

令和 4 年 6 月 29 日現在

機関番号：37301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04586

研究課題名（和文）受動リンク機構をもつROVとケーブル張力制御可能なASVによる観測システムの開発

研究課題名（英文）Development of an observation system using an ROV with a passive link mechanism and an ASV with cable tension control system

研究代表者

佐藤 雅紀（Sato, Masanori）

長崎総合科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10709067

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：簡便でリアルタイムに船底の状況を提示し、異常個所の位置を特定可能な水中観測システムの開発を目指す。水中は電波が届かないため、リアルタイムに映像を得るためには有線での通信が必要となる。そこで遠隔操縦型の中口ロボット（ROV）と、洋上を自律移動するロボット（ASV）が連携するシステムとする。本研究では、ROVを用いて船底を模した試験水槽の自動観測を実施した。また、実海域において浮桟橋の底を観測した。さらに洋上を全方位に移動でき、波の揺れに頑健なASVを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した観測システムは、簡便でリアルタイムに船底の状況を提示する基盤技術になると期待される。従来の船底の調査は、港湾係留時にダイバーによる手作業、或いは定期検査時のメンテナンスとなる。そのためフジツボなどの付着による燃費の低下が発生している。そこで、運用が容易でリアルタイムに船底の状況を提示でき、異常個所の位置を特定可能な観測システムによって、安全かつ環境への影響を考慮した船舶の運用へとつながる。

研究成果の概要（英文）：The goal is to develop a simple, real-time observation system that can show the status of a vessel's bottom and identify the location of abnormalities. Since radio waves cannot reach underwater, wired communication is necessary to obtain real-time images. Therefore, a remotely operated vehicle (ROV) and an autonomous surface vehicle (ASV) will be used in cooperation. In this project, automatic observation of a test tank that imitates the bottom of a ship was conducted using an ROV. In addition, the bottom of a floating pier was observed in the actual sea area. Furthermore, we developed an ASV that can move in omni-directions at sea and is robust to wave motion.

研究分野：水中ロボット・ロボット工学

キーワード：水中ロボット ROV ASV

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本は海域面積が世界第 6 位の海洋国家であり、多数の離島が存在する。こうした離島への交通手段として全長 30~100 メートル、定員 200~500 名規模のフェリーが活躍している。これらの船舶が安全かつ環境への影響を考慮して航行するためには、定期的なメンテナンスが重要となる。現在のメンテナンスは、港湾内に係留時におけるダイバーによる手作業、或いは定期検査時におけるドッグ入りとなる。

そこで、港湾内の水深 10 メートル程度の環境において、簡便で、リアルタイムに船底の状況を確認でき、船底全体における異常個所の位置特定が可能な検査システムの開発が望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、ケーブルを介して船底の様子をリアルタイムに提示する遠隔操縦型的水中ロボット (ROV) と、洋上を全方位に移動可能な自律型洋上ロボット (ASV) が連携することで簡便でリアルタイムに船底の状況を提示できるシステムの開発を目指す。また、船底の様子を撮影した画像を貼り合わせたモザイク画像 (パノラマ画像) を生成することで船底の様子全体を把握し、かつ拡大することで詳細な情報を得ることで異常個所の位置特定をする事を目指す。

本研究の課題は (1) 安定した姿勢と一定距離を保ったまま姿勢制御可能な ROV の開発、(2) 実海域における船底の調査、(3) ROV からのリアルタイム映像の中継および電力供給を担う ASV の開発となる。

3. 研究の方法

ケーブルを有する遠隔操縦型ロボットは市販のものを採用した (Blue Robotics 社 BlueROV2)。この ROV への電力供給を担う洋上自律型水中ロボットは一から開発を行う。

(1) 安定した姿勢と一定距離を保つ姿勢制御が可能な ROV の開発として、人工知能の一種である遺伝的アルゴリズム (GA; Genetic Algorithm) を用いた動力学シミュレーションを実施する。遺伝的アルゴリズムは最適化アルゴリズムの一つであり、多峰性の問題の解の探索が可能である。何度も数値計算を繰り返すことから、構造を最適化するための動力学ライブラリは計算速度が速いものが望ましい。開発当初は Open Dynamics Engine を採用し、次に GPGPU を活用できる Physics を採用する。

(2) ROV を実海域において運用し、船底を調査する。船底から一定距離で撮影された映像から画像を取得し、パノラマ化することで船底全体の様子を把握する事ができる。本研究では、まず ROV を一定の水深で運用し、比較的浅い港湾内の岸壁および水底を撮影しモザイク画像 (パノラマ画像) を生成する技術を確立する。次に、船底を模した試験水槽において、ROV の自動撮影に関する技術を確立する。最後に実海域において、浮桟橋の底を対象としてモザイク画像の生成に取り組む。

(3) ROV へ十分な電力供給が可能となるような積載量があること、洋上を移動するため波浪の影響が少ないこと、ROV と連携するため細かい位置制御が可能であること、の 3 点を満たす ASV を開発する。研究当初は従来手法で用いられる双頭船型を予定していたが、セミサブマリン型を採用することにした。セミサブマリン型は石油掘削などに用いられており、十分な積載量を有し、かつ波浪の影響に頑健な構造となっている。

4. 研究成果

上記の研究課題に対し、以下の結果を得ることができた。

(1) 遺伝的アルゴリズムを用いた構造シミュレーション

遺伝的アルゴリズムと動力学エンジンを組み合わせた開発環境を整備した。水中での動作を最適化するため、通常の動力学シミュレーションに水中環境を付加した。具体的には、物体の体積に応じた浮力を付加することと、流体抵抗を付加することである。浮力はシミュレーションの開始時に計算することができるが、流体抵抗は物体の進行方向毎に計算する必要がある。一方、遺伝的アルゴリズムは繰り返し計算することで最適化するため計算の高速化が求められる。そこで、船底を調査する水中ロボットの構造を最適化することを念頭に、流体抵抗は上下方向のみ働くことにした。これは水中ロボットの省エネを考慮し、浮力を用いて船底に張り付いて一定の距離を保つためである。

受動リンク機構を有する水中ロボットのシミュレーション画像を図 1 に示す。受動リンク機構とは外部からの力により受動的にリンクを変形させる機構である。(a)は受動リンク機構を有する ROV のモデルである。(b)は船底に張り付くための最適化シミュレーションの環境を表す。

遺伝的アルゴリズムは、次の 2 つの評価項目で最適化される。(i) ロボットに搭載されるカメラと船底の距離 L が短いこと。(ii) ロボットの中心から上方向の推進力および横方向の推進力が少ないこと。カメラと船底の距離が短いほど評価が高く、推進力が少ないほど評価が高くなる。この 2 つの評価項目は相反するため、2 段階の最適化によって対応する。第 1 段階で、距離 L のみを評価し、最低限動いて距離 L を小さくすることを優先する。第 2 段階として距離 L と推進

力の両方を評価し、距離 L が小さくなり、かつ推進力が少なくなるよう最適化する。最適化するパラメータは受動リンク機構のストッパーの位置および車体に付加する重りの重心位置とその重量である。船底の傾斜角度は、実在する船の形状を参考に、前方を 60deg、中央を 45deg、後方を 30deg とした。

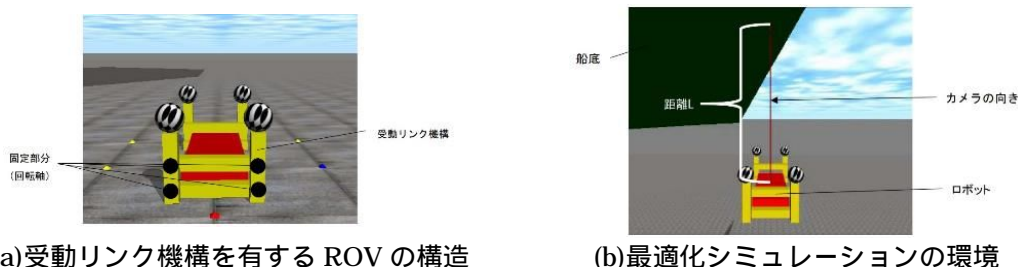


図 1：受動リンク機構を有する ROV と最適化シミュレーションの環境

傾斜角度 45deg に対する最適化の結果を以下の図 2 に示す。0 秒から 10 秒までの ROV の動きを表している。浮力を活用し、受動リンクの姿勢を変化させて船底に張り付いている。

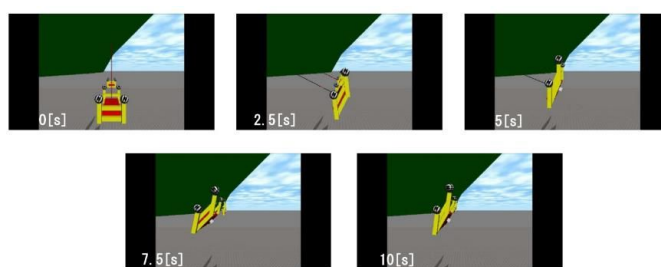


図 2：受動リンクを有する ROV の構造最適化シミュレーションの結果の一例

(2) ROV の実海域での運用

まず ROV を一定の水深で運用し、比較的浅い港湾内の岸壁および推定を撮影しモザイク画像を生成する技術を確認する。結果を図 3 に示す。(a)は海底面を撮影したモザイク画像となる。400 枚の画像を貼り合わせることで約 15m × 6m の範囲を表示することができた。(b)は岸壁を撮影したモザイク画像となる。868 枚の画像を貼り合わせることで約 40m × 15m の範囲を表示することができた。モザイク画像を生成するためには、隣り合う画像同士が 70%ほど重複する必要があるため、かなりゆっくりとした撮影が必要である。

次に船底を模した試験水槽において、ROV が自動で潜航し一定の深度と速度で移動し水面に浮かべたビニルシートを撮影する実験を実施した。ROV の自動航行は、ASV の開発と連携できるようにロボット開発用ミドルウェアである Robot Operating System (ROS) を採用した。試験水槽は長さ 50m、幅 2m、水深 2m、である。船底を模したビニルシートは長さ約 4m、幅 1.8m である。結果を図 4 に示す。(a)が実験の様子を表す。ROV は一定の深度まで先行した後、一定の深度を保ち前進する。ROV に上向きに取り付けがカメラによって船底を模したビニルシートを撮影した。カメラを上向きに設置したことで船底が撮影しやすくなった反面、建物の天井に設置されたライトによる影響があるためモザイク画像を生成する前にカメラの歪み補正や画像処理が必要となった。実海域においても太陽光による影響が想定されることから本手法は有効と考える。

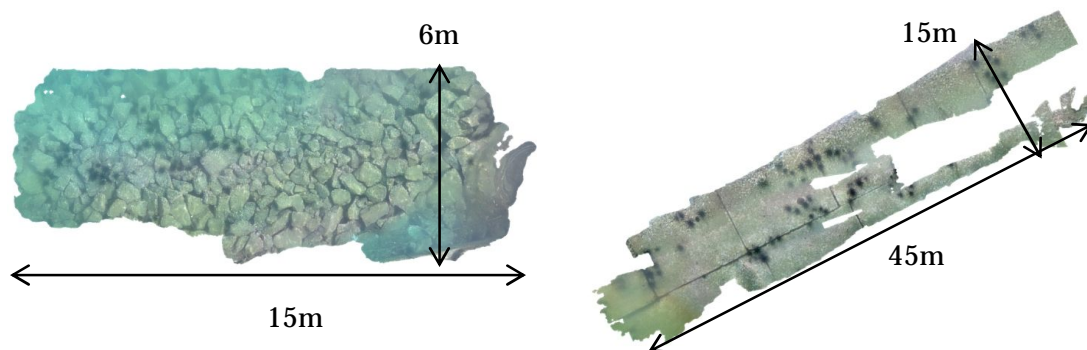
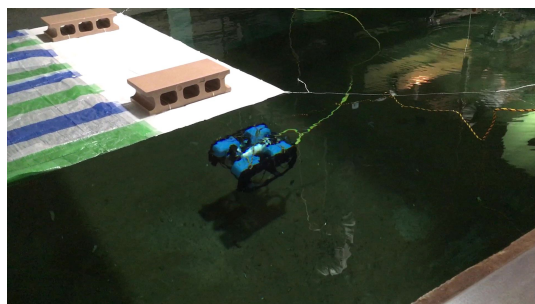


図 3：港湾内の海底および岸壁のモザイク画像の生成

最後に ROV を実海域の浮棧橋の底の撮影に運用した。浮棧橋の先端から ROV を投入し、矩形に移動させる。ロボットの上面に上向きにカメラを取り付け、更に水中ライトを 2 基上向きに設置した。結果を図 5 に示す。907 枚の画像を使用し、9360×5515 ピクセルのモザイク画像の生成ができた。しかしながら、ロボットを矩形に動かしていたはずだが潮流の影響により ROV が流されてしまいモザイク画像は矩形にすることができなかった。

以上から、港湾内の海底と岸壁、浮棧橋の底面のモザイク画像の生成をすることができた。また、船底を模した試験水槽において ROV による自動撮影を実現することができた。



(a) 試験水槽での実験の様子



(b) 生成された船底を模したモザイク画像

図 4 : ROV による船底の自動撮影とモザイク画像の生成



図 5 : 浮棧橋の底面のモザイク画像の生成

(3) ASV の開発

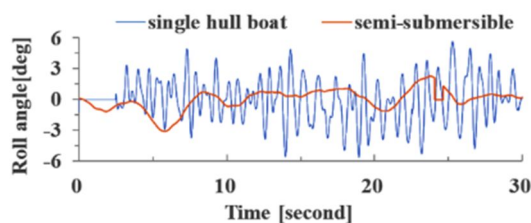
まずセミサブマーシブル型が船型と比較して波浪の影響が少ないことを確認した。簡易防水された容器の中にコンピュータと姿勢センサを設置し、港湾内において波浪の影響による揺れの比較を行った。結果を図 6 に示す。(a)がセミサブマーシブル型、(b)が船型、(c)が搭載したセンサの Roll 方向の角度[deg]の時間変化を表す。グラフは同時刻での計測ではないことに注意したい。同時刻での計測ではないが、計測時間 30 秒において、青色で示す船型は揺れの周波数が高く、振幅も大きく揺れているのに対し、赤色のセミサブマーシブル型は揺れが低周波で振幅も船型と比較して大きくないことが分かる。これは、セミサブマーシブル型が細いパイプで構成されているため水面における構造物の断面積が小さく、波浪の影響が少ないと考えられる。本研究では ROV と連携して行動することから、姿勢が安定して位置保持できるセミサブマーシブル型が有効であることが確認できた。



(a) 提案手法



(b) 従来手法

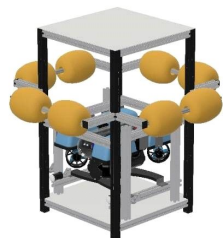


(c) 船体の揺れの比較

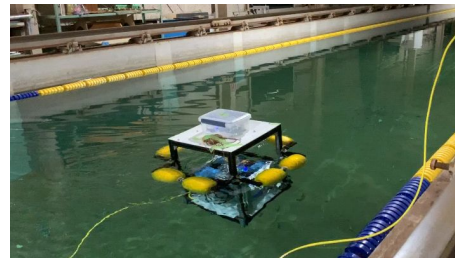
図 6 : セミサブマーシブル型と船型の実海域における波浪の影響の比較

次に ASV 試作 2 号機を開発し、洋上を安定して全方位に移動可能か試験水槽にて動作確認をした。試作 2 号機は、スラスタなど駆動システムを開発する部分を簡略化する目的で BlueROV2 を搭載した。結果を図 7 に示す。(a)が 3D-CAD モデルである。黄色の浮力材と、駆動システムとして ROV を搭載している。(b)が試験水槽での実験の様子である。(c)が機体の Roll 角と Pitch 角の時間変化を表す。重心浮心のバランスが十分に調整されていないため、推進力を与えるたびに振動が発生していることがわかる。これは駆動力として ROV を搭載した影響によるもので、次の試作 3 号機的设计において解消できる問題と考えた。(d)が機体の Yaw 方向の時間変化を表す。目視による遠隔操作のため、開始から 0deg を保って前進し、30 秒付近で回転し、以降 180deg を保って前進していることがわかる。

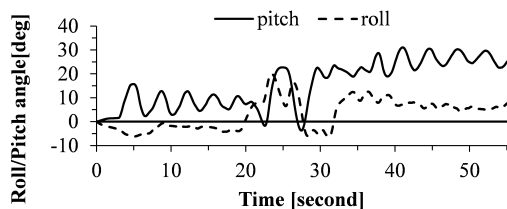
以上からセミサブマーシブル型の ASV が洋上を全方位に移動可能であることが確認された。



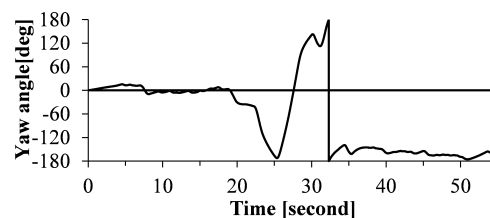
(a)3D-CAD モデル



(b)試験水槽での実験の様子



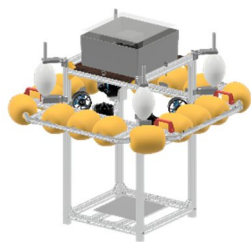
(c)機体の Roll および Pitch の変化



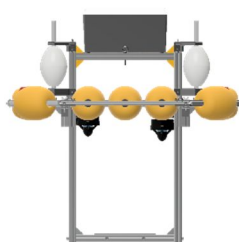
(d)機体の Yaw の変化

図 7：試作 2 号機の開発

最後に、ROV へ十分な電力供給が可能な積載量を有した試作 3 号機を開発する。試作 2 号機を用いた実験で重心浮心の詳細な計算が必要であることが明らかになったので、積載量を確保しつつ、重心と浮心のバランスを考慮して試作 3 号機を開発した。結果を図 8 に示す。(a)および(b)が試作 3 号機の 3D-CAD モデルとなる。(c)が試作 3 号機の外観となる。(d)は試作 3 号機を用いた水槽試験の様子である。試作 2 号機の結果を踏まえ、水面下に完全に没水する黄色の浮力材のほかに、浮力が不足した際に補助的に働く白い浮力材を追加している。3D-CAD 上で重心および浮心を計算し、重心位置にスラスタを配置することで移動の際の機体の揺れを低減できることを確認した。



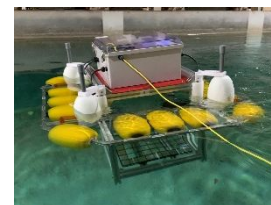
(a)俯瞰図



(b)正面図



(c)試作 3 号機の外観



(d)動作試験

図 8：試作 3 号機の開発

以上、試作 1 号機を用いた検証により、セミサブマーシブル型を採用した ASV は波浪の影響が少なく姿勢が安定することが明らかになった。試作 2 号機を用いた検証により、セミサブマーシブル型の ASV が全方位に安定して移動できることが確認された。試作 3 号機により姿勢を安定させたまま全方位に移動可能であることが確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 七條大樹, 里和樹, 香月紫音, 佐藤雅紀
2. 発表標題 水中ロボット競技会に向けた小型AUVの開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会'22
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 七條大樹, 濱口和也, 佐藤雅紀
2. 発表標題 Semi-Submersible型洋上自律探査機の開発と評価（第2報）
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会'21
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taiki Shichijo, Kazuya Hamaguchi, Masanori Sato
2. 発表標題 Development of a semi-submersible autonomous surface vehicle for cooperating with remotely operated vehicle
3. 学会等名 The 26th International Symposium on Artificial Life and Robotics 2021(AROB 26th 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 七條大樹, 濱口和也, 佐藤雅紀
2. 発表標題 Semi-Submersible 型洋上自律探査機の開発と評価
3. 学会等名 第21回システムインテグレーション部門講演会 (SI2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 七條大樹, 濱口和也, 佐藤雅紀
2. 発表標題 Semi-Submersible型洋上自律探査機の開発
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taiki Shichijo, Kazuya Hamaguchi, Masanori Sato
2. 発表標題 Development of an autonomous surface vehicle for an observation a bottom of ship
3. 学会等名 The 25th International Symposium on Artificial Life and Robotics 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤雅紀, 淵上和輝, 七條大樹, 中山雄樹
2. 発表標題 潮流環境下で用いる扇型海中ロボットの試作
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会'18
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

http://www.it.nias.ac.jp/sato/ Techno-Ocean2021水中ロボット競技会・AUV部門 第3位
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	石井 和男 (Ishii Kazuo)		
研究協力者	松岡 和彦 (Matsuoka Kazuhiko)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関