

(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2025-68999  
(P2025-68999A)

(43)公開日

令和7年4月30日(2025. 4. 30)

(51)Int. Cl.	F I	テーマコード(参考)
<i>B 6 3 H 25/42 (2006. 01)</i>	B 6 3 H 25/42	5 H 0 0 4
<i>B 6 3 J 99/00 (2009. 01)</i>	B 6 3 J 99/00	5 H 3 0 1
<i>B 6 3 H 21/21 (2006. 01)</i>	B 6 3 H 21/21	
<i>G 0 5 B 13/00 (2006. 01)</i>	G 0 5 B 13/00	A
<i>G 0 5 D 1/611 (2024. 01)</i>	G 0 5 D 1/611	A

審査請求 未請求 請求項の数 19 OL (全 33 頁) 最終頁に続く

(21)出願番号 特願2023-179160(P2023-179160)  
(22)出願日 令和5年10月17日(2023. 10. 17)

(71)出願人 504196300  
国立大学法人東京海洋大学  
東京都港区港南4丁目5番7号  
(71)出願人 505374783  
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
茨城県那珂郡東海村大字舟石川765番地1  
(71)出願人 504194878  
国立研究開発法人海洋研究開発機構  
神奈川県横須賀市夏島町2番地15  
(74)代理人 100120031  
弁理士 宮嶋 学  
(74)代理人 100152205  
弁理士 吉田 昌司

最終頁に続く

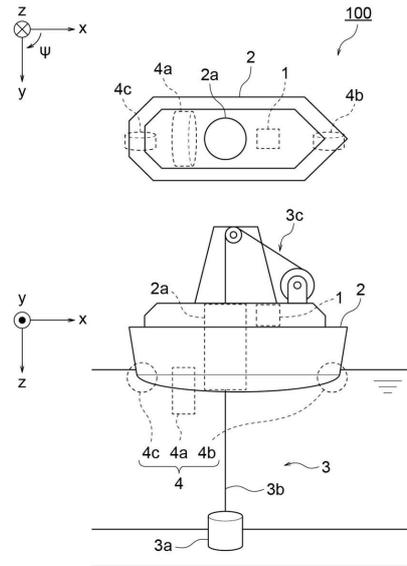
(54)【発明の名称】海洋ロボットの制御装置、海洋ロボット、海洋ロボットの制御方法、および海洋ロボットの制御プログラム

(57)【要約】

【課題】外乱が大きい場合であっても、海洋ロボットの位置を精度よく保持すること。

【解決手段】第1の推進器および第2の推進器を有する推進機構を備える海洋ロボットを制御する制御装置であって、海洋ロボットの目標位置および現在位置を含む位置情報を取得する情報取得部と、位置情報に基づいて切換関数を生成し、海洋ロボットの現在位置が目標位置に一致するようにスライディングモード制御を行うためのスライディングモード制御値を生成するスライディングモード制御部と、位置情報および切換関数に基づいて、海洋ロボットの現在位置が目標位置に一致するようにニューラルネットワーク制御を行うためのニューラルネットワーク制御値を生成するニューラルネットワーク制御部と、スライディングモード制御値およびニューラルネットワーク制御値に基づいて推進機構に入力される制御入力を生成する制御入力生成部とを備える。

【選択図】図1



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

第 1 の推進方向の推力を発生する第 1 の推進器と、前記第 1 の推進方向と異なる第 2 の推進方向の推力を発生する第 2 の推進器とを有する推進機構を備える海洋ロボットを制御する制御装置であって、

前記海洋ロボットの目標位置および現在位置を含む位置情報を取得する情報取得部と、

前記位置情報に基づいて切換関数を生成し、前記海洋ロボットの現在位置が前記目標位置に一致するようにスライディングモード制御を行うためのスライディングモード制御値を生成するスライディングモード制御部と、

前記位置情報および前記切換関数に基づいて、前記海洋ロボットの現在位置が前記目標位置に一致するようにニューラルネットワーク制御を行うためのニューラルネットワーク制御値を生成するニューラルネットワーク制御部と、

前記スライディングモード制御値および前記ニューラルネットワーク制御値に基づいて前記推進機構に入力される制御入力を生成する制御入力生成部と、

を備える、海洋ロボットの制御装置。

**【請求項 2】**

前記スライディングモード制御値は、スライディングモード制御における切換入力であり、

前記ニューラルネットワーク制御値は、前記切換入力に対する補正入力であり、

前記制御入力は、前記スライディングモード制御値と前記ニューラルネットワーク制御値の和である、請求項 1 に記載の制御装置。

**【請求項 3】**

前記ニューラルネットワーク制御値の絶対値の上限値は、前記スライディングモード制御値の絶対値の上限値以下である、請求項 2 に記載の制御装置。

**【請求項 4】**

前記ニューラルネットワーク制御値の絶対値の上限値は時間変化する、請求項 3 に記載の制御装置。

**【請求項 5】**

前記ニューラルネットワーク制御値の絶対値の上限値は、前記海洋ロボットが前記目標位置を中心とする所定の範囲内にある場合、前記スライディングモード制御値の絶対値の上限値に近づける、請求項 4 に記載の制御装置。

**【請求項 6】**

前記ニューラルネットワーク制御部は、前記切換関数に基づいて重み付けが更新されるニューラルネットワークを備える、請求項 1 に記載の制御装置。

**【請求項 7】**

前記ニューラルネットワークは、入力層、1つの中間層、および出力層の3つの層からなる、請求項 6 に記載の制御装置。

**【請求項 8】**

前記位置情報と、前記切換関数の時間微分とに基づいて、前記海洋ロボットの現在位置が前記目標位置に一致するようにニューラルネットワーク制御を行うための第 2 のニューラルネットワーク制御値を生成する第 2 のニューラルネットワーク制御部をさらに備え、

前記制御入力生成部は、前記スライディングモード制御値、前記ニューラルネットワーク制御値、および前記第 2 のニューラルネットワーク制御値に基づいて前記制御入力を生成する、請求項 1 に記載の制御装置。

**【請求項 9】**

前記スライディングモード制御値は、スライディングモード制御における切換入力であり、

前記ニューラルネットワーク制御値は前記切換入力に対する補正入力であり、

前記第 2 のニューラルネットワーク制御値は前記切換入力に対する第 2 の補正入力であ

10

20

30

40

50

り、

前記制御入力は、前記スライディングモード制御値、前記ニューラルネットワーク制御値、および前記第2のニューラルネットワーク制御値の和である、請求項8に記載の制御装置。

【請求項10】

前記ニューラルネットワーク制御値の絶対値の上限値、および、前記第2のニューラルネットワーク制御値の絶対値の上限値は、いずれも前記スライディングモード制御値の絶対値の上限値以下である、請求項9に記載の制御装置。

【請求項11】

前記第2のニューラルネットワーク制御部は、前記切換関数の前記時間微分に基づいて重み付けが更新される第2のニューラルネットワークを備える、請求項8に記載の制御装置。

10

【請求項12】

前記第2のニューラルネットワークは、入力層、1つの中間層、および出力層の3つの層からなるニューラルネットワークである、請求項11に記載の制御装置。

【請求項13】

前記情報取得部は、前記海洋ロボットの目標角度および現在角度を含む角度情報をさらに取得し、

前記スライディングモード制御部は、前記角度情報に基づいて切換関数を生成し、前記海洋ロボットの現在角度が前記目標角度に一致するようにスライディングモード制御を行うためのスライディングモード制御値を生成し、

20

前記制御入力生成部は、前記スライディングモード制御値に基づいて前記推進機構に入力される制御入力を生成する、

請求項1に記載の制御装置。

【請求項14】

前記制御装置は、

前記制御入力生成部の動作を選択する動作選択部であって、

前記海洋ロボットの前記目標角度と前記現在角度との差分が所定の値よりも大きい場合、前記制御入力生成部が前記制御入力として前記海洋ロボットの角度に関する制御入力を生成することを選択し、

30

前記差分が前記所定の値以下である場合、前記制御入力生成部が前記制御入力として前記海洋ロボットの位置に関する制御入力を生成することを選択する、動作選択部

をさらに備える、請求項13に記載の制御装置。

【請求項15】

前記第1の推進方向と前記第2の推進方向は、互いに直交する、請求項1に記載の制御装置。

【請求項16】

前記海洋ロボットは、自動水上航行体であり、

前記推進機構の前記第1の推進器は、前記自動水上航行体の前後方向の推力を発生し、前記第2の推進器は、前記自動水上航行体の左右方向の推力を発生する、請求項15に記載の制御装置。

40

【請求項17】

請求項1～16のいずれかに記載の制御装置と、

前記現在位置を検出する検出部と、

前記制御装置により生成された前記制御入力に基づいて前記推進機構を駆動する駆動部と、

を備える、海洋ロボット。

【請求項18】

第1の推進方向の推力を発生する第1の推進器と、前記第1の推進方向と異なる第2の推進方向の推力を発生する第2の推進器とを有する推進機構を備える海洋ロボットを制御

50

する制御方法であって、

前記海洋ロボットの目標位置および現在位置を含む位置情報を取得するステップと、

前記位置情報に基づいて切換関数を生成し、前記海洋ロボットの現在位置が前記目標位置に一致するようにスライディングモード制御を行うためのスライディングモード制御値を生成するステップと、

前記位置情報および前記切換関数に基づいて、前記海洋ロボットの現在位置が前記目標位置に一致するようにニューラルネットワーク制御を行うためのニューラルネットワーク制御値を生成するステップと、

前記スライディングモード制御値および前記ニューラルネットワーク制御値に基づいて前記推進機構に入力される制御入力を生成するステップと、

を備える、海洋ロボットの制御方法。

【請求項 19】

コンピュータに請求項 18 に記載の方法を実行させる、海洋ロボットの制御プログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、海洋ロボットの制御装置、海洋ロボット、海洋ロボットの制御方法、および海洋ロボットの制御プログラムに関する。

【背景技術】

【0002】

海底の調査を省力的かつ効率的に行うために、様々な海洋ロボットが用いられている。海洋ロボットとして、自動水上航行体 (Autonomous Surface Vehicle: ASV)、遠隔操作型無人潜水機 (Remotely Operated Vehicle: ROV)、自律型無人潜水機 (Autonomous Underwater Vehicle: AUV) 等が知られている。海底の泥等を採取し、泥に含まれる放射線の量を測定する場合、ASV が用いられる。この場合は、たとえば、ASV を海上の目標位置に移動させ、ケーブル (光ファイバケーブル等の通信ケーブル) に接続された採泥器を海底まで投下して泥等を採取する。

【0003】

なお、特許文献 1 には、浮体式リグを掘削ライザーにとって最適の位置に位置保持制御することを目的とした制御装置が記載されている。この制御装置では、予め掘削ライザーの挙動特性に伴う浮体式リグの位置情報をニューラルネットワークに学習させておき、掘削ライザーの上下端傾斜角を検出してニューラルネットワークに入力することにより浮体式リグの現在位置修正情報を出力させ、当該位置情報に基づき浮体式リグをライザー上下端傾斜角が小さくなる位置に駆動制御する。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献 1】特開 2000 - 289688 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

海底の泥等を安定して採取するには、自動水上航行体の位置および角度について、細かな定点保持が必要である。なぜなら、自動水上航行体の位置が海底に投下された採泥器等の投下物の上方から大きく外れてしまうと、投下物が海中で転倒するおそれがあるからである。また、自動水上航行体が大きく回転してしまうと、ケーブルが擦れ、破断するおそれがある。

【0006】

従来、自動水上航行体の位置および角度の保持には、スライディングモード制御が用いられている。スライディングモード制御は、モデル誤差や外乱の影響を受けにくいという

10

20

30

40

50

特徴がある。しかしながら、風が強い、波が速い等の環境においては自動水上航行体が受ける外乱が大きいため、その運動特性は大きく変化する。したがって、固定の制御パラメータを用いるスライディングモード制御では、自動水上航行体の定点保持を行うことが困難であった。

【 0 0 0 7 】

本発明は上記の認識に基づいてなされたものであり、外乱が大きい場合であっても、海洋ロボット的位置を精度よく保持することができる海洋ロボットの制御装置、海洋ロボット、海洋ロボットの制御方法、および海洋ロボットの制御プログラムを提供することである。

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 0 8 】

本発明に係る海洋ロボットの制御装置は、

第1の推進方向の推力を発生する第1の推進器と、前記第1の推進方向と異なる第2の推進方向の推力を発生する第2の推進器とを有する推進機構を備える海洋ロボットを制御する制御装置であって、

前記海洋ロボットの目標位置および現在位置を含む位置情報を取得する情報取得部と、前記位置情報に基づいて切換関数を生成し、前記海洋ロボットの現在位置が前記目標位置に一致するようにスライディングモード制御を行うためのスライディングモード制御値を生成するスライディングモード制御部と、

前記位置情報および前記切換関数に基づいて、前記海洋ロボットの現在位置が前記目標位置に一致するようにニューラルネットワーク制御を行うためのニューラルネットワーク制御値を生成するニューラルネットワーク制御部と、

前記スライディングモード制御値および前記ニューラルネットワーク制御値に基づいて前記推進機構に入力される制御入力を生成する制御入力生成部と、

を備えることを特徴とする。

【 0 0 0 9 】

また、前記制御装置において、

前記スライディングモード制御値は、スライディングモード制御における切換入力であり、

前記ニューラルネットワーク制御値は、前記切換入力に対する補正入力であり、

前記制御入力は、前記スライディングモード制御値と前記ニューラルネットワーク制御値の和であるようにしてもよい。

【 0 0 1 0 】

また、前記制御装置において、

前記ニューラルネットワーク制御値の絶対値の上限値は、前記スライディングモード制御値の絶対値の上限値以下であるようにしてもよい。

【 0 0 1 1 】

また、前記制御装置において、

前記ニューラルネットワーク制御値の絶対値の上限値は時間変化するようにしてもよい。

【 0 0 1 2 】

また、前記制御装置において、

前記ニューラルネットワーク制御値の絶対値の上限値は、前記海洋ロボットが前記目標位置を中心とする所定の範囲内にある場合、前記スライディングモード制御値の絶対値の上限値に近づけるようにしてもよい。

【 0 0 1 3 】

また、前記制御装置において、

前記ニューラルネットワーク制御部は、前記切換関数に基づいて重み付けが更新されるニューラルネットワークを備えるようにしてもよい。

【 0 0 1 4 】

また、前記制御装置において、  
前記ニューラルネットワークは、入力層、1つの中間層、および出力層の3つの層からなるようにしてもよい。

【0015】

また、前記制御装置において、  
前記位置情報と、前記切換関数の時間微分とに基づいて、前記海洋ロボットの現在位置が前記目標位置に一致するようにニューラルネットワーク制御を行うための第2のニューラルネットワーク制御値を生成する第2のニューラルネットワーク制御部をさらに備え、  
前記制御入力生成部は、前記スライディングモード制御値、前記ニューラルネットワーク制御値、および前記第2のニューラルネットワーク制御値に基づいて前記制御入力を生成するようにしてもよい。

10

【0016】

また、前記制御装置において、  
前記スライディングモード制御値は、スライディングモード制御における切換入力であり、  
前記ニューラルネットワーク制御値は前記切換入力に対する補正入力であり、  
前記第2のニューラルネットワーク制御値は前記切換入力に対する第2の補正入力であり、  
前記制御入力は、前記スライディングモード制御値、前記ニューラルネットワーク制御値、および前記第2のニューラルネットワーク制御値の和であるようにしてもよい。

20

【0017】

また、前記制御装置において、  
前記ニューラルネットワーク制御値の絶対値の上限値、および、前記第2のニューラルネットワーク制御値の絶対値の上限値は、いずれも前記スライディングモード制御値の絶対値の上限値以下であるようにしてもよい。

【0018】

また、前記制御装置において、  
前記第2のニューラルネットワーク制御部は、前記切換関数の前記時間微分に基づいて重み付けが更新される第2のニューラルネットワークを備えるようにしてもよい。

【0019】

30

また、前記制御装置において、  
前記第2のニューラルネットワークは、入力層、1つの中間層、および出力層の3つの層からなるニューラルネットワークであるようにしてもよい。

【0020】

また、前記制御装置において、  
前記情報取得部は、前記海洋ロボットの目標角度および現在角度を含む角度情報をさらに取得し、  
前記スライディングモード制御部は、前記角度情報に基づいて切換関数を生成し、前記海洋ロボットの現在角度が前記目標角度に一致するようにスライディングモード制御を行うためのスライディングモード制御値を生成し、  
前記制御入力生成部は、前記スライディングモード制御値に基づいて前記推進機構に入力される制御入力を生成するようにしてもよい。

40

【0021】

また、前記制御装置において、  
前記制御装置は、  
前記制御入力生成部の動作を選択する動作選択部であって、  
前記海洋ロボットの前記目標角度と前記現在角度との差分が所定の値よりも大きい場合、前記制御入力生成部が前記制御入力として前記海洋ロボットの角度に関する制御入力を生成することを選択し、  
前記差分が前記所定の値以下である場合、前記制御入力生成部が前記制御入力として前

50

記海洋ロボットの位置に関する制御入力を生成することを選択する、動作選択部をさらに備えるようにしてもよい。

【0022】

また、前記制御装置において、前記第1の推進方向と前記第2の推進方向は、互いに直交するようにしてもよい。

【0023】

また、前記制御装置において、前記海洋ロボットは、自動水上航行体であり、前記推進機構の前記第1の推進器は、前記自動水上航行体の前後方向の推力を発生し、前記第2の推進器は、前記自動水上航行体の左右方向の推力を発生するようにしてもよい。

10

【0024】

本発明に係る海洋ロボットは、前記制御装置と、前記現在位置を検出する検出部と、前記制御装置により生成された前記制御入力に基づいて前記推進機構を駆動する駆動部と、を備えることを特徴とする。

【0025】

本発明に係る海洋ロボットの制御方法は、第1の推進方向の推力を発生する第1の推進器と、前記第1の推進方向と異なる第2の推進方向の推力を発生する第2の推進器とを有する推進機構を備える海洋ロボットを制御する制御方法であって、前記海洋ロボットの目標位置および現在位置を含む位置情報を取得するステップと、前記位置情報に基づいて切換関数を生成し、前記海洋ロボットの現在位置が前記目標位置に一致するようにスライディングモード制御を行うためのスライディングモード制御値を生成するステップと、前記位置情報および前記切換関数に基づいて、前記海洋ロボットの現在位置が前記目標位置に一致するようにニューラルネットワーク制御を行うためのニューラルネットワーク制御値を生成するステップと、前記スライディングモード制御値および前記ニューラルネットワーク制御値に基づいて前記推進機構に入力される制御入力を生成するステップと、を備えることを特徴とする。

20

30

【0026】

本発明に係る海洋ロボットの制御プログラムは、コンピュータに前記制御方法を実行させることを特徴とする。

【発明の効果】

【0027】

本発明に係る制御装置によれば、外乱が大きい場合であっても、海洋ロボットの位置を精度よく保持することができる。

40

【図面の簡単な説明】

【0028】

【図1】実施形態に係る海洋システムの上面および側面から見た概略的な構成図である。

【図2A】実施形態に係る船体の前後方向の推進を表す図である。

【図2B】実施形態に係る船体の左右方向の推進を表す図である。

【図2C】実施形態に係る船体の角度方向の推進を表す図である。

【図3】実施形態に係る制御装置の機能ブロック図である。

【図4】第1の実施形態に係る処理部の機能ブロック図である。

【図5】第1の実施形態に係る処理部の動作を表すフローチャートである。

【図6】 $x$ -NNの一例を表す図である。

50

【図 7 A】第 1 の実施形態に係る位置制御のシミュレーション結果を表す図である。

【図 7 B】比較例に係る位置制御のシミュレーション結果を表す図である。

【図 8】第 2 の実施形態に係る処理部の機能ブロック図である。

【図 9】第 2 の実施形態に係る処理部の動作を表すフローチャートである。

【図 10】 $\times$ -NN の一例を表す図である。

【図 11】第 2 の実施形態に係る位置制御のシミュレーション結果を表す図である。

【図 12】第 1 の実施形態、第 2 の実施形態、および比較例に係る船体の位置制御についての解析結果を表す図である。

【図 13】第 2 の実施形態に係る位置制御の海域試験の結果を表す図である。

【図 14】第 2 の実施形態に係る位置制御の海域試験の解析結果を表す図である。

10

【発明を実施するための形態】

【0029】

以下、本発明に係る実施形態について図面を参照しながら説明する。第 1 の実施形態に係る制御装置は、切換関数に基づくニューラルネットワークを備えたものであり、第 2 の実施形態に係る制御装置は、当該ニューラルネットワークに加えて、切換関数の時間微分に基づくニューラルネットワークをさらに備えたものである。

【0030】

なお、各図においては、同等の機能を有する構成要素に同一の符号を付している。また、本明細書において用いる、幾何学的条件およびそれらの程度を特定する、たとえば、「直交」等の用語等については、厳密な意味に縛られることなく、同様の機能を期待し得る程度の範囲を含めて解釈することとする。

20

【0031】

(第 1 の実施形態)

図 1 は、第 1 の実施形態に係る海洋システム 100 の上面および側面から見た概略的な構成図である。海洋システム 100 は、海底の泥等を採取するための採泥システムとして構成されている。

【0032】

本実施形態に係る海洋システム 100 は、図 1 に示すように、船体 (ASV) 2 と、船体 2 に接続された採泥機構 3 とを備えている。なお、以下の説明は、主に ASV の定点保持に関するものであるが、本実施形態は、他の海洋ロボット、たとえば ROV、AUV の定点保持にも適用可能である。

30

【0033】

制御装置 1 は、船体 2 の位置および角度を制御する装置である。後で詳しく説明するように、本実施形態に係る制御装置 1 は、スライディングモード制御およびニューラルネットワーク制御に基づいて推進機構 4 を制御することで、船体 2 の位置および角度について定点保持を行う。

【0034】

船体 2 は、制御装置 1 および推進機構 4 を含む自動水上航行体である。船体 2 の中央部分には、採泥器 3 a の投下および引き上げを行うための貫通孔であるムーンプール 2 a が設けられている。

40

【0035】

採泥機構 3 は、船体 2 に設けられた採泥装置の一式である。図 1 に示すように、採泥機構 3 は、採泥器 3 a と、光ファイバケーブル 3 b と、ウインチ 3 c とを備える。

【0036】

採泥器 3 a は、水中に投下され、海底の泥等の採取を行う。また、採泥器 3 a は、放射線測定器やカメラなどを搭載しており、採取した泥に含まれる放射線量の測定なども行う。

【0037】

光ファイバケーブル 3 b は、採泥器 3 a を船体 2 と物理的に接続しつつ、採泥器 3 a とのリアルタイム通信を行うためのケーブルである。光ファイバケーブル 3 b は、採泥器 3

50

aを吊り下げるための十分な強度を備えている。採泥器3 aは、この光ファイバケーブル3 bを介して制御される。この制御には、たとえば制御装置1または制御装置1とは別の図示しない制御装置が用いられ、当該制御装置は、光ファイバケーブル3 bを介して採泥器3 aの動作を制御するための信号を送信したり、採泥器3 aが採取した泥に含まれる放射線量、カメラにより撮像された画像などの情報を取得したりする。なお、光ファイバケーブル3 bに代えて、金属線などの通信ケーブルが用いられてもよい。

【0038】

ウインチ3 cは、光ファイバケーブル3 bを介して採泥器3 aの投下および引き上げを行う。採泥器3 aの投下および引き上げは、ムーンプール2 aを経由して行われる。

【0039】

なお、海洋システム100は、採泥機構3に代えて、海底資源を得るための掘削機などを備えてもよい。

【0040】

推進機構4は、船体2を水上で推進させるための機構である。推進機構4は、スラスト、ウォータージェットなどにより構成される。図1に示すように、本実施形態に係る推進機構4は、メインスラスト4 a、船首スラスト4 b、および船尾スラスト4 cを備える。

【0041】

メインスラスト4 aは、船体2の中央部分に設けられ、船体2を前後方向に移動させるための推力を発生する。船首スラスト4 bは、船体2の船首部分に設けられ、船体2を左右方向に移動させるための推力を発生する。船尾スラスト4 cは、船体2の船尾部分に設けられ、船体2を左右方向に移動させるための推力を発生する。なお、メインスラスト4 aは、第1の推進方向の推力を発生する第1の推進器の一例であり、船首スラスト4 bおよび船尾スラスト4 cは、それぞれ、第2の推進方向の推力を発生する第2の推進器の一例である。本実施形態では、第1の推進方向および第2の推進方向は直交する。なお、第1の推進方向および第2の推進方向は、直交以外の互いに異なる方向であってもよい。また、以下の説明において、特に区別しない場合は、メインスラスト4 a、船首スラスト4 b、および船尾スラスト4 cを、単に、スラスト4 a、スラスト4 b、およびスラスト4 cと呼ぶこともある。

【0042】

本実施形態に係る推進機構4は、スラスト4 a、4 b、4 cを組み合わせて駆動することにより、船体2を前後方向、左右方向、および角度方向へ推進させることが可能である。前後方向の推進（直進モード）については、図2 Aを参照して説明する。左右方向の推進（かに歩きモード）については、図2 Bを参照して説明する。角度方向の推進（角度制御モード）については、図2 Cを参照して説明する。

【0043】

ここで、角度方向の推進とは、船体2の旋回のことをいう。以下、図1に示すように、船体2の前後方向を、船体2の船首側を正の方向としてx方向と定義し、船体2の左右方向を、船体2の右側を正の方向としてy方向と定義し、x方向およびy方向に直交する方向、すなわち船体2の上下方向を、下向きを正の方向としてz方向と定義する。また、xy平面における回転方向、すなわち船体2の角度方向を、+x方向から+y方向への回転方向を正の方向として方向と定義する。なお、方向は、いわゆるヨー方向である。

【0044】

図2 Aは、本実施形態に係る船体2の前後方向（ここでは、+x方向）の推進（直進モード）を表す図である。図2 Aに示すように、推進機構4によって船体2を+x方向へ推進させる場合、スラスト4 aによってa1方向の推力を発生させ、スラスト4 bおよびスラスト4 cを停止する。これにより、船体2に+x方向の推力が与えられる。なお、図示しないが、船体2を-x方向へ推進させる場合、スラスト4 aによってa1方向と反対の方向の推力を発生させ、スラスト4 bおよびスラスト4 cを停止する。

【0045】

図2 Bは、本実施形態に係る船体2の左右方向（ここでは、+y方向）の推進（かに歩

10

20

30

40

50

きモード)を表す図である。図2Bに示すように、推進機構4によって船体2を+y方向へ推進させる場合、スラスト4aを停止し、スラスト4bによってb1方向の推力を発生させ、かつ、スラスト4cによってb1方向と同じ向きであるc1方向の推力を発生させる。これにより、船体2に+y方向の推力が与えられる。なお、図示しないが、船体2を-y方向へ推進させる場合、スラスト4aを停止し、スラスト4bによってb1方向と反対の方向の推力を発生させ、かつ、スラスト4cによってc1方向と反対の方向の推力を発生させる。これにより、船体2を、かに歩きのように+y方向(または-y方向)に推進させることができる。

【0046】

図2Cは、本実施形態に係る船体2の角度方向(ここでは、+方向)の推進(角度制御モード)を表す図である。図2Cに示すように、推進機構4によって船体2を+方向へ推進させる場合、スラスト4aを停止し、スラスト4bによってb1方向の推力を発生させ、スラスト4cによってb1と反対方向であるc2方向の推力を発生させる。これにより、船体2に対して+方向の推力が発生する。なお、図示しないが、船体2を-方向へ推進させる場合、スラスト4aを停止し、スラスト4bによってb1方向と反対の方向の推力を発生させ、スラスト4cによってc2方向と反対の方向の推力を発生させる。

【0047】

このように、本実施形態に係る推進機構4は、船体2を前後方向、左右方向、および角度方向へ推進させることが可能である。したがって、推進機構4は、水上における任意の方向に船体2を推進させることが可能である。これらの制御を組み合わせてもよい。たとえば、直進モードと角度制御モードを用いることで、通常の船と同じ制御(WP制御)を行うことが可能である。また、直進モードとかに歩きモードを用いることで、船首角度を保持したまま、x方向またはy方向に移動する制御(DP制御)を行うことが可能である。なお、DP制御の際に目標角度から大きくずれた場合、角度制御モードを行ってもよい。本願によれば、ブロック対角化(本明細書の末尾に記載)により、制御モードを組み合わせただけの場合においても、制御の複雑化を回避することができる。

【0048】

なお、海洋システム100が船体(ASV)2に代えて、水中で移動するROVを備える場合、推進機構4は、たとえば、前後方向、左右方向および上下方向に当該ROVを推進するように構成される。

【0049】

<制御装置>

次に、制御装置1について説明する。

【0050】

本実施形態に係る制御装置1は、船体2の位置および角度を制御する。より詳しくは、制御装置1は、スライディングモード制御およびニューラルネットワーク制御に基づいて推進機構4を制御することにより、船体2の現在の位置である現在位置を、目標となる目標位置に一致するように制御する。目標位置は、たとえば採泥器3aが投下される位置の真上である。また、制御装置1は、スライディングモード制御に基づいて推進機構4を制御することにより、船体2の現在の角度である現在角度を、目標となる目標角度に一致するように制御する。目標角度は、たとえば風向と同じ角度である。

【0051】

図3は、本実施形態に係る制御装置1の機能ブロック図である。図3に示すように、制御装置1は、処理部10と、検出部20と、スラスト駆動部30と、記憶部40と、入力インタフェース50と、通信部60とを備えて構成されている。

【0052】

処理部10は、後で詳しく説明するように、スライディングモード制御およびニューラルネットワーク制御を行うための一連の演算処理を行うプロセッサである。

【0053】

検出部20は、船体2の現在の位置および角度を検出するように構成され、たとえば、

10

20

30

40

50

全地球測位システム（Global Positioning System：GPS）および慣性計測装置（Inertial Measurement Unit：IMU）などを備える。なお、検出部20は、さらに速度計を備え、船体2の現在の速度および角速度を検出してよい。また、検出部20は、さらに風向センサを備え、現在の風向、すなわち風が吹いてくる方向を検出してよい。

【0054】

スラスト駆動部30は、推進機構4のスラスト4a, 4b, 4cを駆動する。たとえば、スラスト駆動部30は、スラスト4a, 4b, 4cにそれぞれ接続された複数のインバータを備え、これらのインバータをPWM制御することによってスラスト4a, 4b, 4cを駆動する。本実施形態に係るスラスト駆動部30は、処理部10が生成した制御入力を推進機構4に入力する。スラスト4a, 4b, 4cの駆動力は、この制御入力の値によって調整される。

10

【0055】

記憶部40は、半導体メモリ、ハードディスクドライブ、光ディスク等から構成される。記憶部40は、たとえば、処理部10で実行されるプログラムや、船体2の目標位置および目標角度、検出部20によって検出された船体2の位置および角度の履歴、後述する切換関数の履歴を記憶する。

【0056】

入力インタフェース50は、オペレータからの入力を受け付けるインタフェースであり、受け付けた入力操作を電気信号に変換して処理部10に出力する。たとえば、入力インタフェース50は、オペレータから、後述する動作選択部15における動作選択に関する指示を受け付けたり、ウインチ3cを動作する指示を受け付けたりする。入力インタフェース50は、たとえば、ジョイスティックである。ジョイスティックには、スイッチ、ボタンが設けられてもよい。なお、入力インタフェース50は、これに限定されず、マウス、キーボード、タッチパネル、スイッチ、ボタンなどによって実現されてもよい。

20

【0057】

通信部60は、制御装置1と外部の装置（陸上または船舶に配置された制御装置）との情報のやりとりを行う。たとえば、通信部60は、船体2の目標位置および目標角度を表す情報を受信する。あるいは、通信部60は、動作選択部15における動作選択に関する信号を外部装置から受信してもよい。

【0058】

< 処理部 >

次に、処理部10について詳しく説明する。

【0059】

図4は、本実施形態に係る処理部10の機能ブロック図である。図4に示すように、処理部10は、情報取得部11と、状態変数生成部12と、SM制御部13と、-NN制御部14と、動作選択部15と、制御入力生成部16とを備える。

【0060】

なお、処理部10の各部は、コンピュータによって実行可能なプログラムの形で記憶部40に記憶されている。換言すると、処理部10は、記憶部40から当該プログラムを読み出して実行することにより、情報取得部11、状態変数生成部12、SM制御部13、-NN制御部14、動作選択部15、および制御入力生成部16の機能を実現する。

40

【0061】

また、本実施形態に係る処理部10は、1つのプロセッサで情報取得部11、状態変数生成部12、SM制御部13、-NN制御部14、動作選択部15、および制御入力生成部16の機能を実現するが、これに限られず、処理部10は、複数の独立したプロセッサの組み合わせによってこれらの機能を実現するものとしてもよい。たとえば、SM制御部13および-NN制御部14は、それぞれ、1つまたは複数のプロセッサによって構成されることで、並列に動作してもよい。

【0062】

情報取得部11は、船体2の位置情報および角度情報を取得する。ここで、船体2の位

50

置情報には、目標位置、現在位置、および位置の履歴が含まれ、船体 2 の角度情報には、目標角度、現在角度、および角度の履歴が含まれる。より詳しくは、情報取得部 1 1 は、記憶部 4 0 に記憶された船体 2 の目標位置および目標角度を取得する。また、情報取得部 1 1 は、検出部 2 0 によって検出された船体 2 の現在位置および現在角度を、サンプリング周期  $T_s$  ごとに取得する。本実施形態では、サンプリング周期  $T_s$  の値は、 $T_s = 100 \text{ ms}$  である。さらに、情報取得部 1 1 は、記憶部 4 0 に記憶された船体 2 の位置および角度の履歴を取得する。

【 0 0 6 3 】

なお、情報取得部 1 1 は、船体 2 の目標位置および目標角度の少なくとも一方を、通信部 6 0 から取得してもよい。また、サンプリング周期  $T_s$  の値は、 $100 \text{ ms}$  以外であってもよい。

【 0 0 6 4 】

状態変数生成部 1 2 は、情報取得部 1 1 によって取得された船体 2 の位置情報および角度情報に基づいて状態変数  $x_{st}$  を生成する。状態変数  $x_{st}$  は、スライディングモード制御に用いられる変数であり、位置、速度、角度、および角速度を各成分に有する。

【 0 0 6 5 】

S M 制御部 1 3 は、スライディングモード (Sliding Mode : S M) 制御のための演算を行う。図 4 に示すように、S M 制御部 1 3 は、切換関数生成部 1 3 1 と、S M 制御値生成部 1 3 2 とを備える。切換関数生成部 1 3 1 は、状態変数生成部 1 2 が生成した状態変数  $x_{st}$  から、スライディングモード制御のための切換関数  $h$  を生成する。S M 制御値生成部 1 3 2 は、切換関数  $h$  から、S M 制御値  $v_{sm}$  を生成する。このように、S M 制御部 1 3 は、船体 2 の位置情報および角度情報に基づいて切換関数  $h$  を生成し、生成された切換関数  $h$  に基づいて、船体 2 の現在位置が目標位置に一致し、船体 2 の現在角度が目標角度に一致するようにスライディングモード制御を行うための S M 制御値  $v_{sm}$  を生成する。本実施形態の S M 制御値  $v_{sm}$  は、スライディングモード制御における切換入力である。切換入力は、状態変数  $x_{st}$  を切換超平面に近づけるための入力であり、非線形制御入力の 1 つである。なお、S M 制御部 1 3 はスライディングモード制御部の一例であり、S M 制御値  $v_{sm}$  はスライディングモード制御値の一例である。

【 0 0 6 6 】

- N N 制御部 1 4 は、状態変数  $x_{st}$  および切換関数  $h$  に基づいたニューラルネットワーク (Neural Network : N N) 制御のための演算を行う。図 4 に示すように、- N N 制御部 1 4 は、- N N 1 4 1 と、- N N 制御値生成部 1 4 2 とを備える。- N N 制御部 1 4 は、ニューラルネットワーク制御部の一例である。

【 0 0 6 7 】

- N N 1 4 1 は、図 4 に示すように、 $x$  - N N 1 4 1 a および  $y$  - N N 1 4 1 b を備える。 $x$  - N N 1 4 1 a は、船体 2 の  $x$  方向すなわち前後方向の位置制御に関するニューラルネットワークであり、切換関数  $h$  の  $x$  成分である  $h_x$  の値が 0 になるように重み付けが更新される。 $y$  - N N 1 4 1 b は、船体 2 の  $y$  方向すなわち左右方向の位置制御に関するニューラルネットワークであり、切換関数  $h$  の  $y$  成分である  $h_y$  の値が 0 になるように重み付けが更新される。 $x$  - N N 1 4 1 a および  $y$  - N N 1 4 1 b は、それぞれニューラルネットワークの一例である。

【 0 0 6 8 】

また、重み付けが更新された後、 $x$  - N N 1 4 1 a は、状態変数  $x_{st}$  の  $x$  成分および  $h_x$  成分を入力し、 $x_{out}$  を出力する。同様に、重み付けが更新された後、 $y$  - N N 1 4 1 b は、状態変数  $x_{st}$  の  $y$  成分および  $h_y$  成分を入力し、 $y_{out}$  を出力する。

【 0 0 6 9 】

- N N 制御値生成部 1 4 2 は、 $x$  - N N 1 4 1 a の出力  $x_{out}$  および  $y$  - N N 1 4 1 b の出力  $y_{out}$  から、- N N 制御値  $v$  を生成する。- N N 制御値  $v$  は切換入力である S M 制御値  $v_{sm}$  に対する補正入力である。なお、- N N 制御値  $v$  は、ニューラルネットワーク制御値の一例である。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 7 0 】

このように、 $\theta$ -NN制御部14は、船体2の位置情報および切換関数に基づいて、船体2の現在位置が目標位置に一致するようにニューラルネットワーク制御を行うための $\theta$ -NN制御値 $v$ を生成する。

## 【 0 0 7 1 】

動作選択部15は、制御入力生成部16の動作を選択する。本実施形態に係る動作選択部15は、船体2の船首の向きと風向との差分、すなわち船体2の目標角度と現在角度との差分が、所定の値（たとえば $10^\circ$ ）よりも大きい場合、制御入力生成部16が制御入力として船体2の角度に関する制御入力を生成することを選択し、船体2の目標角度と現在角度との差分が当該所定の値以下である場合、制御入力生成部16が制御入力として船体2の位置に関する制御入力を生成することを選択する。なお、動作選択部15は、WP制御からDP制御（船首角度を保持したまま移動）への切り替え（またはその逆の切り替え）を自動で行ってもよい。たとえば、船体2が目標位置を中心とする所定の範囲（設定円）内にあるか否かに応じてWP制御とDP制御を切り替える。より具体的には、船体2が設定円の外から内に入った場合、動作選択部15はWP制御をDP制御に切り替え、反対に、船体2が設定円の内から外に出た場合、動作選択部15はDP制御をWP制御に切り替える。

10

## 【 0 0 7 2 】

制御入力生成部16は、SM制御値 $v_{SM}$ および $\theta$ -NN制御値 $v$ に基づいて、制御入力 $u_{in}$ を生成する。より詳しくは、船体2の角度を制御する場合、制御入力生成部16は、SM制御値 $v_{SM}$ に基づいて船体2の角度に関する制御入力 $u_{in}$ を生成する。船体2の位置を制御する場合、制御入力生成部16は、SM制御値 $v_{SM}$ および $\theta$ -NN制御値 $v$ に基づいて船体2の位置に関する制御入力 $u_{in}$ を生成する。

20

## 【 0 0 7 3 】

<スライディングモード制御>

ここで、スライディングモード制御の概要を説明する。

## 【 0 0 7 4 】

スライディングモード制御は、システムの挙動を切換超平面（ $(x_{st}) = 0$ となる状態変数 $x_{st}$ の値）に拘束し、その後、原点である平衡点に収束させる制御方法である。スライディングモード制御は、ロバスト性、すなわちモデル誤差や外乱の影響を受けにくいという性質を有することが特徴であるとされている。

30

## 【 0 0 7 5 】

具体的には、スライディングモード制御では、以下の式(1)に示す状態方程式を仮定する。そして、制御入力を適切に生成することでシステムの安定化を図る。

## 【 0 0 7 6 】

## 【数1】

$$\frac{dx_{st}}{dt} = Ax_{st} + Bu_{in} \dots \dots (1)$$

ここで、 $x_{st}$ ：状態変数、 $u_{in}$ ：制御入力、 $A$ 、 $B$ ：定数行列である。

## 【 0 0 7 7 】

本実施形態では、状態変数 $x_{st}$ は、以下の式(2)で定義される $6 \times 1$ 行列である。そのため、 $A$ は $6 \times 6$ 行列となる。

40

## 【 0 0 7 8 】

## 【数2】

$$x_{st} = \begin{bmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \\ \psi \\ \psi' \end{bmatrix} \dots \dots (2)$$

ここで、 $x$ 、 $y$ 、 $\theta$  は、それぞれ、状態変数  $x_{st}$  の  $x$  成分、 $y$  成分、および  $\theta$  成分を表し、上述した船体 2 の  $x$  方向、 $y$  方向、および  $\theta$  方向に対応する。 $\dot{x}$ 、 $\dot{y}$ 、 $\dot{\theta}$  はいずれも時刻  $t$  の関数である。 $x$ 、 $y$ 、 $\theta$  は、それぞれ、状態変数  $x_{st}$  の  $x$  成分、 $y$  成分、および  $\theta$  成分を表し、 $\dot{x}$ 、 $\dot{y}$ 、 $\dot{\theta}$  の時間微分である。

【0079】

また、本実施形態に係る制御入力  $u_{in}$  は、以下の式 (3) で定義される  $3 \times 1$  行列である。そのため、 $B$  は  $6 \times 3$  行列となる。

【0080】

【数3】

$$u_{in} = \begin{bmatrix} G_{main} \\ G_{bow} \\ G_{stern} \end{bmatrix} \dots \dots (3)$$

ここで、 $G_{main}$ ：メインスラスト 4 a のゲイン、 $G_{bow}$ ：船首スラスト 4 b のゲイン、 $G_{stern}$ ：船尾スラスト 4 c のゲインである。このように、制御入力  $u_{in}$  の各成分は、スラスト 4 a、4 b、4 c のゲインである。

【0081】

本実施形態に係る切換関数  $\sigma$  は、状態変数  $x_{st}$  の関数であり、以下の式 (4) で定義される  $3 \times 1$  行列である。

【0082】

【数4】

$$\sigma(x_{st}) = Sx_{st} \dots \dots (4)$$

ここで、 $S$ ： $3 \times 6$  の定数行列である。

【0083】

この切換関数  $\sigma$  が 0 になるような制御入力  $u_{in}$  を生成し、生成された制御入力  $u_{in}$  をスラスト駆動部 30 に入力することで、スライディングモード制御が行われる。

【0084】

< 第 1 の実施形態に係る自動水上航行体の制御 >

次に、本実施形態に係る制御装置 1 による船体 2 の制御について説明する。図 5 は、本実施形態に係る処理部 10 の動作を表すフローチャートである。なお、図 5 に示す一連のステップは、サンプリング周期  $T_s$  である 100ms ごとに繰り返される。

【0085】

まず、処理部 10 は、船体 2 の位置情報および角度情報を取得する (ステップ S1)。具体的には、処理部 10 の情報取得部 11 は、検出部 20 から船体 2 の現在位置および現在角度を取得する。また、情報取得部 11 は、記憶部 40 から船体 2 の目標位置および目標角度、ならびに、船体 2 の位置および角度の履歴を取得する。なお、船体 2 の位置および角度の履歴は、位置および角度を時間微分して速度および角速度を算出するために用いられるものであるため、情報取得部 11 は、少なくとも現在より 1 サンプル周期前の位置および角度を取得すれば十分である。

【0086】

次に、処理部 10 は、情報取得部 11 が取得した船体 2 の位置情報および角度情報から、状態変数  $x_{st}$  を生成する (ステップ S2)。より詳しくは、処理部 10 の状態変数生成部 12 は、船体 2 の目標位置および現在位置から、状態変数  $x_{st}$  の  $x$ 、 $y$  成分を生成し、船体 2 の目標角度および現在角度から、状態変数  $x_{st}$  の  $\theta$  成分を生成する。また、状態変数生成部 12 は、船体 2 の現在位置および 1 サンプル周期前の位置から、状態変数  $x_{st}$  の  $\dot{x}$ 、 $\dot{y}$  成分を生成し、船体 2 の現在角度および 1 サンプル周期前の角度から、状態変数  $x_{st}$  の  $\dot{\theta}$  成分を生成する。

【0087】

具体的には、状態変数生成部 12 は、以下の式 (5) によって状態変数  $x_{st}$  の  $x$ 、 $y$ 、 $\theta$  成分を生成する。

【 0 0 8 8 】

【 数 5 】

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_t - x_p \\ y_t - y_p \\ \psi_w - \psi_p \end{bmatrix} \dots\dots (5)$$

ここで、 $x_t$ ：目標位置の x 成分、 $x_p$ ：現在位置の x 成分、 $y_t$ ：目標位置の y 成分、 $y_p$ ：現在位置の y 成分、 $\psi_w$ ：風向、 $\psi_p$ ：現在角度である。式（5）では省略しているが、 $x_t, x_p, y_t, y_p, \psi_w, \psi_p$  はいずれも時刻  $t$  の関数である。なお、本実施形態では、目標角度  $\psi_t$  は風向  $\psi_w$  であるため、式（5）において目標角度  $\psi_t$  に風向  $\psi_w$  を代入している。

10

【 0 0 8 9 】

このように、本実施形態に係る状態変数  $x_{st}$  の  $x, y$  成分は、船体 2 の目標位置と現在位置との差分であり、状態変数  $x_{st}$  の  $\psi$  成分は、船体 2 の目標角度と現在角度との差分である。

【 0 0 9 0 】

また、処理部 10 の状態変数生成部 12 は、以下の式（6）によって状態変数  $x_{st}$  の  $x, y, \psi$  成分を生成する。本実施形態では状態変数  $x_{st}$  は離散的であるため、1 サンプル周期前の  $x, y, \psi$  を用いて状態変数  $x_{st}$  の  $x, y, \psi$  成分を生成する。

20

【 0 0 9 1 】

【 数 6 】

$$\begin{bmatrix} x'(t) \\ y'(t) \\ \psi'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_p(t) - x_p(t - T_s)}{T_s} \\ \frac{y_p(t) - y_p(t - T_s)}{T_s} \\ \frac{\psi_p(t) - \psi_p(t - T_s)}{T_s} \end{bmatrix} \dots\dots (6)$$

【 0 0 9 2 】

式（5）、（6）の各成分を上述の式（2）に代入することで、状態変数  $x_{st}$  が生成される。

30

【 0 0 9 3 】

なお、状態変数  $x_{st}$  の  $x, y, \psi$  成分を生成する方法は、上述のものに限られない。たとえば、検出部 20 が速度計を備える場合、状態変数生成部 12 は、情報取得部 11 が取得した船体 2 の速度および角速度から、状態変数  $x_{st}$  の  $x, y, \psi$  成分を生成してもよい。

【 0 0 9 4 】

次に、処理部 10 は、切換関数  $\sigma$  を生成する（ステップ S3）。より詳しくは、処理部 10 の SM 制御部 13 における切換関数生成部 131 は、状態変数生成部 12 によって生成された状態変数  $x_{st}$  から、切換関数  $\sigma$  を生成する。具体的には、切換関数生成部 131 は、状態変数  $x_{st}$  から、以下の式（7）によって切換関数  $\sigma$  を生成する。

40

【 0 0 9 5 】

【 数 7 】

$$\sigma(x_{st}) = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x x + x' \\ s_y y + y' \\ s_\psi \psi + \psi' \end{bmatrix} \dots\dots (7)$$

ここで、 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_\psi$  は、それぞれ切換関数  $\sigma$  の  $x, y, \psi$  成分である。また、 $s_x, s_y, s_\psi$  は、正の実数である。 $s_x, s_y, s_\psi$  の値は、スライディングモード制御の精度および効率に影響するため、適切に決定される。たとえば、 $s_x = s_y = 1, s_\psi$

50

= 2 とする。

【 0 0 9 6 】

次に、処理部 1 0 は、S M 制御値  $v_{SM}$  を生成する（ステップ S 4）。具体的には、処理部 1 0 の S M 制御部 1 3 における S M 制御値生成部 1 3 2 は、切換関数 の各成分の値から、以下の式（ 8 ）によって S M 制御値  $v_{SM}$  を生成する。

【 0 0 9 7 】

【 数 8 】

$$v_{SM} = \begin{bmatrix} v_{SMx} \\ v_{SMy} \\ v_{SM\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_x \cdot \frac{\sigma_x}{|\sigma_x| + \Delta_x} \\ -k_y \cdot \frac{\sigma_y}{|\sigma_y| + \Delta_y} \\ -k_\psi \cdot \frac{\sigma_\psi}{|\sigma_\psi| + \Delta_\psi} \end{bmatrix} \dots \dots (8)$$

ここで、 $v_{SMx}$ 、 $v_{SMy}$ 、 $v_{SM}$  は、それぞれ S M 制御値  $v_{SM}$  の  $x$ 、 $y$ 、成分である。 $k_x$ 、 $k_y$ 、 $k$  は、S M 制御値  $v_{SM}$  の大きさを規定する正の実数である。

$\Delta_x$ 、 $\Delta_y$ 、 $\Delta_\psi$  は、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_\psi$  の値が 0 に近い場合にチャタリングが生じることを防止するための正の実数である。 $k_x$ 、 $k_y$ 、 $k$ 、 $\Delta_x$ 、 $\Delta_y$ 、 $\Delta_\psi$  の値は、スライディングモード制御の精度および効率に影響するため、適切に決定される。たとえば、 $k_x = k_y = k = 170$ 、 $\Delta_x = \Delta_y = \Delta_\psi = 0.1$  とする。

【 0 0 9 8 】

本実施形態の S M 制御値  $v_{SM}$  は、式（ 8 ）に示すように、スライディングモード制御における切換入力である。

【 0 0 9 9 】

次に、処理部 1 0 は、 $x$ -NN 1 4 1 の重み付けを更新する（ステップ S 5）。具体的には、処理部 1 0 の  $x$ -NN 制御部 1 4 は、S M 制御部 1 3 の切換関数生成部 1 3 1 が生成した切換関数  $v_{SMx}$  を入力し、 $x$ -NN 1 4 1 の有する  $x$ -NN 1 4 1 a および  $y$ -NN 1 4 1 b それぞれについて、ニューラルネットワークの重み付けを更新する。

【 0 1 0 0 】

$x$ -NN 1 4 1 a の重み付けの更新について、図 6 を参照して説明する。図 6 は、 $x$ -NN 1 4 1 a の一例を表す図である。

【 0 1 0 1 】

図 6 に示すように、 $x$ -NN 1 4 1 a は、入力層、1 つの中間層、および出力層の 3 つの層からなるニューラルネットワークである。図 6 に示す例において、 $x$ -NN 1 4 1 a は、2 つの入力  $x_{in1}$ 、 $x_{in2}$  と、3 つの中間ユニット  $x_{mid1}$ 、 $x_{mid2}$ 、 $x_{mid3}$  と、1 つの出力  $x_{out}$  とを有する。本実施形態では、 $x_{in1} = x$ 、 $x_{in2} = x$  となる。また、 $w_{in11}$ 、 $w_{in12}$ 、 $w_{in13}$ 、 $w_{in21}$ 、 $w_{in22}$ 、 $w_{in23}$  は入力層から中間層への重み付けであり、 $w_{out1}$ 、 $w_{out2}$ 、 $w_{out3}$  は中間層から出力層への重み付けである。

【 0 1 0 2 】

$x$ -NN 制御部 1 4 は、切換関数  $v_{SMx}$  の  $x$  成分である  $v_{SMx}$  に基づいてこれらの重み付けを更新する。具体的には、以下の式（ 9 ）、（ 1 0 ）によって、時刻  $k T_s$  の重み付けから、時刻（ $k + 1$ ） $T_s$  の重み付けを生成する（ $k$  は整数）。

【 0 1 0 3 】

【 数 9 】

$$w_{inij}((k+1)T_s) = w_{inij}(kT_s) + \alpha e_{out_i} x_{mid_i} (1 - x_{mid_i}) x_{in_j} \dots \dots (9)$$

ここで、 $i = 1 \sim 3$ 、 $j = 1 \sim 2$  であり、 $k$  は整数である。

【 0 1 0 4 】

20

30

40

【数 1 0】

$$w_{out_i}((k+1)T_s) = w_{out_i}(kT_s) + \alpha e_{upd} x_{out} (1 - x_{out}) x_{mid_i} \dots \dots (10)$$

ここで、 $i = 1 \sim 3$  であり、 $k$  は整数である。

【0 1 0 5】

なお、 $e_{upd}$ 、 $e_{out_i}$  は誤差ベクトルであり、本実施形態では  $e_{upd} = -x$ 、 $e_{out_i} = w_{out_i} \times e_{upd}$  ( $i = 1 \sim 3$ ) である。また、 $\alpha$  は学習率であり、ニューラルネットワーク制御の精度および効率に影響するため、適切に決定される。たとえば、 $\alpha = 0.01$  である。

【0 1 0 6】

また、 $k = 0$  すなわち時刻  $t = 0$  での重み付けは、乱数を用いて生成する。この場合、たとえば全ての重み付けについて、 $-1$  より大きく、 $1$  より小さく、 $0$  でない値であって、各重み付けが一様分布となるように生成する。ただし、同じ添え字を有する重み付けは互いに異なる値となるように生成する。たとえば、 $w_{in11}$ 、 $w_{in21}$ 、 $w_{in31}$  が互いに異なる値となり、 $w_{in11}$ 、 $w_{in12}$  が互いに異なる値となるように生成する。また、 $w_{out1}$ 、 $w_{out2}$ 、 $w_{out3}$  は互いに異なる値となるように生成する。このように重み付けを生成することにより、重み付けの更新が適切に行われる。

【0 1 0 7】

また、図 6 の例では中間ユニットの数は 3 であったが、本実施形態では、中間ユニットの数を 5 としている。中間ユニットの数は、ニューラルネットワーク制御の精度および効率に影響するため、適切に決定される。

【0 1 0 8】

以上説明した  $x$ -NN141a についての内容は、 $y$ -NN141b の構成、重み付けの生成と更新、学習率の値、および中間ユニットの数についても同様である。

【0 1 0 9】

次に、処理部 10 は、 $x$ -NN 制御値  $v$  を生成する (ステップ S6)。より詳しくは、 $x$ -NN141 は、ステップ S5 で重み付けが更新された  $x$ -NN141a に対して  $x$  および  $x$  を入力することにより、 $0$  より大きく  $1$  より小さい出力  $x_{out}$  を生成し、 $y$ -NN141b に対して  $y$  および  $y$  を入力することにより、 $0$  より大きく  $1$  より小さい出力  $y_{out}$  を生成する。

【0 1 1 0】

具体的には、 $x$ -NN141a は、以下の式 (11) によって  $x$  および  $x$  から  $x_{mid_i}$  を生成し、式 (12) によって  $x_{mid_i}$  から  $x_{out}$  を生成する ( $i = 1 \sim 3$ )。

【0 1 1 1】

【数 1 1】

$$x_{mid_i} = \frac{1}{1 + \exp\{-\sum_{l=1}^2 (w_{in_{il}} \cdot x_{in_l})\}} \dots \dots (11)$$

ここで、 $i = 1 \sim 3$  である。

【0 1 1 2】

【数 1 2】

$$x_{out} = \frac{1}{1 + \exp\{-\sum_{m=1}^3 (w_{out_m} \cdot x_{mid_m})\}} \dots \dots (12)$$

$y$ -NN141b についても同様である。

【0 1 1 3】

その後、 $x$ -NN 制御値生成部 152 は、生成された  $x_{out}$  および  $y_{out}$  から、次の式 (13) により  $x$ -NN 制御値  $v$  を生成する。

【0 1 1 4】

## 【数 1 3】

$$v_{\sigma} = \begin{bmatrix} v_{\sigma x} \\ v_{\sigma y} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x(x_{out} - 1/2) \\ k_y(y_{out} - 1/2) \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots (13)$$

ここで、 $v_x$ 、 $v_y$ は、それぞれ - NN制御値  $v$  の  $x$ 、 $y$ 成分である。なお、 $k_x$ 、 $k_y$ は、上述した式(8)のものと同じである。

## 【0 1 1 5】

次に、処理部 10 は、制御入力生成部 16 の動作を選択する(ステップ S7)。より詳しくは、処理部 10 の動作選択部 15 は、船体 2 の目標角度と現在角度との差分として、状態変数の成分の絶対値  $|\quad|$  が所定の値(たとえば、 $10^\circ$ )より大きい場合、制御入力生成部 16 が船体 2 の角度に関する制御入力を生成することを選択し、状態変数の成分の絶対値  $|\quad|$  が当該所定の値以下の場合、制御入力生成部 16 が船体 2 の位置に関する制御入力を生成することを選択する。具体的には、たとえば、オペレータが目視で船体 2 の向きを観測し、風向との差が所定の値より大きいかどうか入力インタフェース 50 または通信部 60 を介して入力し、動作選択部 15 は、この入力に基づいて制御入力生成部 16 の動作を選択する。動作選択部 15 は、再び入力されるまで動作の選択を保持してもよい。なお、検出部 20 が風向センサを備える場合、この風向センサによって得られた風向  $w$  と船体 2 の現在角度  $\psi$  から、式(5)によって  $\quad$  を算出し、この  $\quad$  の値から動作選択部 15 が制御入力生成部 16 の動作を選択してもよい。

## 【0 1 1 6】

次に、処理部 10 は、制御入力  $u_{in}$  を生成する(ステップ S8)。具体的には、船体 2 の角度を制御する場合、処理部 10 の制御入力生成部 16 は、SM制御部 13 が生成した SM制御値  $v_{SM}$  に基づいて、以下の式(14)によって船体 2 の角度に関する制御入力  $u_{in}$  を生成する。

## 【0 1 1 7】

## 【数 1 4】

$$u_{in} = \begin{bmatrix} G_{main} \\ G_{bow} \\ G_{stern} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ v_{SM\psi} \\ -v_{SM\psi} \end{bmatrix} \dots\dots (14)$$

このようにして得られた制御入力をスラスト駆動部 30 に入力することで、船体 2 は図 2C で説明した角度方向へ推進される。

## 【0 1 1 8】

一方、船体 2 の位置を制御する場合、処理部 10 の制御入力生成部 16 は、SM制御部 13 が生成した SM制御値  $v_{SM}$  および - NN 141 が生成した - NN制御値  $v$  に基づいて、以下の式(15)によって船体 2 の位置に関する制御入力  $u_{in}$  を生成する。

## 【0 1 1 9】

## 【数 1 5】

$$u_{in} = \begin{bmatrix} G_{main} \\ G_{bow} \\ G_{stern} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{SMx} + v_{\sigma x} \\ v_{SMy} + v_{\sigma y} \\ v_{SMy} + v_{\sigma y} \end{bmatrix} \dots\dots (15)$$

このようにして得られた制御入力をスラスト駆動部 30 に入力することで、船体 2 は図 2A で説明した前後方向および図 2B で説明した左右方向へ推進される。

## 【0 1 2 0】

また、式(15)に示すように、船体 2 の位置に関する制御入力  $u_{in}$  は、SM制御値  $v_{SM}$  および - NN制御値  $v$  の和である。すなわち、船体 2 の位置を制御する場合、切換入力である SM制御値  $v_{SM}$  に対して、補正入力である - NN制御値  $v$  が加えられる。より詳しくは、補正入力である - NN制御値  $v$  は、スライディングモード制御における等価制御入力に代えて用いることができ、切換入力である SM制御値  $v_{SM}$  の挙動を安定化することができる。

## 【0 1 2 1】

10

20

30

50

以上説明した第1の実施形態に係る制御装置1は、海洋ロボットの位置制御においてスライディングモード制御に加えてニューラルネットワーク制御を行う。これにより、風や波などの外乱が大きい場合であっても、海洋ロボットの運動特性の変化に対応することができる。すなわち、スライディングモード制御のみを行う場合に比べ、ニューラルネットワーク制御による補正入力を加えることにより、環境変化に対応する能力を向上させることができる。その結果、外乱が大きい場合であっても、船体2の位置を精度よく保持することができる。

#### 【0122】

より詳しくは、図5におけるステップS5で  $-NN141$ の重み付けを更新し、ステップS6で  $-NN$ 制御値  $v$  を求め、ステップS8でSM制御値  $v_{SM}$ に  $-NN$ 制御値  $v$  が加えられることにより、 $x$ ,  $y$ がより0に近づくように制御入力  $u_{in}$ が生成される。これにより、スライディングモード制御では切換関数を0とすることができないような大きな外乱がある場合であっても、制御入力  $u_{in}$ を適切に生成することができる。

10

#### 【0123】

ここで、ニューラルネットワーク制御を用いた船体2の位置制御の具体的な効果について、図7Aおよび図7Bを参照して説明する。図7Aは、第1の実施形態に係る位置制御のシミュレーション結果を表す図である。図7Bは、比較例に係る位置制御のシミュレーション結果を表す図である。図7Bに示す比較例では、スライディングモード制御のみを行っている。また、図7Aおよび図7Bは、いずれも外乱として、概ね方向WD1、平均風速10m/sの風が吹いている場合において、船体2が時刻0sの位置P1から、時刻300sの位置P2に移動するまでの軌跡を表している。なお、風向や風速は乱数によって与えられ、ある程度変化している。また、符号Gは、目標位置である(東西位置, 南北位置) = (0, 0)となる点を表し、dは目標位置からの距離を表す。図7Aおよび図7Bに示す例では、現場の海域の水深などから、d = 6mの範囲内で船体2の位置保持ができるかどうかを基準とした。

20

#### 【0124】

図7Aに示すように、本実施形態に係る制御装置1によって位置制御を行った場合、すなわち、スライディングモード制御およびニューラルネットワーク制御を行った場合、船体2の位置は、時刻0sの位置P1から、すぐにd = 6mの範囲内に移動し、時刻300sの位置P2に至るまでd = 6mの範囲内に保持されている。

30

#### 【0125】

一方、図7Bに示すように、比較例に係る制御装置1によって位置制御を行った場合、すなわち、スライディングモード制御を行っているがニューラルネットワーク制御を行っていない場合、船体2の位置は、時刻0sの位置P1から、一旦はd = 6mの範囲内に移動するものの、時刻300sの位置P2においてはd = 6mの範囲外に移動してしまっている。

#### 【0126】

このように、本実施形態に係る制御装置1によれば、スライディングモード制御に加えて  $-NN141$ によるニューラルネットワーク制御を行うことにより、平均風速10m/sの風が吹いているような外乱が大きい場合であっても、船体2の位置を精度よく保持することができる。

40

#### 【0127】

また、本実施形態では、SM制御値  $v_{SM}$ はスライディングモード制御における切換入力であり、 $-NN$ 制御値  $v$ は当該切換入力に対する補正入力であり、船体2の位置に関する制御入力  $u_{in}$ は、SM制御値  $v_{SM}$ および  $-NN$ 制御値  $v$ の和である。すなわち、本実施形態では、切換入力はスライディングモード制御によって生成され、ニューラルネットワーク制御によっては生成されない。これにより、切換入力を確実に機能させることができる。また、切換入力をニューラルネットワーク制御によって生成した場合に生じうる、切換超平面に近づくことができなくなるなどの問題を回避することができる。

50

## 【0128】

また、本実施形態では、補正入力である  $-NN$  制御値  $v$  が切換入力である  $SM$  制御値  $v_{SM}$  と比べて過大にならないようにパラメータが設定されている。詳しくは、 $-NN$  制御値  $v$  の絶対値  $|v_x|$  ,  $|v_y|$  の上限値 (上界の最小値) は、 $SM$  制御値  $v_{SM}$  の絶対値  $|v_{SMx}|$  ,  $|v_{SMy}|$  の上限値以下である。さらに詳しくは、式 (8) および式 (13) と、 $0 < x_{out} < 1$  および  $0 < y_{out} < 1$  から、 $-NN$  制御値  $v$  の  $x$  成分の絶対値  $|v_x|$  の上限値 (上界の最小値) は  $k_x / 2$  であり、 $SM$  制御値  $v_{SM}$  の  $x$  成分の絶対値  $|v_{SMx}|$  の上限値である  $k_x$  以下である。 $-NN$  制御値  $v$  の  $y$  成分の絶対値  $|v_y|$  の上限値は  $k_y / 2$  であり、 $SM$  制御値  $v_{SM}$  の  $y$  成分の絶対値  $|v_{SMy}|$  の上限値である  $k_y$  以下である。これにより、たとえば、位置制御の開始時に  $-NN$  制御値  $v$  の出力が安定しない場合であっても、制御入力  $u_{in}$  を安定化することができる。なお、 $|v_x|$  ,  $|v_y|$  の上限値は、それぞれ  $|v_{SMx}|$  ,  $|v_{SMy}|$  の上限値以下の任意の値であるようにしてもよい。

10

## 【0129】

さらに、 $|v_x|$  ,  $|v_y|$  の上限値は、それぞれ時間変化するようにしてもよい。たとえば、 $|v_x|$  ,  $|v_y|$  の上限値が時間と共に増加して  $|v_{SMx}|$  ,  $|v_{SMy}|$  の上限値に近づくようにしてもよい。この場合、 $|v_x|$  ,  $|v_y|$  の上限値は、船体 2 が目標位置を中心とする所定の範囲内 (たとえば、半径 6 m の円内) にある場合、 $|v_{SMx}|$  ,  $|v_{SMy}|$  の上限値に徐々に、または一気に近づけてもよい。これにより、学習が進んだニューラルネットワーク制御の効果を適切に反映することができる。なお、採泥を開始したタイミングで、 $|v_x|$  ,  $|v_y|$  の上限値を  $|v_{SMx}|$  ,  $|v_{SMy}|$  の上限値よりも大きくしてもよい。また、 $|v_x|$  ,  $|v_y|$  の上限値が時間と共に減少して 0 に近づくようにしてもよい。

20

## 【0130】

本実施形態では、動作選択部 15 は、船体 2 の目標角度と現在角度との差分が所定の値より大きい場合、制御入力生成部 16 が船体 2 の角度に関する制御入力  $u_{in}$  を生成することを選択し、当該差分が当該所定の値以下の場合、制御入力生成部 16 が船体 2 の位置に関する制御入力  $u_{in}$  を生成することを選択する。通常、メインスラスト 4 a の推進力は、船首スラスト 4 b および船尾スラスト 4 c よりも大きいため、これにより、推進力の大きいメインスラスト 4 a による推進方向を風向に合わせることができ、船体 2 の位置制御の効率や精度を向上させることができる。

30

## 【0131】

また、本実施形態では、スラスト 4 a , 4 b , 4 c によって船体 2 に与えられる前後方向および左右方向の推力が互いに直交することから、これらの方向の推進に係る制御 (推進制御) は互いに影響を及ぼさないこととなる。さらに、本実施形態では、前後方向および左右方向の推進制御に加えて、角度方向の推進制御についても互いに影響を及ぼさない。すなわち、本実施形態に係る推進機構 4 における前後方向、左右方向および角度方向の推進制御は、互いに影響を及ぼさない。これにより、前後方向、左右方向および角度方向の推進制御を、別々に (独立して) 行うことができる。すなわち、各方向の推進に関する制御入力の生成や、ニューラルネットワークの重み付けの更新を、別々に行うことができる。そのため、計算量を削減することができ、位置制御および角度制御の効率や精度を向上させることができる。また、サンプリング周期  $T_s$  をより小さくすることができ、船体 2 の位置および角度をより精度よく保持することができる。

40

## 【0132】

なお、前後方向、左右方向および角度方向の推進制御が互いに影響を及ぼさないということは、数学的には、式 (1) に示す状態方程式の行列  $A$  ,  $B$  がいずれも実質的にブロック対角化可能であることを意味する。ブロック対角化については、本明細書の最後で補足する。

## 【0133】

また、本実施形態では、 $-NN141$  の  $x$  -  $NN141a$  および  $y$  -  $NN141$

50

bは、入力層、1つの中間層、および出力層の3つの層からなる簡易なニューラルネットワークである。これにより、 $x$ -NN141aおよび $y$ -NN141bの重み付けの更新、ならびに出力の生成に掛かる時間が短縮できるため、サンプリング周期 $T_s$ をより小さくすることができ、船体2の位置および角度をより精度よく保持することができる。

【0134】

また、本実施形態に係るニューラルネットワークである $x$ -NN141aおよび $y$ -NN141bは、リアルタイムで学習を行う。これにより、予測できない外乱が存在する場合においても、適切に重み付けを更新することができる。

【0135】

これらのことから、採泥システムとして構成された海洋システム100によれば、採泥作業を安定して行うことができる。

10

【0136】

なお、以上の説明においては、 $x$ 方向および $y$ 方向の位置制御を同時に行うこととしたが、実施形態はこれに限られない。たとえば、目標位置からより遠い方向についての位置制御を優先的に行ってもよい。

【0137】

また、ステップS5における $x$ -NN141の重み付けの更新は、ステップS6における $y$ -NN制御値 $v$ の生成の後に行われてもよい。

【0138】

また、図5のステップS7における動作選択は、ステップS2の直後に行ってもよい。この場合、動作選択部15が角度制御を行うことを選択したときは、ステップS5における $x$ -NN141aおよび $y$ -NN141bの重み付けの更新を停止してもよい。

20

【0139】

また、本実施形態では角度方向にはニューラルネットワーク制御を用いていないが、角度方向にもニューラルネットワーク制御を用いてもよい。たとえば、 $\theta$ についても $x$ -NN制御値を求め、船体2の角度に関する制御入力 $u_{in}$ を、SM制御値 $v_{SM}$ と当該 $x$ -NN制御値の和とする。これにより、船体2の角度についてもより精度よく保持することができる。

【0140】

(第2の実施形態)

30

次に、第2の実施形態について説明する。本実施形態では、上述した処理部10が、さらに、切換関数の時間微分 $\dot{f}$ に基づいてニューラルネットワーク制御を行う $x$ -NN制御部17を備える。 $x$ -NN制御部17が切換関数の時間微分 $\dot{f}$ に基づいてニューラルネットワーク制御を行うことで、切換関数 $f$ の急激な変化を抑制し、定点保持の精度をさらに向上させることが可能である。以下、本実施形態に係る制御装置1について、第1の実施形態との相違点を中心に説明する。

【0141】

図8は、本実施形態に係る処理部10の機能ブロック図であり、上述した第1の実施形態における図4に対応する図である。図8に示すように、本実施形態に係る処理部10は、第1の実施形態に係る処理部10の各部に加えて、 $x$ -NN制御部17をさらに備える。

40

【0142】

$x$ -NN制御部17は、 $x$ -NN制御部14と同様にニューラルネットワーク制御のための演算を行うが、 $x$ -NN制御部14とは異なり、切換関数の時間微分 $\dot{f}$ に基づいた演算を行う。図8に示すように、 $x$ -NN制御部17は、切換関数微分部171と、 $x$ -NN172と、 $x$ -NN制御値生成部173とを備える。 $x$ -NN制御部17は、第2のニューラルネットワーク制御部の一例である。

【0143】

切換関数微分部171は、SM制御部13によって生成された切換関数 $f$ と、記憶部40に記憶された切換関数 $f$ の履歴を取得し、これらを用いて切換関数の時間微分 $\dot{f}$ を生

50

成する。なお、切換関数 の履歴は、少なくとも現在より1サンプリング周期前のものを取得すれば十分である。

【0144】

- NN172は、図8に示すように、 $x$ -NN172aおよび $y$ -NN172bを備える。 $x$ -NN172aは、船体2の $x$ 方向すなわち前後方向の位置制御に関するニューラルネットワークであり、切換関数 の $x$ 成分である $x$ の値が0になるように重み付けが更新される。 $y$ -NN172bは、船体2の $y$ 方向すなわち左右方向の位置制御に関するニューラルネットワークであり、切換関数 の $y$ 成分である $y$ の値が0になるように重み付けが更新される。 $x$ -NN172aおよび $y$ -NN172bは、それぞれ第2のニューラルネットワークの一例である。

10

【0145】

また、重み付けが更新された後、 $x$ -NN172aは、 $x$ ,  $x$ ,  $x$  を入力し、 $x_{out}$  (上線付きの $x$ ) を出力する。同様に、重み付けが更新された後、 $y$ -NN172bは、 $y$ ,  $y$ ,  $y$  を入力し、 $y_{out}$  (上線付きの $y$ ) を出力する。

【0146】

なお、このように $x$ -NN172aおよび $y$ -NN172bは、 $x$ ,  $x$  および $y$ ,  $y$  に加えて、それぞれ $x$ ,  $y$ も入力する。これは、切換関数の時間微分が0になるようにする場合、状態変数 $x_{st}$ だけでなく、切換関数の時間微分の値にも応じて制御入力 $u_{in}$ の大きさを変える必要があるためである。

【0147】

- NN制御値生成部173は、 $x$ -NN172aの出力 $x_{out}$  (上線付きの $x$ ) および $y$ -NN172bの出力 $y_{out}$  (上線付きの $y$ ) から、- NN制御値 $v$  を生成する。詳しくは後述するが、- NN制御値 $v$  は切換入力であるSM制御値 $v_{sm}$ に対する第2の補正入力である。- NN制御値 $v$  は、第2のニューラルネットワーク制御値の一例である。

20

【0148】

このように、- NN制御部17は、船体2の位置情報と、切換関数の時間微分 とに基づいて、船体2の現在位置が目標位置に一致するようにニューラルネットワーク制御を行うための- NN制御値 $v$  を生成する。

【0149】

本実施形態では、制御入力生成部16は、SM制御値 $v_{sm}$ 、- NN制御値 $v$ 、および- NN制御値 $v$  に基づいて、制御入力 $u_{in}$ を生成する。より詳しくは、船体2の角度を制御する場合、制御入力生成部16は、SM制御値 $v_{sm}$ に基づいて制御入力 $u_{in}$ を生成する。船体2の位置を制御する場合、制御入力生成部16は、SM制御値 $v_{sm}$ 、- NN制御値 $v$ 、および- NN制御値 $v$  に基づいて制御入力 $u_{in}$ を生成する。

30

【0150】

<第2の実施形態に係る自動水上航行体の制御>

次に、本実施形態に係る制御装置1による船体2の制御について説明する。図9は、本実施形態に係る処理部10の動作を表すフローチャートである。ステップS1~S6およびステップS7は、上述した第1の実施形態と同様であるため、説明を省略する。なお、図9に示す一連のステップは、サンプリング周期 $T_s$ である100msごとに繰り返される。

40

【0151】

ステップS6で- NN制御値 $v$  を生成した後、処理部10は、切換関数の時間微分を生成する(ステップS9)。具体的には、- NN制御部17の切換関数微分部171は、以下の式(16)によって、切換関数 から切換関数の時間微分を生成する。

【0152】

【数 1 6】

$$\sigma' = \begin{bmatrix} \sigma'_x \\ \sigma'_y \\ \sigma'_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_x(t) - \sigma_x(t - T_s)}{T_s} \\ \sigma_y(t) - \sigma_y(t - T_s) \\ \frac{\sigma_\psi(t) - \sigma_\psi(t - T_s)}{T_s} \end{bmatrix} \dots \dots (16)$$

ここで、 $\sigma'_x$ 、 $\sigma'_y$ 、 $\sigma'_\psi$  は、それぞれ切換関数の時間微分  $\dot{\sigma}_x$ 、 $\dot{\sigma}_y$ 、 $\dot{\sigma}_\psi$  の成分である。

10

【0 1 5 3】

次に、処理部 10 は、 $\sigma$ -NN 172 の重み付けを更新する（ステップ S 10）。具体的には、 $\sigma$ -NN 制御部 14 は、切換関数微分部 171 が生成した切換関数の時間微分を入力し、 $\sigma$ -NN 172 の有する  $\sigma$ -NN 172 a および  $\sigma$ -NN 172 b それぞれについて、ニューラルネットワークの重み付けを更新する。図 10 は、 $\sigma$ -NN 172 a の一例を表す図である。図 10 に示すように、 $\sigma$ -NN 172 a、 $\sigma$ -NN 141 a と同様に、入力層、1つの中間層、および出力層の3つの層からなるニューラルネットワークである。 $\sigma$ -NN 172 b についても同様である。また、ステップ S 10 における  $\sigma$ -NN 172 の重み付けの更新は、学習率  $\eta = 0.1$  とした以外は、上述したステップ S 5 における  $\sigma$ -NN 141 の重み付けの更新と同様である。

20

【0 1 5 4】

また、図 10 の例では中間ユニットの数は 4 であったが、本実施形態に係る  $\sigma$ -NN 172 a および  $\sigma$ -NN 172 b においては、中間ユニットの数を 5 とした。

【0 1 5 5】

次に、処理部 10 は、 $\sigma$ -NN 制御値  $v$  を生成する（ステップ S 11）。具体的には、 $\sigma$ -NN 172 は、ステップ S 10 で重み付けが更新された  $\sigma$ -NN 172 a に対して  $x_1, x_2, x_3$  を入力することにより、0 より大きく 1 より小さい出力  $x_{out}$ （上線付きの  $x$ ）を生成し、ステップ S 10 で重み付けが更新された  $\sigma$ -NN 141 b に対して  $y_1, y_2, y_3$  を入力することにより、0 より大きく 1 より小さい出力  $y_{out}$ （上線付きの  $y$ ）を生成する。その後、 $\sigma$ -NN 制御値生成部 173 は、以下の式（17）によって、 $\sigma$ -NN 制御値  $v$  を生成する。

30

【0 1 5 6】

【数 1 7】

$$v_{\sigma'} = \begin{bmatrix} v_{\sigma'_x} \\ v_{\sigma'_y} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x(\bar{x}_{out} - 1/2) \\ k_y(\bar{y}_{out} - 1/2) \\ 0 \end{bmatrix} \dots \dots (17)$$

ここで、 $v_{\sigma'_x}$ 、 $v_{\sigma'_y}$  は、それぞれ  $\sigma$ -NN 制御値  $v$  の  $x$ 、 $y$  成分である。なお、 $k_x$ 、 $k_y$  は、上述した式（8）のものと同じである。

【0 1 5 7】

ステップ S 7 の後、処理部 10 は、制御入力  $u_{in}$  を生成する（ステップ S 8）。船体 2 の角度を制御する場合は、第 1 の実施形態と同様であり、処理部 10 の制御入力生成部 16 は、SM 制御部 13 が生成した SM 制御値  $v_{SM}$  に基づいて、式（14）によって船体 2 の角度に関する制御入力  $u_{in}$  を生成する。一方、船体 2 の位置を制御する場合、処理部 10 の制御入力生成部 16 は、SM 制御部 13 が生成した SM 制御値  $v_{SM}$ 、 $\sigma$ -NN 141 が生成した  $\sigma$ -NN 制御値  $v$ 、および  $\sigma$ -NN 172 が生成した  $\sigma$ -NN 制御値  $v$  に基づいて、以下の式（18）によって船体 2 の位置に関する制御入力  $u_{in}$  を生成する。

40

【0 1 5 8】

## 【数 18】

$$u_{in} = \begin{bmatrix} G_{main} \\ G_{bow} \\ G_{stern} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{SMx} + v_{\sigma x} + v_{\sigma'x} \\ v_{SMy} + v_{\sigma y} + v_{\sigma'y} \\ v_{SMz} + v_{\sigma z} + v_{\sigma'z} \end{bmatrix} \dots \dots (18)$$

このようにして得られた制御入力をスラスト駆動部 30 に入力することで、船体 2 は図 2 A で説明した前後方向および図 2 B で説明した左右方向へ推進される。

## 【0159】

また、式 (18) に示すように、位置制御を行う場合の制御入力  $u_{in}$  は、SM 制御値  $v_{SM}$ 、 $v_{\sigma}$  - NN 制御値  $v_{\sigma}$ 、および  $v_{\sigma'}$  - NN 制御値  $v_{\sigma'}$  の和である。すなわち、船体 2 の位置を制御する場合、切換入力である SM 制御値  $v_{SM}$  に対して、補正入力である  $v_{\sigma}$  - NN 制御値  $v_{\sigma}$  と、第 2 の補正入力である  $v_{\sigma'}$  - NN 制御値  $v_{\sigma'}$  とが加えられる。

10

## 【0160】

以上説明した第 2 の実施形態に係る制御装置 1 によれば、位置制御において切換関数の時間微分  $\dot{f}$  に基づくニューラルネットワーク制御をさらに追加することで、たとえば外乱が急速に変化する場合であっても、船体 2 の位置を精度よく保持することができる。

## 【0161】

より詳しくは、図 9 におけるステップ S10 で重み付けを更新し、ステップ S11 で  $v_{\sigma}$  - NN 制御値  $v_{\sigma}$  を求め、ステップ S8 で SM 制御値  $v_{SM}$  に  $v_{\sigma}$  - NN 制御値  $v_{\sigma}$  および  $v_{\sigma'}$  - NN 制御値  $v_{\sigma'}$  が加えられることにより、 $v_{SM}$ 、 $v_{\sigma}$ 、 $v_{\sigma'}$  に加えて、 $v_{SM}$ 、 $v_{\sigma}$ 、 $v_{\sigma'}$  についても 0 に近づけるように制御入力  $u_{in}$  が生成される。これにより、切換関数の値を安定化することができ、たとえば、外乱が急速に変化することで  $v_{\sigma}$  - NN 制御値  $v_{\sigma}$  が過剰または不足する場合であっても、制御入力  $u_{in}$  を適切に生成することができる。

20

## 【0162】

ここで、切換関数の時間微分  $\dot{f}$  に基づくニューラルネットワーク制御を用いた船体 2 の位置制御の具体的な効果について、図 11 を参照して説明する。図 11 は、第 2 の実施形態に係る位置制御のシミュレーション結果を表す図であり、上述した第 1 の実施形態における図 7 A に対応する図である。図 11 も、外乱として、概ね方向 WD1、平均風速 10 m/s の風が吹いている場合において、船体 2 が時刻 0 s の位置 P1 から、時刻 300 s の位置 P2 に移動するまでの軌跡を表している。

30

## 【0163】

図 11 に示すように、本実施形態に係る制御装置 1 によって位置制御を行った場合、船体 2 の位置は、時刻 0 s の位置 P1 から、すぐに  $d = 6$  m の範囲内に移動し、時刻 300 s の位置 P2 に至るまで  $d = 6$  m の範囲内に保持されている。また、図 7 A と比べて、より目標位置 G に近い位置に保持されているといえる。

## 【0164】

図 12 は、第 1 の実施形態、第 2 の実施形態、および比較例に係る船体 2 の位置制御についての解析結果を表す図である。なお、比較例に係る位置制御は、1 回のシミュレーション結果であり、第 1 および第 2 の実施形態に係る位置制御は、いずれも  $v_{\sigma}$  - NN141 および  $v_{\sigma'}$  - NN172 における時刻  $t = 0$  での重み付けが異なる 30 回のシミュレーション結果である。また、第 1 の実施形態、第 2 の実施形態、および比較例の場合も外乱として平均風速 10 m/s の風が吹いている状況とした。時刻 0 s から時刻 300 s までのシミュレーションを実施し、100 s 以降の  $d$  の最大値を比較している。

40

## 【0165】

図 12 に示すように、比較例に係る位置制御では、 $d$  の最大値は 10.5303 m となる。第 1 の実施形態に係る位置制御では、 $d$  の最大値は 5.0182 m となる。第 2 の実施形態に係る位置制御では、 $d$  の最大値は 3.4249 m となる。この結果から、比較例、第 1 の実施形態、第 2 の実施形態の順に  $d$  の最大値が減少し、定点保持の精度が向上することがわかる。

## 【0166】

50

このように、第2の実施形態に係る制御装置1によって位置制御を行った場合、第1の実施形態と比べて、船体2の位置をより精度よく保持することができることがわかる。

【0167】

次に、第2の実施形態に係る制御装置1による位置制御について、実際の海上において行われた海域試験の結果を示す。図13は、第2の実施形態に係る位置制御の海域試験の結果を表す図である。図14は、本海域試験の解析結果を表す図である。なお、本海域試験は、福島県相馬市松川浦漁港内で行われたものである。

【0168】

図13に示すように、本海域試験においては、概ね方向WD2、平均5m/sの風が吹いていた。図13は、船体2が時刻0sの位置P1から、時刻250sの位置P7に移動するまでの軌跡を表している。位置P1～P7の具体的な時刻は、以下の通りである。

【0169】

位置P1：0s  
 位置P2：30s  
 位置P3：60s  
 位置P4：90s  
 位置P5：120s  
 位置P6：150s  
 位置P7：250s

【0170】

図13に示すように、まず位置P1から位置P3において、船体2は一旦風に流されるものの、位置P3から位置P5に向けて前後方向に大きく移動し、その後、左右方向の移動によって位置P6に移動する。そして、位置P6から位置P7に至るまで、船体2はd6mの範囲内に保持されている。図14に示すように、時刻150s以降は、船体2の位置はd6mの範囲内に保持されている。

【0171】

このように、第2の実施形態に係る制御装置1によって位置制御を行った場合、実際の海上においても、船体2の位置を精度よく保持することができる。

【0172】

また、本実施形態では、第1の実施形態と同様に、補正入力であるNN制御値 $v$ が切換入力であるSM制御値 $v_{SM}$ と比べて過大にならないようにパラメータが設定されている。さらに、本実施形態では、第2の補正入力であるNN制御値 $v$ についても、切換入力であるSM制御値 $v_{SM}$ と比べて過大にならないようにパラメータが設定されている。詳しくは、NN制御値 $v$ の絶対値 $|v_x|$ 、 $|v_y|$ の上限値(上界の最小値)は、SM制御値 $v_{SM}$ の絶対値 $|v_{SMx}|$ 、 $|v_{SMy}|$ の上限値以下である。さらに詳しくは、式(8)および式(17)と、 $0 < x_{out} < 1$ および $0 < y_{out} < 1$ (上線付きの $x$ 、 $y$ )から、NN制御値 $v$ の $x$ 成分の絶対値 $|v_x|$ の上限値(上界の最小値)は $k_x/2$ であり、SM制御値 $v_{SM}$ の $x$ 成分の絶対値 $|v_{SMx}|$ の上限値である $k_x$ 以下である。NN制御値 $v$ の $y$ 成分の絶対値 $|v_y|$ の上限値は $k_y/2$ であり、SM制御値 $v_{SM}$ の $y$ 成分の絶対値 $|v_{SMy}|$ の上限値である $k_y$ 以下である。これにより、たとえば、動作開始時にNN制御値 $v$ の出力が安定しない場合であっても、制御入力 $u_{in}$ を安定化することができる。なお、 $|v_x|$ 、 $|v_y|$ の上限値は、それぞれ $|v_{SMx}|$ 、 $|v_{SMy}|$ の上限値以下の任意の値であるようにしてもよい。

【0173】

さらに、 $|v_x|$ 、 $|v_y|$ の上限値は、それぞれ時間変化するようにしてもよい。たとえば、 $|v_x|$ 、 $|v_y|$ の上限値が時間と共に増加して $|v_{SMx}|$ 、 $|v_{SMy}|$ の上限値に近づくようにしてもよい。この場合、 $|v_x|$ 、 $|v_y|$ の上限値は、船体2が目標位置を中心とする所定の範囲内(たとえば、半径6mの円内)にある場合、 $|v_{SMx}|$ 、 $|v_{SMy}|$ の上限値に徐々に近づけてもよいし、一

気に近づけてよい。これにより、学習が進んだニューラルネットワーク制御の効果を適切に反映することができる。また、採泥を開始したタイミングで、 $|v_x|$ 、 $|v_y|$  の上限値を  $|v_{smx}|$ 、 $|v_{smy}|$  の上限値よりも大きいことを許容してもよい。

【0174】

また、本実施形態では、 $x$ -NN172の $x$ -NN172aおよび $y$ -NN172bは、入力層、1つの中間層、および出力層の3つの層からなる簡易なニューラルネットワークである。これにより、 $x$ -NN172aおよび $y$ -NN172bの重み付けの更新、および出力の生成に掛かる時間が短縮できるため、サンプリング周期 $T_s$ を小さくすることができ、船体2の位置および角度をより精度よく保持することができる。

10

【0175】

また、本実施形態に係るニューラルネットワークである $x$ -NN172aおよび $y$ -NN172bは、リアルタイムで学習を行う。これにより、予測できない外乱の変化が存在する場合においても、適切に重み付けを更新することができる。

【0176】

また、本実施形態に係るニューラルネットワークである $x$ -NN172aおよび $y$ -NN172bは、それぞれ $x$ 、 $y$ も入力する。これにより、制御入力 $u_{in}$ をより適切に生成することができる。

20

【0177】

これらのことから、本実施形態に係る海洋システム100によれば、第1の実施形態よりも、さらに安定して採泥作業を行うことができる。

【0178】

なお、図9の処理フローでは説明の便宜上、ステップS6において $x$ -NN制御値 $v_x$ を生成した後に、ステップS11において $y$ -NN制御値 $v_y$ を生成するとしたが、実施形態はこれに限られない。たとえば、 $y$ -NN制御値 $v_y$ を $x$ -NN制御値 $v_x$ の前に生成してもよいし、 $x$ -NN制御値 $v_x$ と $y$ -NN制御値 $v_y$ を同時に生成してもよい。また、ステップS10における $x$ -NN172の重み付けの更新は、ステップS11における $y$ -NN制御値 $v_y$ の生成の後に行われてもよい。

30

【0179】

また、本実施形態においても、角度方向に $x$ -NN制御部17によるニューラルネットワーク制御を用いてもよい。たとえば、 $\theta$ についても $x$ -NN制御値および $y$ -NN制御値を求め、船体2の角度に関する制御入力 $u_{in}$ を、SM制御値 $v_{sm}$ と、当該 $x$ -NN制御値および $y$ -NN制御値との和とする。これにより、船体2の角度についてもより精度よく保持することができる。

【0180】

上記の記載に基づいて、当業者であれば、本発明の追加の効果や種々の変形を想到できるかもしれないが、本発明の態様は、上述した個々の実施形態に限定されるものではない。異なる実施形態にわたる構成要素を適宜組み合わせてもよい。特許請求の範囲に規定された内容およびその均等物から導き出される本発明の概念的な思想と趣旨を逸脱しない範囲で種々の追加、変更および部分的削除が可能である。特に、具体的な数式については、式変形などの数学的に等価な方法によって変形されたものも本願の権利範囲に含まれる。

40

【0181】

<ブロック対角化についての補足>

上述した各実施形態に係る推進機構4において、前後方向、左右方向および角度方向の推進制御は、互いに影響を及ぼさない。上述したように、これは、数学的には、式(1)に示す状態方程式の行列A、Bがいずれも実質的にブロック対角化可能であることを意味する。具体的には、以下のような条件を満たすことである。

【0182】

任意の正則行列Tを用いて、

50

【 0 1 8 3 】

【 数 1 9 】

$$X_{st} = T x_{st}$$

となる  $X_{st}$  を定義する。この場合、式 ( 1 ) は、以下のように変形される。

【 0 1 8 4 】

【 数 2 0 】

$$x'_{st} = A x_{st} + B u_{in}$$

$$T x'_{st} = T A x_{st} + T B u_{in}$$

$$(T x'_{st}) = T A T^{-1} (T x_{st}) + T B u_{in}$$

$$X'_{st} = C X_{st} + D u_{in}$$

ただし、 $C = T A T^{-1}$ 、 $D = T B$  である。

【 0 1 8 5 】

このとき、行列  $C$ 、 $D$  が以下のように、実質的にブロック対角行列で表される場合、行列  $A$ 、 $B$  は実質的にブロック対角化可能であるという。

【 0 1 8 6 】

【 数 2 1 】

$$C = \begin{bmatrix} C_1 & O_{apx} & \cdots & \cdots \\ O_{apx} & C_2 & O_{apx} & \cdots \\ \vdots & O_{apx} & \vdots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

【 0 1 8 7 】

【 数 2 2 】

$$D = \begin{bmatrix} D_1 & O_{apx} & \cdots & \cdots \\ O_{apx} & D_2 & O_{apx} & \cdots \\ \vdots & O_{apx} & \vdots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

ここで、 $i$  を正の整数として、 $C_i$  の次元数は  $D_i$  の次元数に等しい。また、 $O_{apx}$  は、その成分が  $C_i$ 、 $D_i$  の成分よりも十分に小さく、実質的に零行列とみなせる行列である。 $O_{apx}$  の成分が 0 でない場合でも、ある程度の値であればスライディングモード制御のロバスト性によって 0 とみなすことができる。さらに、上述した各実施形態では、 $O_{apx}$  の成分がより大きな値であっても、ニューラルネットワーク制御によって 0 とみなすことができる。具体的には、 $O_{apx}$  の成分が  $C_i$ 、 $D_i$  の成分の 20% 以下程度であれば、行列  $A$ 、 $B$  は実質的にブロック対角化可能であるといえる。

30

【 符号の説明 】

【 0 1 8 8 】

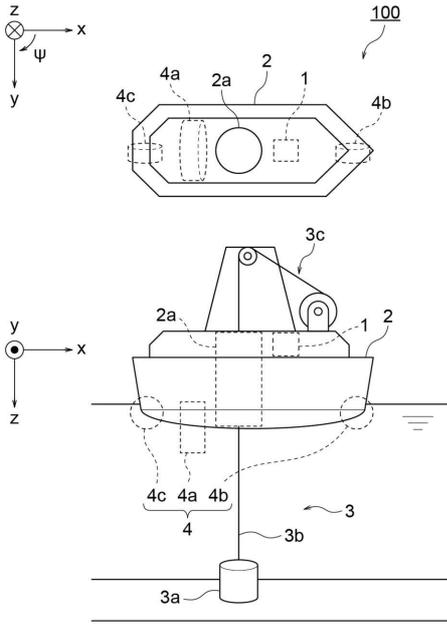
- 1 制御装置
- 2 船体
- 2 a ムーンプール
- 3 採泥機構
- 3 a 採泥器
- 3 b 光ファイバケーブル
- 3 c ウインチ
- 4 推進機構
- 4 a, 4 b, 4 c スラスタ
- 10 処理部
- 11 情報取得部
- 12 状態変数生成部
- 13 SM制御部
- 131 切換関数生成部

40

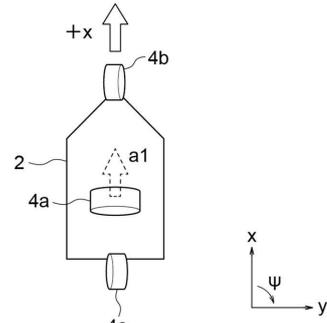
50

1 3 2	S M 制御値生成部	
1 4	- N N 制御部	
1 4 1	- N N	
1 4 1 a	x - N N	
1 4 1 b	y - N N	
1 4 2	- N N 制御値生成部	
1 5	動作選択部	
1 6	制御入力生成部	
1 7	- N N 制御部	
1 7 1	切換関数微分部	10
1 7 2	- N N	
1 7 2 a	x - N N	
1 7 2 b	y - N N	
1 7 3	- N N 制御値生成部	
2 0	検出部	
3 0	スラスト駆動部	
4 0	記憶部	
5 0	入力インタフェース	
6 0	通信部	
1 0 0	海洋システム	20
d	距離	
	切換関数	
	切換関数の時間微分	
$u_{in}$	制御入力	
$v_{SM}$	S M 制御値	
$v$	- N N 制御値	
$v$	- N N 制御値	
$x_{st}$	状態変数	

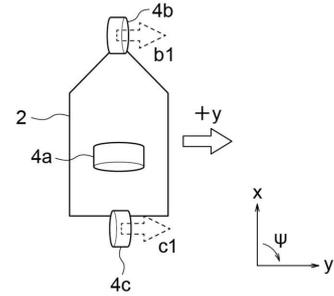
【図1】



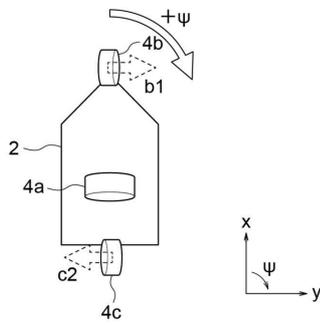
【図2A】



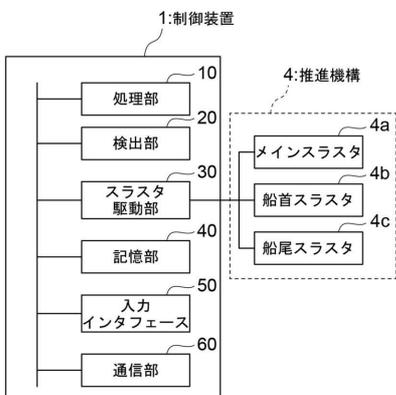
【図2B】



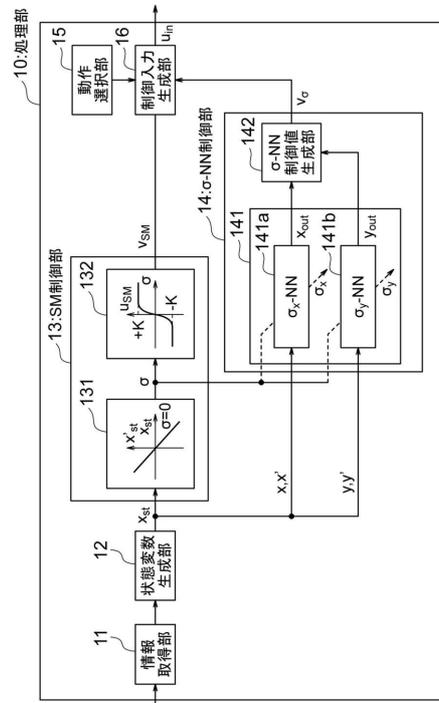
【図2C】



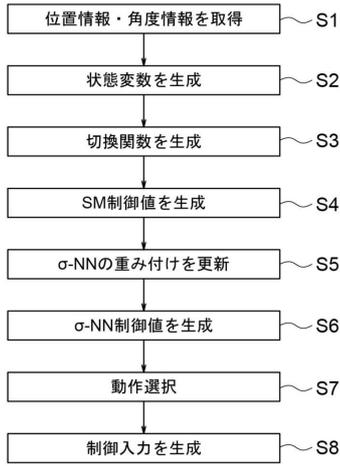
【図3】



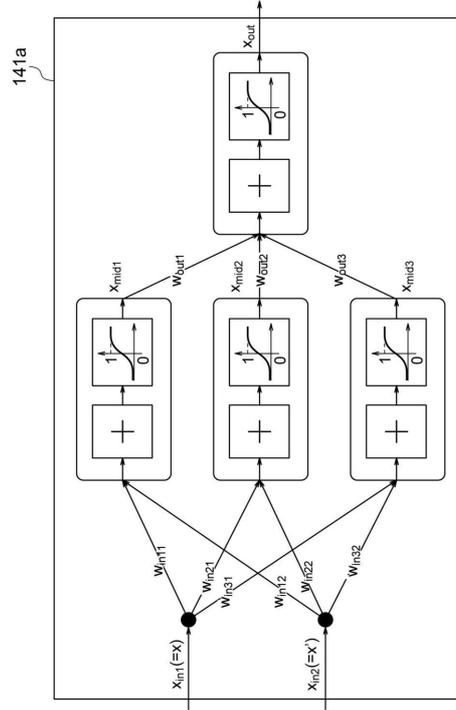
【図4】



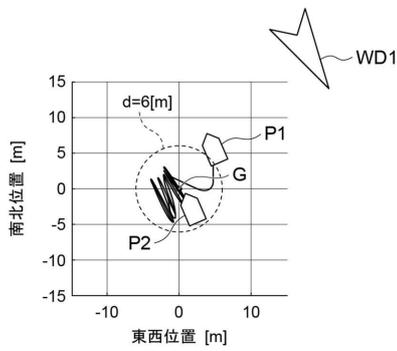
【 図 5 】



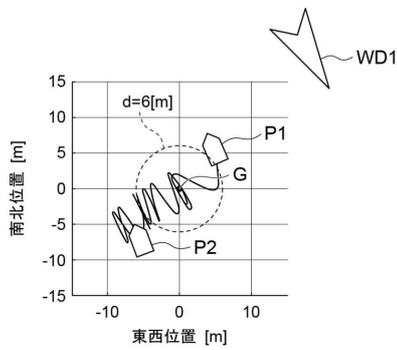
【 図 6 】



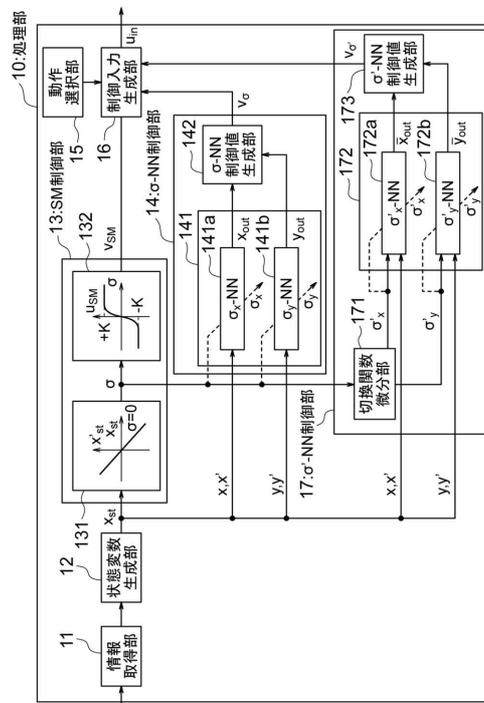
【 図 7 A 】



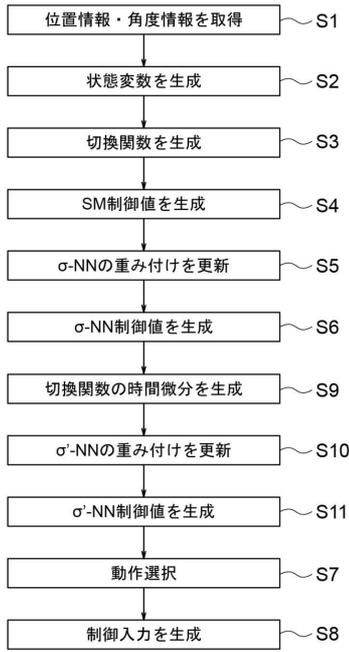
【 図 7 B 】



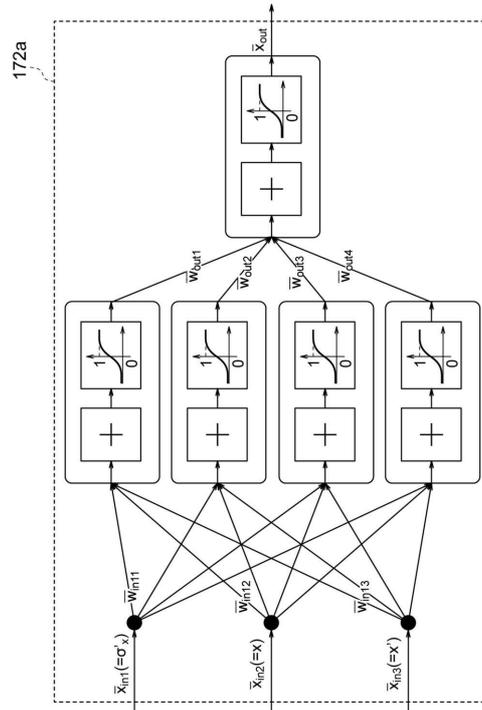
【 図 8 】



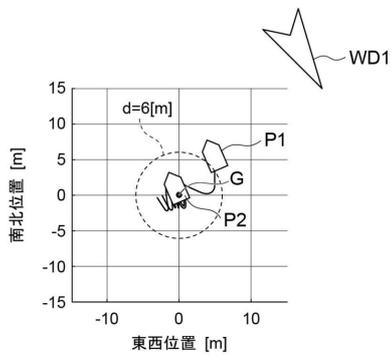
【図9】



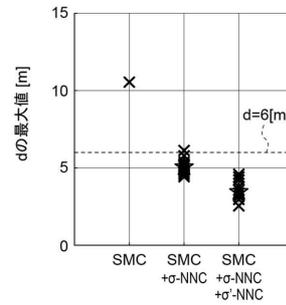
【図10】



【図11】

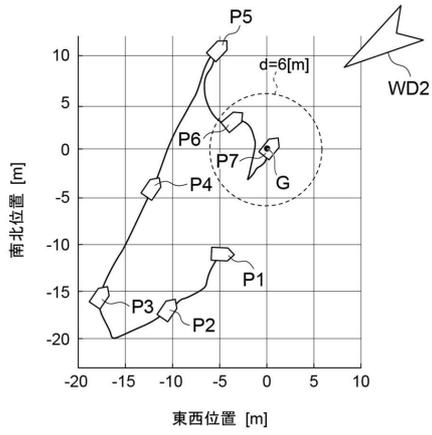


【図12】

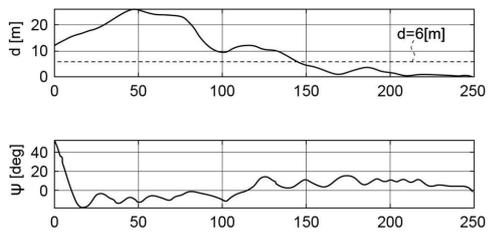


制御手法	平均と標準偏差
比較例: SMC	10.5303[m]
第1の実施形態: SMC+σ-NNC	平均:5.0182[m] 標準偏差:0.3575[m]
第2の実施形態: SMC+σ-NNC+σ'-NNC	平均:3.4249[m] 標準偏差:0.6012[m]

【 図 1 3 】



【 図 1 4 】



## フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I テーマコード(参考)  
G 0 5 D 1/43 (2024.01) G 0 5 D 1/43

(72)発明者 田原 淳一郎  
東京都江東区越中島二丁目1番6号 国立大学法人東京海洋大学内

(72)発明者 藤井 竣  
東京都江東区越中島二丁目1番6号 国立大学法人東京海洋大学内

(72)発明者 眞田 幸尚  
福島県南相馬市原町区萱浜字巣掛場45-169 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構内

(72)発明者 馬場 尚一郎  
神奈川県横須賀市夏島町2番地15 国立研究開発法人海洋研究開発機構内

Fターム(参考) 5H004 GA07 GB11 HA07 HB07 KA74 KD31  
5H301 AA04 CC03 CC06 CC10 GG07 GG14