態では、回頭モードで制御される第三の区分経路 1C が該当する。

また、計画経路生成手段 10 は、到着位置において予め設定された船舶の速度がゼロであり、かつ船舶の進行方向が予め定められた到着位置への進入角度となっている時、船舶と到着位置との距離が予め定められた距離より短い位置に達した時点で船舶の速度をゼロとなるように速度制御を行うための略直線の区分経路を含む計画経路を生成する。これにより、速度制御を行い船舶を確実にかつより安全に到着位置まで誘導可能な区分経路を生成することができる。本実施形態では、停止モードで制御される第四の区分経路 1D が該当する。なお、着棧の場合における「予め定められた距離」とは、例えば係船用のロープの受け渡しができる距離である。また、「予め定められた到着位置への進入角度」は、ある程度の幅を持ったものであってよい。

【0067】

なお、計画経路生成手段 10 には、計画経路の設定した制御点を乗組員が確認し変更を行う制御点調整部、又は船舶情報取得手段 20 で得られた船舶情報に基づいて制御点の調整を自動的に行う自動制御点調整部の少なくとも一方を備えることもできる。この場合は、計画経路生成過程 S 14 において、曲線を成す計画経路を変更するための設定した制御点 $B_1 \sim B_4$ を調整する制御点調整過程をさらに有し、調整した制御点に基づき計画経路を生成する。

これにより、例えば他船や浅瀬等の障害物の回避や到着時の進入角度の調整等が反映された計画経路を、人的に又は自動的に柔軟に調整して生成することができる。

乗組員が変更を行う場合は、タッチパネルやトラックボール等で画面を見ながら制御点調整部に対する指示を与え制御点を調整する。

自動制御点調整部が変更を行う場合は、海図情報や L i D A R (light detection and

ranging)等のセンサー情報を基に自動で計画経路を調整する。例えば、海図やセンサー情報から障害物の二次元的な情報が取得され、障害物に計画経路が被っている場合は、制御点 $B_1 - B_2$ 間又は $B_3 - B_4$ 間の長さを 0.1 m 毎に変更していき、計画経路が障害物に被らない経路を求め、計算は総当たりで行っても良く、動的計画法を用いて効率よく解を求めても良い。なお、解が求まらない場合は、表示又は音声等による警告を発生し、乗組員に制御点調整部による変更を促す等の対応を行う。

制御点は、最初の計画経路生成時点で人的又は自動的に調整しても良く、また一旦生成された計画経路を確認後、制御点を修正する調整を行い、再度生成させても良い。

【0068】

図6に戻り、計画経路生成過程 S14 の後、船舶情報取得手段 20 は、船舶の位置、船首方位、及び速度を取得する(第二の船舶情報取得過程 S15)。

制御手段 50 は、第二の船舶情報取得過程 S15 で取得した船舶の位置、船首方位、及び船速を基に自動操船装置 60 を制御する(制御過程 S16)。

制御過程 S16 の後、制御手段 50 は、船舶が着棧位置に到達したか否かを判定する(着棧判定過程 S17)。

制御手段 50 は、着棧判定過程 S17 において「NO」、すなわち着棧していないと判定した場合は、第二の船舶情報取得過程 S15 に戻り制御を継続する。一方、着棧判定過程 S17 において「YES」、すなわち着棧したと判定した場合は、自動着棧制御を終了する。

【0069】

図10は自動着棧操船における制御過程 S16 の詳細を示すフローチャート、図11は船体運動の座標系を示す図である。図11において、空間固定座標系 $o_0 - x_0 y_0 z_0$ は、 x_0 を北、 y_0 を東向きに取る。また、船体固定座標系の原点 o を船体のミッドシップ位置に取る。

ピュアパシュート計算手段 30 は、船舶情報取得手段 20 が第二の船舶情報取得過程 S15 で取得した船舶の位置、船首方位、及び速度に基づいて、船舶の進行方向の計画経路の上に所定の条件を満たす目標点を計算し、又は目標点の方位を計算する(ピュアパシュート計算過程 S21)。

ピュアパシュートを船舶に適用する場合、目標方位角を操舵により追従する必要があるため、目標方位角に対するPD制御のHCS(Heading Control System)を組み合わせる。このとき、船舶(自船)から目標点までの相対方位角をとすると、船首方位角に対するPD制御のHCSによる指令舵角を最大 $\pm 45^\circ$ として、下式(3)のように計算できる。

【数3】

$$\delta^* = clip(K_P[\alpha - \psi]_{-180^\circ, 180^\circ} - K_D r, -45^\circ, 45^\circ) \quad \dots (3)$$

ここで、 K_P と K_D はそれぞれHCSの比例ゲインと微分ゲインを表し、 $[x]_{-180^\circ, 180^\circ} = (x + 180^\circ \bmod 360^\circ) - 180^\circ$ は角度 x [deg] を $[180^\circ, -180^\circ]$ の範囲に収める演算を表す。

比例ゲインと微分ゲインは、例えばシミュレーション及び実船計測の結果から $K_P = 3.0$ 、 $K_D = 1.0$ とする。なお、通常速力に対する K_P の設定は 2.0 程度である。HCSのゲイン設計では、ピュアパシュートが経路の先を見て制御することから微分制御的な働きをするため、通常の保針制御が不安定にならない範囲で経路上の最も曲率の大きい区間の追従性を考慮して K_P を大きい値に設定することにより、外乱に対するロバスト性と経路追従性能を改善することができる。

ピュアパシュートの唯一のパラメータである前方注視距離は、船舶の船舶情報取得手段 20 のうち位置センサーの設置位置からみた経路上の前方にある目標点との距離として定義される。ただし外乱の影響で、船体位置と経路上の最接近距離が設定した前方注視距離以上になった場合は、経路上の最接近点を目標点とする。前方注視距離は、図3に示すような一定曲率半径を持つ経路を追従する制御のシミュレーション及び実船実験による結果

10

20

30

40

50

に基づき、例えば垂線間長 L_{pp} に対して 1.6 倍に設定する。

一方、回頭モードで制御される第三の区分経路 1C 以降は、船速が低く、目標方位への追従が難しくなる。そのため、ピュアパシュート計算手段 30 では、ピュアパシュート計算された目標点の方位に補正角 $\alpha_{add} = -5$ [deg] を加算して HCS の計算を行い、目標とする着棧位置における方位を調整する。

【0070】

ピュアパシュート計算過程 S21 の後、自動操船計算手段 40 は、目標点又は目標点の方位と、船舶の位置又は船首方位と、速度に基づいて船舶の操舵角を計算する（自動操船計算過程 S22）。

このように、第二の船舶情報取得過程 S15 において船舶の速度を取得し、ピュアパシュート計算過程 S21 及び自動操船計算過程 S22 において速度を用いて計算を行うことで、速度に応じて船舶を精度よく計画経路に追従させることができる。

制御手段 50 は、自動操船計算手段 40 が算出した船舶の操舵角（指令舵角）に基づいて自動操船装置 60 を制御し操舵する。なお、操舵には、バウスラストの操作といった船舶の方位を制御する操作を含む。ピュアパシュートと自動操舵を組合せて制御手段 50 が船体位置を制御することにより、船舶は着棧経路を精度よく追従できる。

【0071】

制御手段 50 は、図 7 に示す四つの制御区間 1A ~ 1D において、自動操船計算手段 40 の計算により制御区間ごとに目標値として設定された速度（船速）を得るようにクラッチを含む速度制御手段 61 を制御する。

速度制御手段 61 は、エンジンテレグラフ操作（主機負荷）によるプロペラ回転数制御やクラッチ等であるが、本実施形態では、主機への機械的な負荷への対処や船舶の安全性を考慮して、主機回転数をアイドル回転数に固定して着棧操船を行う。また、バウスラストも動作させない。従って、速度の制御はクラッチを切り替えることでのみ可能となる。クラッチは前進、ニュートラル、及び後進の三つの状態を取ることができる。

【0072】

制御手段 50 は、船舶情報取得手段 20 が取得した情報に基づき、船舶に搭載された船舶情報取得手段 20 のうち位置センサーから着棧位置（棧橋 2）までの直線距離 D_{berth} が着棧位置から第一の区分経路 1A と第二の区分経路 1B との境界位置（制御モードの切り替え位置）までの直線距離である第一距離 D_1 よりも大きいかなかを判定する（第一の距離判定過程 S24）。

制御手段 50 は、第一の距離判定過程 S24 において「YES」、すなわち着棧位置までの距離 D_{berth} が第一距離 D_1 よりも大きいと判定した場合は、経路追従モードで制御する。経路追従モードは常にクラッチを前進とする。

【0073】

一方、制御手段 50 は、第一の距離判定過程 S24 において「NO」、すなわち着棧位置までの距離 D_{berth} が第一距離 D_1 以下と判定した場合は、着棧位置までの距離 D_{berth} が第二の区分経路 1B と第三の区分経路 1C との境界位置（制御モードの切り替え位置）までの直線距離である第二距離 D_2 よりも大きいかなかを判定する（第二の距離判定過程 S25）。

制御手段 50 は、第二の距離判定過程 S25 において「YES」、すなわち着棧位置までの距離 D_{berth} が第二距離 D_2 よりも大きいと判定した場合は、ニュートラル航行モードで制御する。ニュートラル航行モードにおいて制御手段 50 は、前後方向速度 u が所定速度 u_1 よりも大きいかなかを判定する（第一の速度判定過程 S26）。所定速度 u_1 は例えば 1.0 [m/s] とする。

制御手段 50 は、第一の速度判定過程 S26 において「YES」、すなわち前後方向速度 u が所定速度 u_1 よりも大きいと判定した場合は、クラッチをニュートラルとする。一方、第一の速度判定過程 S26 において「NO」、すなわち前後方向速度 u が所定速度 u_1 以下と判定した場合は、クラッチを前進とする。

このようにニュートラル航行モードにおけるクラッチの状態は、ニュートラルを基本と

10

20

30

40

50

し、強い向かい風などで前後方向速度 u が所定速度 u_1 以下まで落ちた際は前進に切り替える。

【 0 0 7 4 】

制御手段 5 0 は、第二の距離判定過程 S 2 5 において「NO」、すなわち着棧位置までの距離 D_{berth} が第二距離 D_2 以下と判定した場合は、着棧位置までの距離 D_{berth} が第三の区分経路 1 C と第四の区分経路 1 D との境界位置（制御モードの切り替え位置）までの直線距離である第三距離 D_3 よりも大きいか否かを判定する（第三の距離判定過程 S 2 7）。

制御手段 5 0 は、第三の距離判定過程 S 2 7 において「YES」、すなわち着棧位置までの距離 D_{berth} が第三距離 D_3 よりも大きいと判定した場合は、回頭モードで制御する。回頭モードにおいて制御手段 5 0 は、前後方向速度 u が所定速度 u_2 よりも大きいか否かを判定する（第二の速度判定過程 S 2 8）。所定速度 u_2 は例えば 1.0 [m/s] とする。

10

制御手段 5 0 は、第二の速度判定過程 S 2 8 において「YES」、すなわち前後方向速度 u が所定速度 u_2 よりも大きいと判定した場合は、クラッチをニュートラルとする。一方、第二の速度判定過程 S 2 8 において「NO」、すなわち前後方向速度 u が所定速度 u_2 以下と判定した場合は、目標方位角 θ に対して、右舷付時は $\theta < 0$ [deg] か否か、左舷付時は $\theta > 0$ [deg] か否かを判定する（目標方位角判定過程 S 2 9）。

制御手段 5 0 は、目標方位角判定過程 S 2 9 において「YES」、すなわち目標方位角 θ に対して、 $\theta < 0$ [deg]（右舷付時）であるか、又は $\theta > 0$ [deg]（左舷付時）であると判定した場合は、クラッチを前進とする。

20

一方、制御手段 5 0 は、目標方位角判定過程 S 2 9 において「NO」、すなわち目標方位角 θ に対して、 $\theta < 0$ [deg]（右舷付時）でないか、又は $\theta > 0$ [deg]（左舷付時）でないと判定した場合は、着棧位置までの距離 D_{berth} が所定距離 D_F （例えば 5 0 m）よりも大きく、かつ、 $|\theta| > 5$ [deg] か否かを判定する（距離・角度判定過程 S 3 0）。

制御手段 5 0 は、距離・角度判定過程 S 3 0 において「YES」、すなわち着棧位置までの距離 D_{berth} が所定距離 D_F よりも大きく、かつ、 $|\theta| > 5$ [deg] であると判定した場合は、クラッチを前進とする。

一方、制御手段 5 0 は、距離・角度判定過程 S 3 0 において「NO」、すなわち着棧位置までの距離 D_{berth} が所定距離 D_F 以下か、又は、 $|\theta| > 5$ [deg] でないと判定した場合は、前後方向速度 u が所定速度 u_3 よりも小さいか否かを判定する（第三の速度判定過程 S 3 1）。所定速度 u_3 は例えば 0.3 [m/s] とする。

30

制御手段 5 0 は、第三の速度判定過程 S 3 1 において「YES」、すなわち前後方向速度 u が所定速度 u_3 よりも小さいと判定した場合は、クラッチを前進とする。一方、第三の速度判定過程 S 3 1 において「NO」、すなわち前後方向速度 u が所定速度 u_3 以上と判定した場合は、クラッチをニュートラルとする。

このように回頭モードにおけるクラッチの状態は、基本的にニュートラルとし、所定の条件を満たす場合に前進に切り替える。

なお、回頭モードの次に停止モードが予定されている場合には、回頭モードの間に所定速度まで速度を下げておくことが好ましい。

40

【 0 0 7 5 】

制御手段 5 0 は、第三の距離判定過程 S 2 7 において「NO」、すなわち着棧位置までの距離 D_{berth} が第三距離 D_3 以下と判定した場合は、停止モードで制御する。停止モードにおいて制御手段 5 0 は、着棧位置までの距離 x_{berth} が所定距離 x_1 よりも大きく、かつ、前後方向速度 u が所定速度（例えば 0.5 [m/s]）よりも大きいか否かを判定する（第一の距離・速度判定過程 S 3 2）。

制御手段 5 0 は、第一の距離・速度判定過程 S 3 2 において「YES」、すなわち距離 x_{berth} が所定距離 x_1 よりも大きく、かつ、前後方向速度 u が所定速度よりも大きいと判定した場合は、クラッチを後進とする。

50

一方、制御手段50は、第一の距離・速度判定過程S32において「NO」、すなわち距離 x_{berth} が所定距離 x_1 よりも小さいか、又は、前後方向速度 u が所定速度以下と判定した場合は、着棧位置までの距離 x_{berth} が所定距離 x_2 よりも大きく、かつ、前後方向速度 u が所定速度（例えば0.1[m/s]）よりも大きいか否かを判定する（第二の距離・速度判定過程S33）。

制御手段50は、第二の距離・速度判定過程S33において「YES」、すなわち距離 x_{berth} が所定距離 x_2 よりも大きく、かつ、前後方向速度 u が所定速度よりも大きいと判定した場合は、クラッチを後進とする。

一方、制御手段50は、第二の距離・速度判定過程S33において「NO」、すなわち距離 x_{berth} が所定距離 x_2 以下か、又は、前後方向速度 u が所定速度以下と判定した場合は、着棧位置までの距離 x_{berth} が0よりも小さく、かつ、前後方向速度 u が0[m/s]よりも小さいか否かを判定する（第三の距離・速度判定過程S34）。

制御手段50は、第三の距離・速度判定過程S34において「YES」、すなわち距離 x_{berth} が0よりも小さく、かつ、前後方向速度 u が0[m/s]よりも小さいと判定した場合は、クラッチを前進とする。

一方、制御手段50は、第三の距離・速度判定過程S34において「NO」、すなわち距離 x_{berth} が0以上か、又は、前後方向速度 u が0[m/s]以上と判定した場合は、クラッチをニュートラルとする。

このように最後の停止モードでは前後方向速度 u が例えば0.1[m/s]以下になるまで段階的にクラッチを後進に入れる。また、向かい風等で着棧手前 $x_{berth} < -0.0$ [m]で $u < 0$ [m/s]となった場合は、クラッチを前進に入れる。これらの条件に当てはまらない場合はクラッチをニュートラルにする。

【0076】

このように区分経路に応じた制御のモードが行われることで、特に着棧を含む到着点に至る計画経路に対して、区分経路に応じてモードを切り替えて制御を行い、到着点まで船舶を精度よく追従させることができる。

また、自動操船計算過程S22で船舶の計画経路を航走する速度を計算し、計算した速度に基づいて、自動操船装置60のクラッチを含む速度制御手段61を制御することで、クラッチ等の速度制御手段61で速度を調節し、例えば着棧を含む到着点への船舶の誘導を容易にできる。特に第四の区分経路1Dの停止モード以外では、主機への過度な負荷を防ぐためクラッチの後進操作を制限してニュートラル航行による減速を基本とし、第三の区分経路1Cの回頭モードでは、目標方位角と船首方位角の差が大きくなっても船速が十分小さい状態でなければプロペラ後流を舵に当てることによる急旋回を行わないことが好ましい。

また、船舶の自動誘導システムは、着棧操船中の船速と位置制御を分離し、着棧位置までの経路を設定して追従する。このような経路追従による着棧操船を行うことで、乗組員等は、予め計画経路（着棧経路）を確認できると共に、経路からの偏差を確認することで自動制御が正常に働いているかを確認できる。なお、着棧経路や経路からの偏差は表示手段70に表示される。表示手段70には、その他に、船舶の位置、船首方位、目標点、目標点の方位、船舶の速度、気象海象情報、計算された外力等が表示される。

また、経路によって棧橋2へのアプローチ時の角度を設定できる経路追従制御とすることで経路計画の問題と、制御の安定性の問題を切り分けて設計できる。

【0077】

また、船舶情報取得手段20が第二の船舶情報取得過程S15で船舶の周辺の気象海象情報を取得し、自動操船計算手段40が自動操船計算過程S22において気象海象情報に基づいた船舶に対する外力を加味して操舵角及び速度を補正することもできる。外力を加味して補正した操舵角及び速度により船舶をより精度よく計画経路に追従させることができる。

外力の計測においては、船舶が変針や加速、減速等している際は、精密な測定が難しいため、ニュートラル航行モードなど、一定速度で直進している間に計測し、その結果を用

いて操舵角及び速度を補正することが好ましい。

【0078】

このように、ピュアパシュートと自動操船装置60を組合せて計画経路を追従する自動誘導は、着栈のような、曲線を成す計画経路に沿って細かい制御を行う場合に、特に有効である。

なお、上記では主に船舶の自動誘導方法及び自動誘導システムについて説明したが、本発明は、航走する船舶の少なくとも操舵の制御を自動的に行う自動操船装置60を用いた船舶の自動誘導プログラムであって、コンピュータに、条件の入力に従った計画経路生成過程S1、S14と、船舶情報取得過程S3、S11、S15と、ピュアパシュート計算過程S4、S21と、自動操船計算過程S5、S22と、制御過程S6、S16を実行させる船舶の自動誘導プログラムとすることもできる。これにより、ピュアパシュートと自動操船装置60を組合せ、計画経路を追従する自動誘導を行うことで、モデル予測制御のように大量の計算を必要とすることなく、外乱があっても計画経路からの偏差を一定以下に抑制するプログラムを提供することができる。

10

【0079】

次に、本発明の第二の実施形態による船舶の自動誘導方法、船舶の自動誘導プログラム、船舶の自動誘導システム、及び船舶について説明する。なお、上記した実施形態と同一機能部材等については同一符号を付して説明を省略する。

上記した第一の実施形態においては、ベジェ曲線を用いた経路計画アルゴリズムにより計画経路（着栈経路）を生成したが、当該アルゴリズムは周囲の地形や栈橋2の周囲にある浅瀬等の航行環境を考慮せずに船体位置と着栈の目標点から幾何学的に経路を計算するため、自船の初期位置によっては実際の航行が困難な経路が生成される可能性がある。

20

そこで、本実施形態では、計画経路生成過程S1、S14において海域情報を取得し、計画経路生成手段10では航行不能な海域情報を加味して計画経路を計算する。「航行不能な海域情報」とは、船舶等の移動物体や浮遊物体等の障害物、又は浅瀬等が存在し、航行不能な海域に関する情報である。これにより、船舶の自動誘導の安全性を向上させ、また、船舶の自動誘導が適用可能な海域を広げることができる。

取得する海域情報は、オフラインでも利用可能な電子海図によるものと、LiDAR等のセンサー類により航行中に実海域で検出するものがある。航行中に実海域で検出した海域情報はその場で知る新たな情報であり、この新たな情報に基づき計画経路生成手段10が計画経路を再計算することができる。

30

【0080】

本実施形態では、経路探索アルゴリズムのひとつであるHybrid-state A*アルゴリズムを用い、航行環境を考慮した着栈制御に適切な計画経路を生成する。

Hybrid-state A*アルゴリズム(Hybrid A*ともいう)は、A*と呼ばれる古典的なアルゴリズムをベースとした経路探索のためのアルゴリズムである。A*では、まず探索領域をグリッド状に分割し、ゴールまでの経路を探索する。A*はグラフ探索アルゴリズムに分類され、初期位置を表すスタートノードから、周囲に隣接する(障害物に専有されていない)グリッドに対応するノードを順番に調べていき、最終的にゴールのノードまでの経路を探索する。

40

探索では、各ノードのコストが計算される。スタートからゴールまでの最短経路を探索する場合は、各ノードのコストはそのノードに至るまでの移動距離と別に定義されるヒューリスティック関数の値に対応する。一般的なヒューリスティック関数は、ゴールまでの距離を返す単純なものである。このコストが小さくなる方向にノードを探索することでゴールまでの目的の経路を見つけるのがA*アルゴリズムである。

【0081】

Hybrid-state A*は三つの工夫がなされている。

一つ目の工夫は、探索の際に、四次元の探索空間(x, y, , r)を使って探索するというものである。ここでx, yはもともとの位置座標、は移動体の向き(船の場合は船首方位に対応)、rは経路に対する移動方向で0(前進)と1(後進)の二値で表さ

50

れる。もともとの二次元平面から四次元空間での探索にすることで、Hybrid-state A*の探索は、二次元空間を連続的に探索することができ、得られる軌跡はA*で得られるようなグリッドの中心をつないだ折れ線ではなく、連続的な曲線で表現される。ここで図12は、Hybrid-state A*の探索方法について、古典的なA*アルゴリズムとの比較図であり、図12(a)は古典的なA*アルゴリズムの離散的な状態を示し、図12(b)はHybrid-state A*アルゴリズムの連続的な状態を示している。

二つ目の工夫は、一方で、探索する次元が増えることで増大する計算時間を軽減しより効率的に探索をおこなうために、動的計画法を用いたコストマップをヒューリスティック関数として用いるというものである。これにより、入り組んだ地形であっても、ゴールまでの経路を効率的に探索できる。

さらに、四次元空間での探索においても、一つ一つのノードの探索は離散化された行動空間のなかで行われるため、そのままでは実際の連続空間で定義されたゴールの姿勢に到達することはない。そこで、三つ目の工夫は、Analytic Expansionと呼ばれる手法を導入するというものである。Analytic Expansionでは、ノードの探索によって求められた途中までの経路から、ゴールまでを曲線で接続するようにして経路を拡張することで終端状態の問題を解決する。通常、この経路の拡張においては、Reeds-Sheppパスと呼ばれる経路生成アルゴリズムが用いられる。Reeds-Sheppパスは与えられた二点の位置と向きから、進行方向が定義された円弧と直線で構成される最短経路を生成するアルゴリズムである。

ここまでのステップを経て得られた経路の候補は、衝突判定を行って有効な経路か否かを判定する。域内にあれば、移動体の形状を表現する長方形領域に障害物の点が含まれるかどうかを計算して衝突の判定を行う。この流れを繰り返して最終的に衝突のない有効な経路が見つかった時点で終了となる。

【0082】

上記した第一の実施形態においては、図9に示すように、人が操船して着桟させるときの航跡等を参考に、四つの制御点 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 の位置を設計している。この経路を生成する上で特に重要であるのが桟橋から50m付近の距離までの経路の曲率である。この区間では、桟橋2に対する自船の進入角度が20度前後になるようにしつつ、付近の浅瀬を避ける必要がある上に、船の旋回性能と経路追従制御の特性を考慮して、曲率にもある程度の制限がかかることになる。また、桟橋2との距離も近くなりプロペラ回転数を落とすことになるため、舵効きが悪くなる状況で方位角制御をすることが求められる。

このためHybrid-state A*アルゴリズムによる探索を着桟操船へ適用する上では、ベジェ曲線の経路のときと同様に経路の曲率を制限し、適切な進入角度となるような着桟経路にする必要がある。Hybrid-state A*による経路計画では、桟橋2付近の経路は基本的に障害物が少なくなるため、Reeds-Sheppパスによる経路の拡張が行われる可能性が高い。したがってReeds-Sheppの曲率を制限することで適切な進入角度を持った経路を生成することができる。

ここで、この経路の拡張をベジェ曲線による経路計画アルゴリズムを使って行うことも可能であるが、円弧と直線で構成されたReeds-Sheppには、そのあとの経路追従の制御に関してひとつの利点を有する。ベジェ曲線による経路は、基本的に曲率が連続的に変化していて一定ではない。一方でReeds-Sheppの経路は円弧と直線で構成されているため、区間ごとに曲率が一定になる。経路の曲率が一定であるとピュアパシユートを始めとする経路追従の制御において目標の方位(直線)もしくは方位の差(円弧)が一定になる。船の場合、船首方位の制御にオートパイロットを使用することを考えると、目標値は一定であることが制御の観点では望ましい。目標値が動くと、目標追従制御の遅れが累積し制御の精度が悪化する可能性がある。また、ピュアパシユートにおいても、もともとは経路の曲率が一定であることを前提に設計されている。そのため適切な曲率で生成されたReeds-Sheppパスは追従制御上の都合が良い。

一方でReeds-Sheppパスは経路の進行方向も定義されており、すなわち後進

して追従する必要のある経路が生成される場合がある。着棧時に後進を行わないような経路を生成する必要がある場合は、前進方向のみの経路で構成されるDubinsパスに置き換えるか、Reeds-sheppパスの計算時に、後前進方向の経路に対して、コストマップなど他のコストと比べて大きなコストを課すことで後進する経路が生成されることを抑制することもできる。

【0083】

次に、本発明の第三の実施形態による船舶の自動誘導方法、船舶の自動誘導プログラム、船舶の自動誘導システム、及び船舶について説明する。なお、上記した実施形態と同一機能部材等については同一符号を付して説明を省略する。

第一の実施形態において説明した、ピュアパシュートとHCS(Heading Control System)を組み合わせた経路追従制御は、3m/s程度より小さい風速では経路偏差を小さくできるが、一方で風速がそれより大きくなると風外乱の影響が大きくなり経路の偏差を小さくできなくなる場合がある。船舶の自動誘導のODD(Operational Design Domain)を拡大するためには、風速が大きくなった状況でも経路偏差を補償できる制御系が必要となる。また、一般の船舶への適用も考えると、制御系を設計するために必要なパラメータの数を最小限にすることが好ましい。

そこで本実施形態における船舶の自動誘導システムは、船舶情報取得手段20が気象海象情報として取得した風向及び風速による船舶に対する外力(風圧力)を求め、外力による船体運動を予測し、外力による船体運動を打ち消すような操舵角又は速度を導出して風による外乱を補償するように自動操船装置60を制御する。これにより、強風時においても計画経路からの偏差を一定以下に抑制することができる。

なお、「外力による船体運動を打ち消す操舵角又は速度」とは、予測した船体運動が生じる前に、その船体運動が起こらないようにするための操舵角又は速度である。

【0084】

図13はピュアパシュートアルゴリズムによる経路追従制御を示す図である。ピュアパシュートは、図13に示されるように、経路の少し先の目標点を目指すように方位を制御することで追従制御を行う。方位の制御はPD制御によるHCS(Heading Control System)が受け持つ。本制御の利点は、制御パラメータが少ないことで、特にピュアパシュートに関しては、自船位置から目標点までの距離 L_T を調整するのみで設計が可能である。船速については、クラッチの切り替えによる船速制御を用いる。

本実施形態では、強風下での着棧性能を向上させるため、さらに船速制御の調整を行う。回頭モードにおいて、基本をニュートラルとして、例えば次の条件を満たしたときのみ前進にクラッチを切り替える。

A) 目標方位角 θ_T に対して、 $-\theta_T < 0$ [deg] < 0 かつ前後方向速度 u が 1.0 [m/s] 以下のとき。

B) 目標方位角 θ_T に対して、 $-\theta_T < 0$ [deg] < 0 かつ、着棧点までの経路に沿った距離が 2.5 [m] 以上のとき。

C) 前後方向速度 u が 0.3 [m/s] のとき。

これにより、制御精度が要求される回頭モードの舵効きを改善し、船首方位制御の安定化を図ることができる。

【0085】

図14は風による経路追従制御の乱れを示す図である。図14では、風外乱による経路追従制御への影響として、計画経路からの偏差が発生する様子を示している。船が横から風を受ける場合に、計画経路からの逸脱が大きくなる。

このように、水に浮かぶ船では、車輪で接地する自動車と異なり、特に横風による横スライドや船首方位のずれ等が問題となる。この風により発生する経路偏差を軽減することで経路追従制御の精度を高めることができる。

【0086】

自動車関係のピュアパシュートでは、向かい風や追い風による抵抗の変化を考慮したも

10

20

30

40

50

のが多い。これに対して船の場合は、横風で連続的に外力を受け、結果的に経路が漸次変化する応答が遅い制御系であるので、フィードフォワード制御が有効となる。そこで本実施形態では、外力（風圧力）と操舵により発生する舵力の船体横方向成分をキャンセルするようなフィードフォワード制御機構を経路追従制御に組み込む手法を用いる。

当該手法を用いるにあたり、操舵による船体に働く横力について、後述する実施例 1 における実船試験のデータから構築した操縦運動数学モデルを解析した。解析対象は下表 1 に示す、前進（Forward）・ニュートラル（Neutral）・逆転（Reverse）の状態に対応する各運動である。u、v、r はそれぞれ船体中央における前後方向速度、左右方向速度、回頭角速度であり、n P はプロペラ回転数である。前進とニュートラルに関しては主機アイドリング回転数で直進時の運動状態を基準としている。逆転については、停止モードのみクラッチが逆転に入るため、船速がゼロの状態を基準として解析した。

10

【表 1】

	Forward	Neutral	Reverse
u [m/s]	2.072	2.072	0.0
v [m/s]	0.0	0.0	0.0
r [deg/s]	0.0	0.0	0.0
nP [rps]	3.09	0.0	-3.09

【 0 0 8 7 】

図 1 5 は解析結果を示す図である。D y は舵を切ったときの船体横方向に働く舵力を F_{dy} としたときに下式（ 4 ）の線形の関係式を満たすように求めた係数、 δR は舵角である。

【数 4】

$$F_{dy}/(m + m_y) = D_y \delta R \quad \dots (4)$$

ここで、m は船の質量、 m_y は S w a y 運動の付加質量、 R は操舵量である。このうち、操舵量がゼロのときの D y の値はそれぞれ前進： 0.003272、ニュートラル： 0.002771、逆転： 0.0 となった。この係数を用いて各クラッチの状態における操舵により発生する横力を推定する。

30

【 0 0 8 8 】

風圧力については、例えば、文献 " Kitamura F. et al.: Estimation of above water structural parameters and wind loads on ships, Ships and offshore structures, 12 8, 2017. " 及び文献 " 北村文俊, 上野道雄, 藤原敏文：船舶風圧力簡易推定プログラムについて, 海上技術安全研究所報告, 第9巻, 第3号, pp.207 213, 2009. " に記載の方法を用いて計算できる。

図 1 6 は実施例 1 における実験船の風圧力係数を示す図である。船体横方向にかかる風圧力 Y_A は風圧力係数 C_{AY} を用いて下式（ 5 ）で計算される。

【数 5】

$$Y_A = \frac{1}{2} \rho_A A_F U_A^2 C_{AY}(\psi_A) \quad \dots (5)$$

40

ここで、 ρ_A は空気の密度、 A_F は水線面上の構造物の側面投影面積、 U_A と ψ_A はそれぞれ風向風速計の設置位置における見かけの風速および風向を表す。ただし、 ψ_A は船体に対する迎角として定義されているため、図 1 1 の真風向 ψ_w とは角度方向の正の向きが逆の関係にある。また ψ_A は船首方位からの風を 0 度とする。

【 0 0 8 9 】

横方向風圧力をキャンセルする操舵量は、式（ 4 ）及び式（ 5 ）から $Y_A = F_{dy}$ を解くことで求めることができる。求められた舵角に基づいて転舵することで、風圧力の船体

50

横方向成分をキャンセルできるが、あくまで推定値であり、旋回方向の風圧モーメントや潮流など他の外乱要素やセンサー値の誤差が生じる可能性がある。これらの要因で発生する誤差は、フィードバック機構を持つピュアパシュートとHCSがまとめて補償する。

よって、風圧力補償のフィードフォワード制御部が計算する操舵量 R_{ff} とピュアパシュートとHCSのフィードバック制御部から計算される操舵量 R_{fb} の和 $R_{ff} + R_{fb}$ が実際に操舵する量となる。

【実施例1】

【0090】

第一の実施形態におけるピュアパシュートとHCSによる経路追従制御を用いた船舶の自動誘導システムを用いた自動着棧を実証するため、広島県尾道市因島周辺海域（因島マリーナ）で実船実験を行った。

実験を行った海域では浮き棧橋の近くに水深が浅い箇所があり、これを避けるように着棧用の経路を引く必要がある。本実験では浮き棧橋と仮想棧橋への右舷付による着棧を行った。

【0091】

実船による自動着棧操船を実施するにあたり、低速時に受ける外乱の影響が大きくなると予想される小型船舶を対象として開発を行った。さらに対象船舶の仕様として一般的な1軸1舵船を想定し、このような条件に合致するものとして、海上技術安全研究所が管理する実験船「神峰」を供試船とした。実験時の神峰の主要目を下表2に示す。

【表2】

Subjects	Value
Length overall, L_{oa} [m]	16.5
Ship length between perpendiculars, L_{pp} [m]	14.9
Ship breadth (1.0WL), B [m]	4.38
Ship draft, d_m [m]	0.502
Trim, τ [m]	0.348
Diameter of propeller, D [m]	1.0
Side area of rudder, A_R [m ²]	0.780
Height of rudder, H_R [m]	1.05
Mass, m [ton]	21.53
Block coefficient, C_b	0.642

【0092】

供試船は、船舶の自動誘導に用いる船舶情報取得手段として、位置情報に準天頂衛星システム（QZSS）「みちびき」対応のセンチメートル級測位補強サービス（CLAS）受信機と、方位角センサーにサテライトコンパスを備える。船舶情報取得手段は、その他にプロペラ回転数、エンジン回転数、主機負荷の推定値、及び風向・風速等の各種データをリアルタイムにモニタリングできる。

【0093】

図17は船体制御システムの構成図である。

供試船は、制御手段としてPC（制御用パーソナルコンピュータ）及びPLC（Programmable Logic Controller）を備え、PCから実験船を制御可能にするために、信頼性と拡張性の高いPLCを中心とした、制御システムが構築され、PCから油圧操舵システムと主機遠隔操縦システムを監視及び操作可能である。

PCからPLCを経由して、船舶情報取得手段が取得した情報の受信と通常の着棧操船で使用する舵、主機ガバナー（エンジンテレグラフ指示値に対応）、クラッチ、及びスラ

スターの全てを操作することができる。

また、P L Cに接続された表示手段（タッチパネル）からも船舶情報取得手段が取得した情報をモニタリングできる。また、表示手段に接続されたスピーカーからの音声出力で、棧橋からの距離や風況、現在の制御状況等を案内する機能を有する。

さらに、P Cによる自動制御中、操船者は任意のタイミングでP Cからの通信を遮断し手動操船に切り替えることができる他、タッチパネルから起動できる緊急停止機構を安全策として有する。

【 0 0 9 4 】

システムを開発する上で、安全性の面から制御プログラムの開発中に実機につなぐことなく陸上で実際のプログラムの動作を確認できると、アルゴリズム以外の通信部分を含めた制御プログラム全体の不具合の有無や性能を事前に検証することができる。そこで、船体運動をシミュレーションする機能を備えたP L Cの通信エミュレータを作成した。この通信エミュレータは、風況をシミュレーションする機能と操縦運動数学モデルに基づいた運動予測する機能とを有し、実機で使用するP L C - P C間のシリアル通信と同じプロトコルで通信及び制御することができる。

風況は平均値として設定した風向・風速に基づいて、それぞれ正規分布とWe i b u l l分布に従ってその変動をシミュレーションすることができる。また、波や潮流については、湾内では着棧操船に影響が小さいとして今回は扱わないこととした。

【 0 0 9 5 】

アルゴリズムの設計において、低速航行時の応答と外乱、特に風の影響を評価するために下式（ 6 ）のようなM M Gモデルをベースとした操縦運動数学モデルを用いた。

【 数 6 】

$$\left. \begin{aligned} (m + m_x) \dot{u} - m(vr + x_G r^2) &= X \\ (m + m_y) \dot{v} + m x_G \dot{r} + (m + m_x) ur &= Y \\ (I_{zz} + m x_G^2 + J_{zz}) \dot{r} + m x_G (\dot{v} + ur) &= N \end{aligned} \right\} \dots (6)$$

ただし、 m は船舶の質量、 I_{zz} は船体重心に関する船首揺（yawing）の慣性モーメント、 m_x 、 m_y 、 J_{zz} はそれぞれ前後方向と左右方向の付加慣性質量と付加慣性モーメント、 x_G は x 軸方向の重心位置を表す。 u 、 v 、 r はそれぞれ船体中央における前後方向速度、左右方向速度、回頭角速度を表し、速度成分の時間微分をドットで表す。 X 、 Y 、 Z はそれぞれ船舶に働く前後揺（surge）、左右揺（sway）、船首揺（yaw）方向の外力であり下式（ 7 ）で表される。

【 数 7 】

$$\left. \begin{aligned} X &= X_H + X_P + X_R + X_A + X_S \\ Y &= Y_H + Y_P + Y_R + Y_A + Y_S \\ N &= N_H + N_P + N_R + N_A + N_S \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

ただし、

X_H 、 Y_H 、 N_H ：船体に作用する流体力

X_P 、 Y_P 、 N_P ：プロペラによる流体力

X_R 、 Y_R 、 N_R ：舵による流体力

X_A 、 Y_A 、 N_A ：船体に働く風圧力

X_S 、 Y_S 、 N_S ：バウスラストによる流体力である。

【 0 0 9 6 】

船体の流体力の計算には、文献 " Y. Yoshimura et al.: UNIFIED MATHEMATICAL MODEL FOR OCEAN AND HARBOUR MANOEUVRING, Proceedings of MARSIM 2009, 2009. " を参考に、必要な係数が少なく、低速時の大斜航状態の横方向及び回頭方向の流体力を表現できる下式（ 8 ）のモデルを用いた。

10

20

30

40

50

【数 8】

$$\left. \begin{aligned}
 X_H &= \frac{1}{2} \rho L d \left[\begin{aligned}
 &\{X_{0F}' + (X_{0A}' - X_{0F}')|\beta|/\pi\}uU \\
 &+ (m_y' + X_{vr}')Lvr
 \end{aligned} \right] \\
 Y_H &= \frac{1}{2} \rho L d \left[\begin{aligned}
 &Y_v'v|u| + Y_r'Lur \\
 &-\frac{C_D}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} |v + C_{rY}rx|(v + C_{rY}rx)dx
 \end{aligned} \right] \\
 N_H &= \frac{1}{2} \rho L^2 d \left[\begin{aligned}
 &N_v'vu + N_r'L \cdot |u|r \\
 &-\frac{C_D}{L^2} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} |v + C_{rN}rx|(v + C_{rN}rx)x dx
 \end{aligned} \right]
 \end{aligned} \right\} \dots (8)$$

ここで、 X_{0F}' は前進時の抵抗係数、 X_{0A}' は後進時の抵抗係数、 X_{vr}' 、 Y_v' 、 Y_r' 、 N_v' 、 N_r' は流体力の微係数であり、 C_D 、 C_{rY} 、 C_{rN} は Cross-flow drag に関する修正係数を表す。

【0097】

付加質量は元良チャートの重回帰式、前進及び後進時の抵抗係数は、実船のアイドリング航行時の速力試験結果及び過去の水槽試験結果より決定した。

20

プロペラ推力の計算に用いる $K_T - J$ 曲線は、MAUプロペラの性能推定近似式及び B-Seriesプロペラの第2～4象限までの特性を推定するためのデータベースに基づいて求めた。

プロペラの回転数については、着舷位置近傍においては主機アイドリング状態でのクラッチの切り替えによる制御を想定して、実船の計測からクラッチの前進、ニュートラル、後進に対してそれぞれ 3.1、0、-3.1 [rps] に対応するとし、クラッチ切り替えの時間遅れは無視した。

さらにプロペラ逆転時の計算は、発生する不均衡流体力を扱うことができ、逆転時の舵の流体力を考慮できるモデルを導入した。

また、クラッチをニュートラルに設定した際の推力計算では、プロペラ回転数がゼロになるため、前進定数 J の計算を省略し、プロペラ推力 $T = X_P / (1 - t_P)$ に関してはゼロ、舵への前後方向有効流入速度 u_R を定義に基づいて $u_R = (1 - w_R)u$ として計算した。

30

舵角 δ の変化は指令舵角 δ^* に対する一次遅れ系とした。風圧力係数は少ない入力パラメータで推定が可能な手法を用いて決定した。

【0098】

図18は旋回試験の計測結果と調整/シミュレーション結果の比較を示す図である。

流体力微係数等の同定を行うために、アイドリング状態のプロペラ回転数 3.1 [rps] を中心に、舵角 20、40度の旋回試験、±10度、±20度のZ試験等の実船計測を実施した。

40

次に各種の推定式やデータベース等を参照しつつ、式(6)を用いてシミュレーションを行い、実船実験の計測値と比較して係数の調整を行った。この手順による同定結果を図18及び下表3に示す。なお、図18においては、舵角：45度、平均真風速 2.08 [m/s]、平均真風向：348.4 [deg]である。調整作業では計測できていない潮流の影響を除外したため航跡に差があるが、速度成分 u 、 v 、 r は実船の運動を概ね再現できていることが分かる。

【表 3】

	Ahead	Astern
m'_x	0.01897	
$m'_y + X'_{vr}$	0.2470	0.1647
Y'_v	-1.232	-0.5547
Y'_r	0.1058	0.04759
N'_v	-0.07905	-0.09486
N'_r	-0.1343	-0.0614
C_D	0.1853	0.08340
C_{rY}	1.413	0.6362
C_{rN}	3.337	1.525

【0099】

構築した操縦運動数学モデルを用いてアルゴリズムの開発を行い、実験船に適用した。

実験船を用いた自動誘導システムによる自動着栈の検証は、浮き栈橋から30m程度離れた地点を位置座標の原点とする「仮想栈橋」と、実際の浮き栈橋を目標とする「実栈橋」の二つの設定で行った。この二つの条件の着栈操船において、着栈目標地点以外の違いはない。

20

【0100】

図19は仮想栈橋での自動着栈操船の実験結果を示す図、図20は仮想栈橋での自動着栈操船の実験において船舶情報取得手段が取得した各計測値を示す図である。

図19では、左に実際の航跡と船体位置及びそのときの真風向風速を10秒間隔で描き、右側に航跡に対応するクラッチの状態を色で表している。

ここで、図20中のDistanceは、着栈目標位置と自船の準天頂衛星システム位置との直線距離を表す(後述の図22、図24も同様)。航跡を見ると、栈橋との距離が近づくにつれて経路との偏差は減少している。一方で、回頭モードの間は断続的にクラッチを前進に入れて船首方位角を調整していることが分かる。

30

【0101】

図21は実栈橋での自動着栈操船の実験結果を示す図、図22は実栈橋での自動着栈操船の実験において船舶情報取得手段が取得した各計測値を示す図である。

仮想栈橋の実験時と異なり風向きがおおよそ反対になっているが、経路への追従性は変わらず良好である。

【0102】

図23は強風下における仮想栈橋での自動着栈操船の実験結果を示す図、図24は強風下における仮想栈橋での自動着栈操船の実験において船舶情報取得手段が取得した各計測値を示す図である。

風に対する追従性能を見るために、強風下での仮想栈橋への着栈操船の実験を行った。平均真風速は5.34 [m/s]であり、8.0 [m/s]を越す場面があった。この状況では、経路からの偏差は大きくなるもののニュートラル航行モード以降であっても偏差が増大することはなく着栈することができた。これは操舵量を大きくすることで、経路の偏差量を補償していると考えられる。

40

【実施例2】

【0103】

第二の実施形態におけるHybrid-state A*を用いた着栈経路の生成を実証するために、実験海域として因島周辺の海域を対象として計算を行った。図25はHybrid-state A*を用いて生成した着栈までの計画経路を示す図である。この例では点で構成される障害物を避ける経路が線で示されている。この計算例では、障害物とし

50

て、陸地と棧橋付近の浅瀬を囲むように点を配置している。

地図の上に重畳されたマップは動的計画法を用いて計算されたコストマップを表しており、下部に0～800の数値で表しているように、色が濃い箇所ほどコストが大きいことを示している。

棧橋2に近いほどコストが小さくなるが、一方で障害物を挟んだ位置では棧橋2との直線距離が小さくても棧橋2までは障害物を回り込んでいく必要があるため、総じてコストが大きくなる傾向が見取れる。肝心の計画経路については、初期位置から防波堤や浅瀬のある領域を回り込むようにして棧橋2へとつながっている様子が示されており、目的の着棧経路を得ることができている。得られた着棧経路を詳しく見ると、スタート位置から浅瀬の北側あたりまではHybrid-state A*のノード探索により得られた経路で、そこから棧橋2までを構成する円弧と直線で構成される経路はReeds-Sheppパスとなっている。Hybrid-state A*の探索により拡張された総ノード数は、874個であった。

10

【0104】

実施例1でも使用した実験船「神峰」には、周囲状況の監視のためにいくつかのセンサーが装備されている。この中でもLiDARは製品によっては200～300m以上の距離から障害物を検知することができる。神峰では甲板上にLiDAR(Velodyne Lidar社製VLP-32C)を設置しており、実験時の計測データを記録している。この計測データを使って着棧制御のための経路生成を行った。今回使用するデータは神峰の着棧操船時にLiDARで計測したデータのうち1フレーム分のデータを抜き出し、センサーから20m以内の点と各点群のLiDARの強度(intensity)の値が25以下をノイズとして除外したデータを使用していた。なお、計測時の天気は晴天であった。

20

図26は、LiDARにより計測された点群を用いて着棧経路を計算した例を示す図である。図26に示す例は、計測時の位置から経路を計算したものである。この海域では棧橋2に近づくと針路を塞ぐような障害物は無いため、計算された経路はReeds-Sheppパスのみで構成されたものが求められているが、より複雑な状況や、障害物の反射強度によっては、また異なった結果になる可能性がある。

LiDARを使った障害物検知においては、たまたまある時刻に点群が得られない場合があり、図26に示す例では画像中央から左にある防波堤の先端が検知されていない。実際にはこのような取り逃している部分については、計測距離が小さくなることで検知できる可能性は上がるが、解決策としては、よりチャンネル数の多いLiDARを使用するほかに、過去の数フレーム分のデータと合わせて使用するなどして、一時的に計測が漏れた部分のデータの補完を行い検知確率や精度を上げることが好ましい。

30

【0105】

図27は、LiDARのセンサーデータに基づいて障害物との衝突を回避し棧橋に至る経路を見つける例として、LiDARで計測した位置から船体位置を意図的に変えて経路を計算した例を示す図である。なお、LiDARの計測位置と船体の初期位置が異なる点は注意の上で、実際には異なる点群が得られる可能性がある。

図27に示すように、棧橋2の北側で船首方位が岸壁に向かっていている状態から少し船首を振ったのち、線で示される経路に沿って後進して船首方位を棧橋2へ向けてから、線を前進して追従し棧橋2まで至るといった結果が得られた。このときの探索した総ノード数は121個である。

40

このように、LiDARのセンサーデータを利用することで事前に障害物のデータが与えられていない状況でも障害物を回避する経路を計算できる。一方で、一般的なLiDARでは、水深の情報を得られないため、航行可能な領域は別に用意する必要がある。また、LiDARのデータでは点群の位置が障害物と一致しているため、衝突回避の観点で余裕のある経路を計算するためには、衝突判定に用いる自船を表す矩形範囲を拡張するなどの工夫をすることが好ましい。

また、今回はある1フレームのデータに対して経路を計算したが、実際に計画経路を生成するタイミングとしては最初に大域的な経路を決めるグローバルパスプランニングと今

50

回のように局所的な障害物データに対してその場で経路を生成するローカルパスプランニングがある。ローカルパスプランニングとして利用する際は、計画経路を更新する頻度や、更新の前後で計画経路が変わったときに、経路追従制御が追いつくように余裕をもたせることもできる。

【実施例 3】

【0106】

第三の実施形態における風外乱補償のフィードフォワード制御を組み込んだ経路追従制御の効果を実証するため、実験船「神峰」による実船試験を行った。本例は実施例 1 と同じく広島県尾道市因島周辺海域（因島マリーナ）で実施した。実施例 1 と同様に、棧橋 2 周辺にある浅瀬を回避するように経路を自動生成し、これを追従する。本実験では浮き棧橋への右舷付による着棧を行う。

図 28 及び図 29 は本発明の風外乱補償型経路追従制御の試験結果を示す図であり、図 28 はフィードバック制御ありのピュアパシュートと HCS による着棧制御の実船試験結果を示し、図 29 は図 28 に示す状態の実測値を示している。

本実験は、図 29 に示すように、平均して 6.38 m/s の真風速が吹いている状況であるが、最初に生じた偏差を徐々に小さくしていき、棧橋 2 から 50 m の距離、つまり制御精度が要求される回頭モードの前までに偏差はほとんどなくなっている。

風外乱補償のない実施例 1（図 23、図 24）と比較すると、本実施例による速度制御の効果が見て取れる。本実施例ではクラッチの切り替えが改善されプロペラ回転数の変化も最小限となっていることが分かる。さらに最終的な船首方位も本実施例では、棧橋 2 の方位（104 [deg]）に十分近くなっている。このあとの係船作業を考えると、船尾を棧橋 2 へ近づけることは重要であるため、その意味でも速度制御の改善により終端状態の制御精度に対する効果が見られる。

【0107】

さらに第三の実施形態における風外乱補償の性能を検証するために、より風が強い状況において実験を行った。その結果を図 30 と図 31 に示す。図 30 は強風下でのフィードバック制御ありのピュアパシュートと HCS による着棧制御の実船試験結果を示し、図 31 は図 30 に示す状態の実測値を示している。

この実験は、真風速が平均で 8.86 m/s となる非常に強い風が吹いている状況での着棧制御である。真風速が最大で約 12 m/s となっている制御開始直後では、最初は東に流されつつもすぐに大きく回頭し、非常に早い段階で経路偏差をなくす様子が確認できる。また、回頭モードにおける改良されたクラッチの制御も、切り替えの少ない理想的な制御を行っている。

【産業上の利用可能性】

【0108】

本発明は、外乱下でも船舶を計画経路に精度よく追従させることができるため、着棧等の高度な技術が要求される操船作業を支援し、自動化することができる。また、着棧以外の港外においても、曲線状を成す計画経路を滑らかに追従して航行することができる。特に低速時に受ける外乱の影響が大きくなると予想される小型船舶に効果を発揮するが、中～大型船においても有用である。

【符号の説明】

【0109】

- 10 計画経路生成手段
- 20 船舶情報取得手段
- 30 ピュアパシュート計算手段
- 40 自動操船計算手段
- 50 制御手段
- 60 自動操船装置
- 61 速度制御手段
- 70 表示手段

10

20

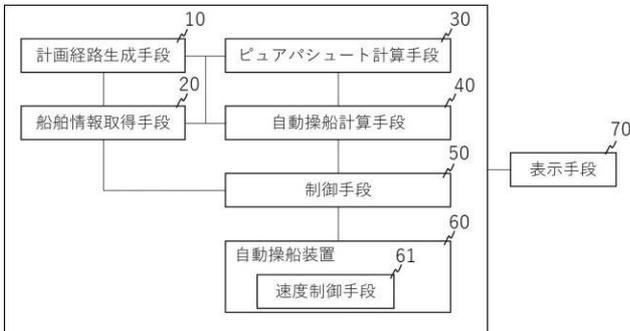
30

40

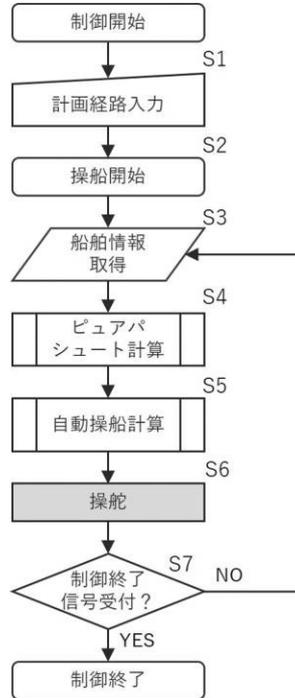
50

- S 1、S 1 4 計画経路生成過程
- S 3、S 1 1、S 1 5 船舶情報取得過程
- S 4、S 2 1 ピュアパシユート計算過程
- S 5、S 2 2 自動操船計算過程
- S 6、S 1 6 制御過程

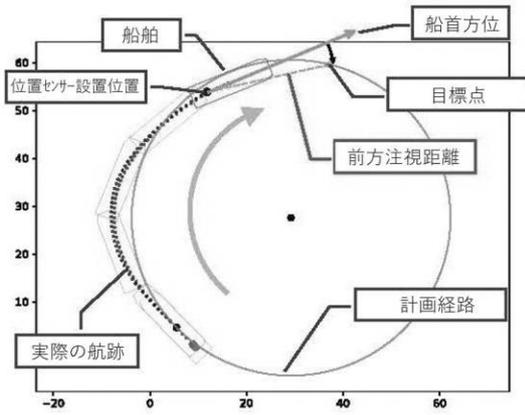
【図 1】



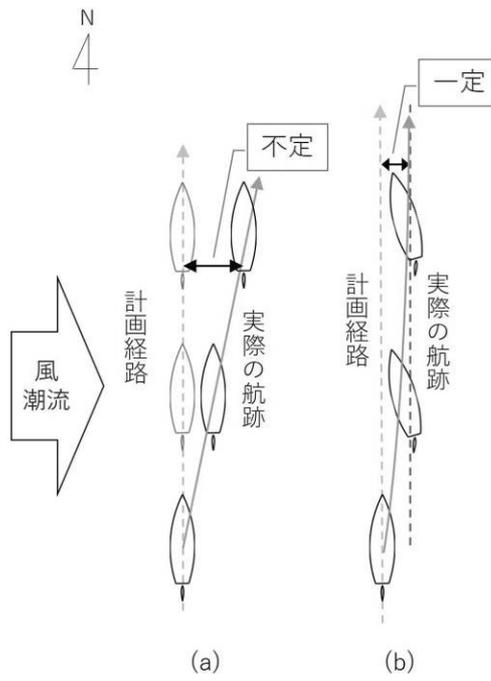
【図 2】



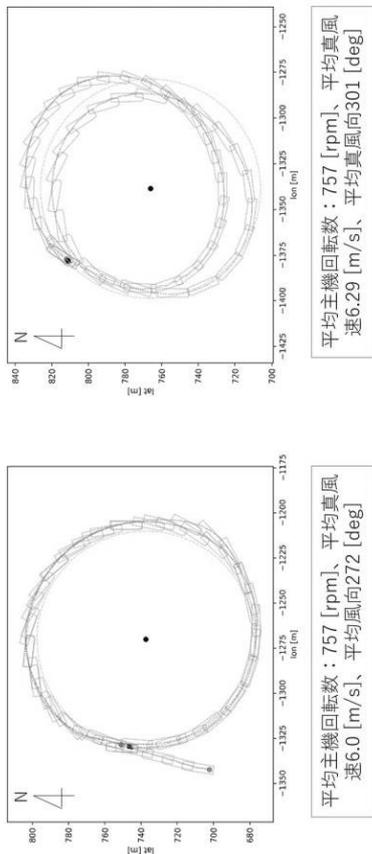
【図3】



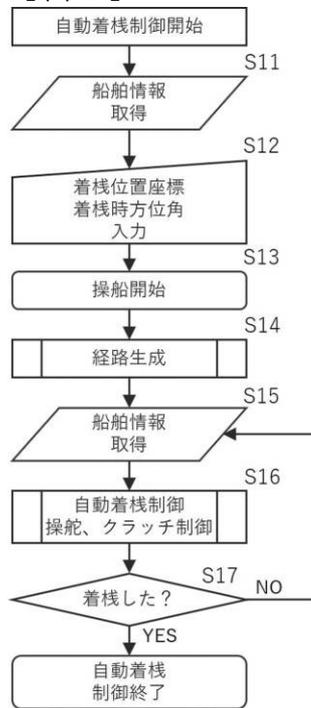
【図4】



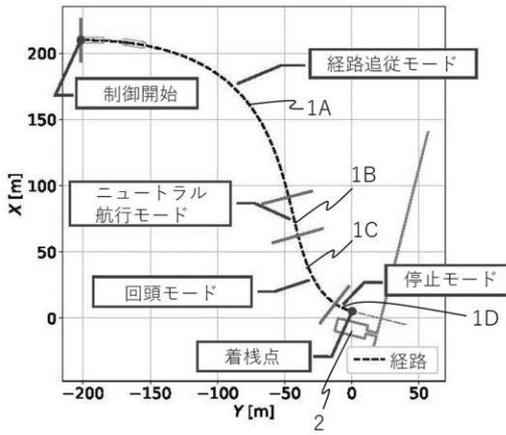
【図5】



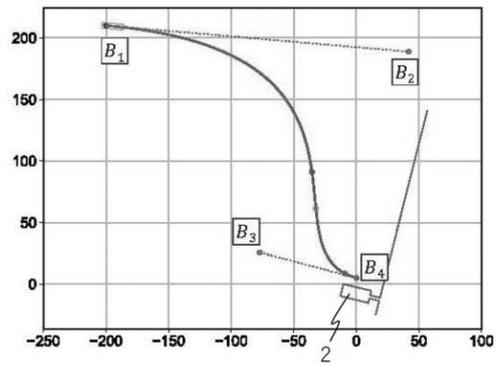
【図6】



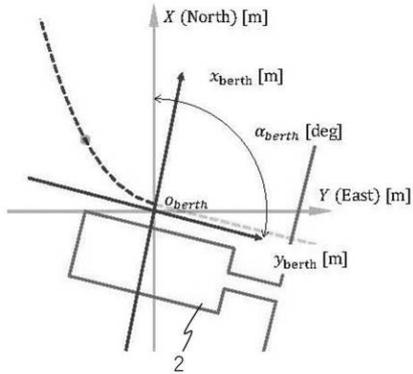
【図7】



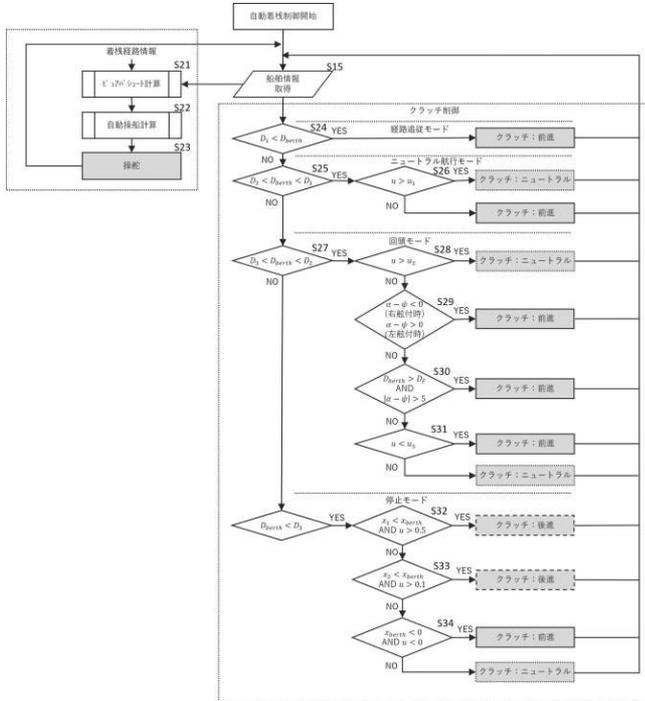
【図9】



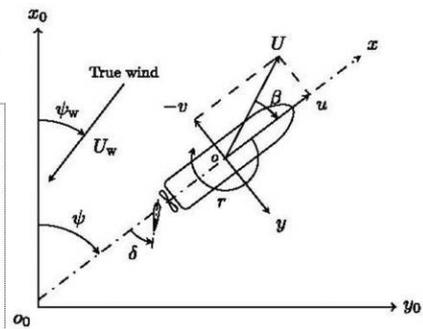
【図8】



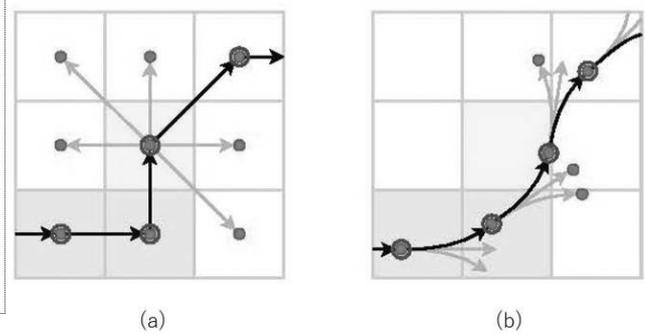
【図10】



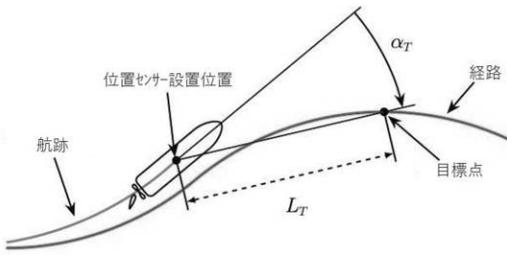
【図11】



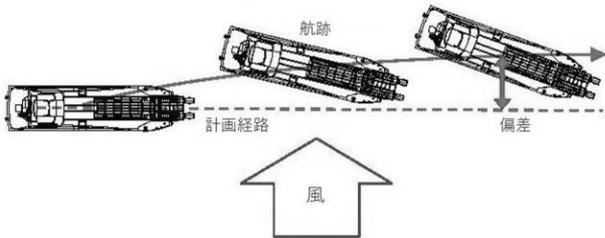
【図12】



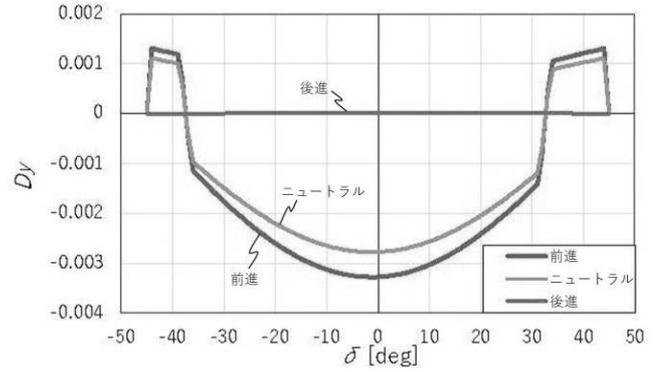
【図13】



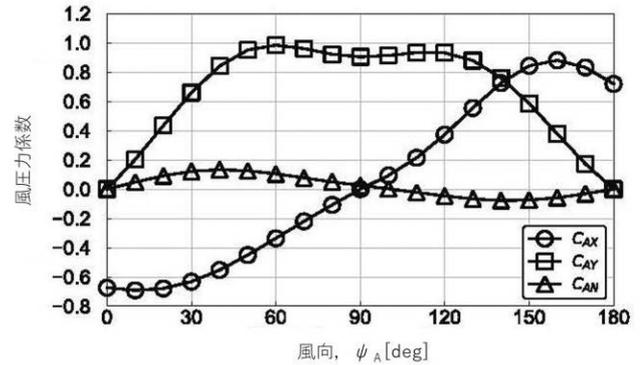
【図14】



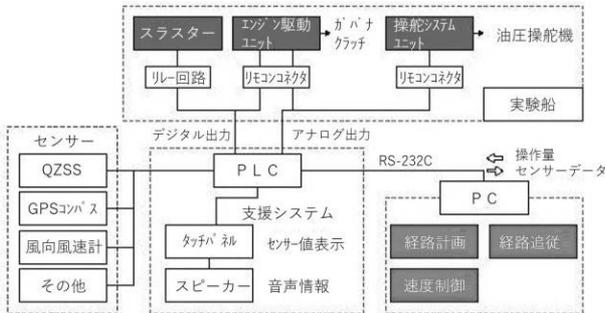
【図15】



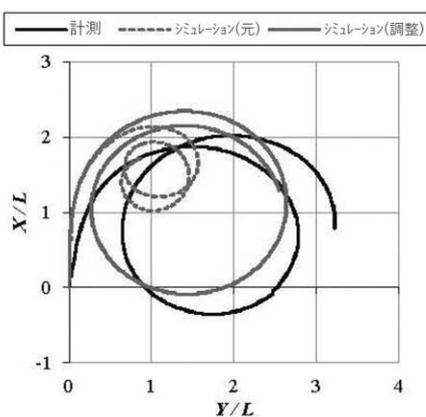
【図16】



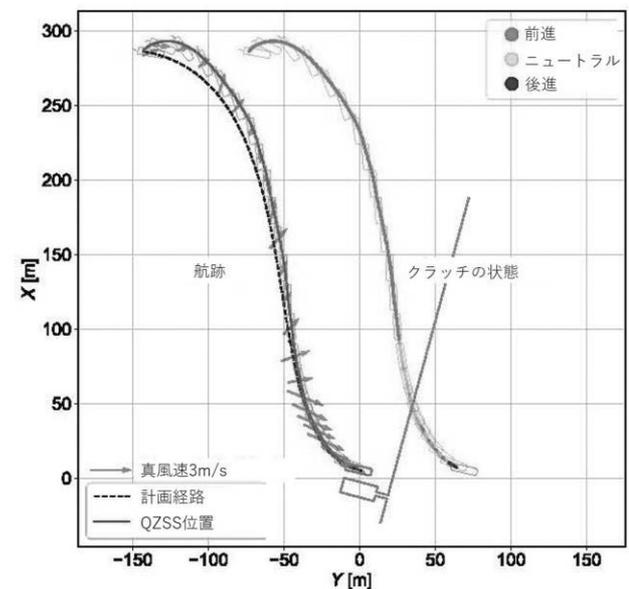
【図17】



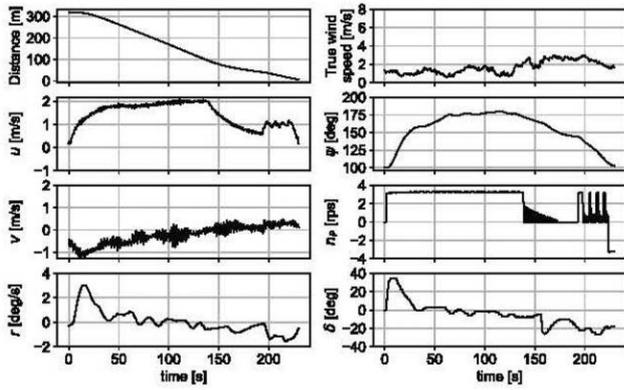
【図18】



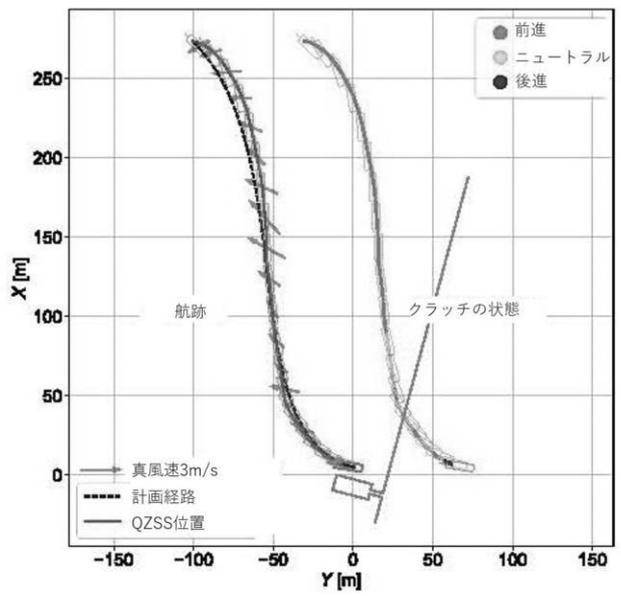
【図19】



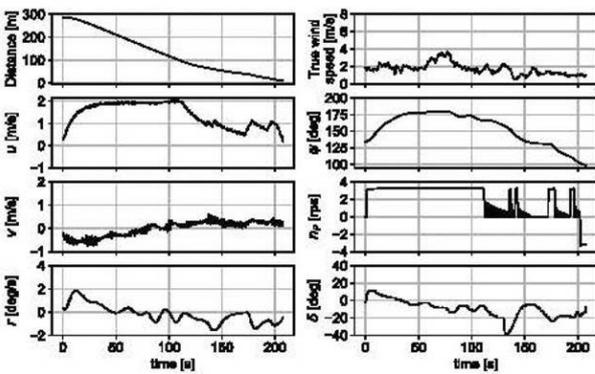
【 図 2 0 】



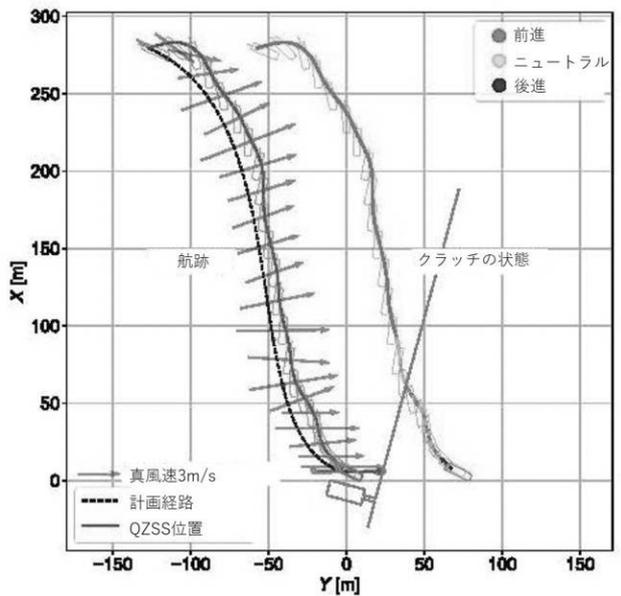
【 図 2 1 】



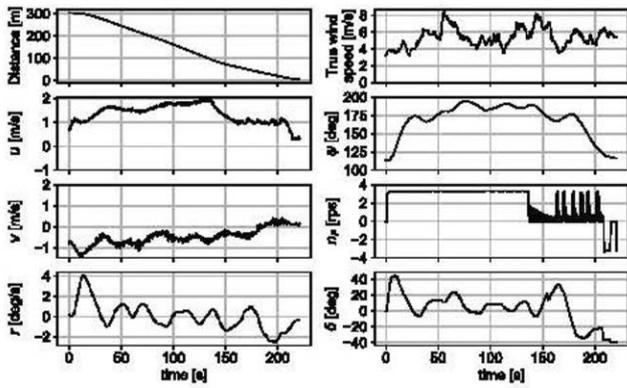
【 図 2 2 】



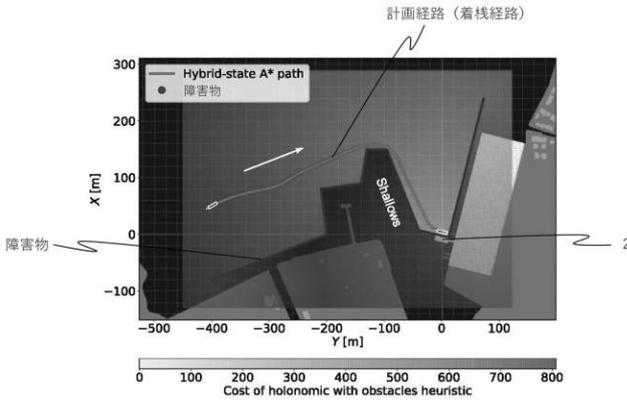
【 図 2 3 】



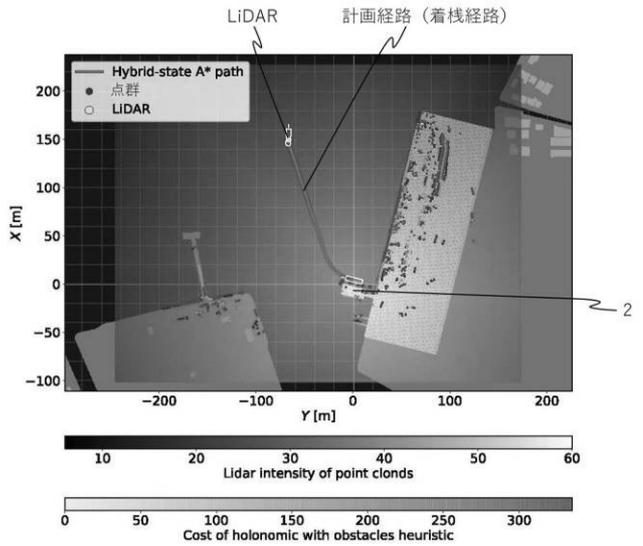
【 図 2 4 】



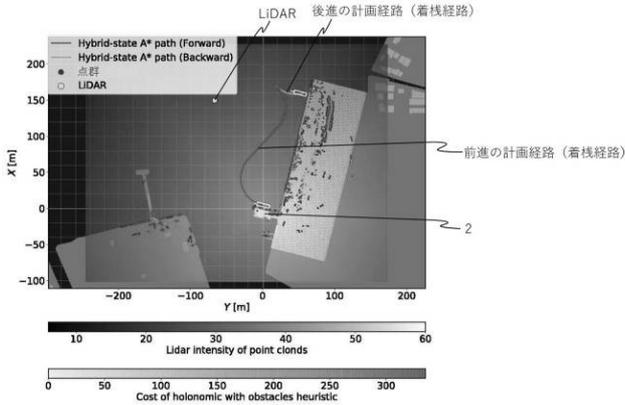
【 図 2 5 】



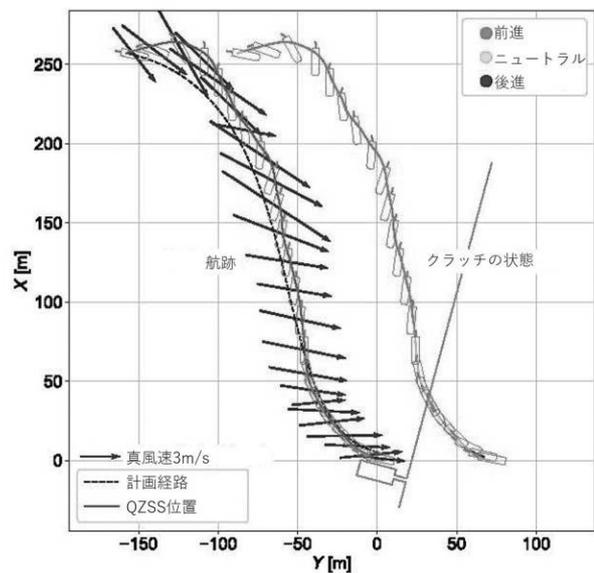
【 図 2 6 】



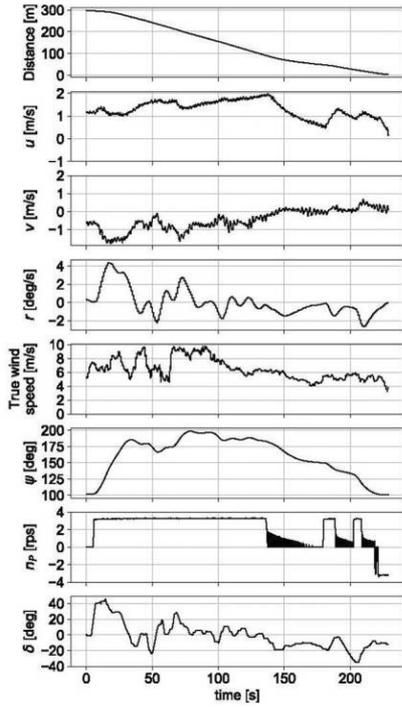
【 図 2 7 】



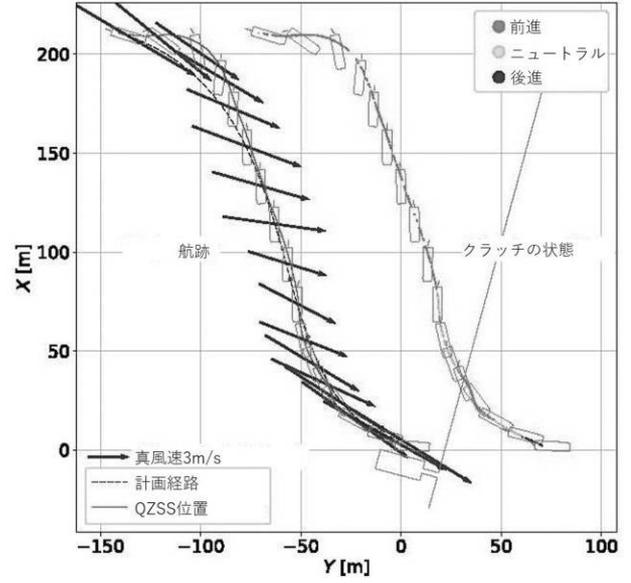
【 図 2 8 】



【 29 】



【 30 】



【 31 】

