

平成 26 年 6 月 27 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360390

研究課題名(和文) 船底清掃用水中ロボットシステムの研究開発

研究課題名(英文) Development of an underwater robot for ship-hull cleaning

研究代表者

石井 和男 (ishii, kazuo)

九州工業大学・生命体工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：10291527

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円、(間接経費) 4,110,000円

研究成果の概要(和文)：日本の輸出入における船舶を用いた海上輸送は貿易量の大半を占め、船舶の燃費向上及びCO<sub>2</sub>排出量の削減が望まれている。船舶の船底船側には時間の経過とともに海洋生物が付着し、燃費が悪化するため燃費向上のためには頻繁な船舶清掃が必要となる。船底の清掃は、主にダイバーによる水中作業、或は、ドック入りした時に陸上において行われているが、ダイバーによる清掃は危険を伴う作業である。本研究では、船底清掃に水中ロボットを導入し、港湾に係留された状態で定期的に清掃する船底清掃システムを開発した。

研究成果の概要(英文)：The sea transportation by ships covers most of trade volume, and the technologies to make fuel efficiency better and to reduce carbon-dioxide emissions are key research topics for future. One of the technical issues to improve fuel efficiency of ships is how to prevent the marine biofouling to the ship hulls and remove organisms from ships. In general, the cleaning of ship hull is carried out during the ship inspection in dockyard or by divers in harbour. Frequent cleaning of ship walls is desirable to keep good fuel efficiency, however, the ship inspection on dock is done once a year and the cleaning by divers is high-cost and involves high risk. One of the solutions for the problem is to introduce underwater robots with the function of cleaning ship surfaces. In this research, an underwater robot for ship hull cleaning is developed and examined through ship hull cleaning experiments.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：海中・海底工学 海中機器工学 水中ロボット 船底清掃

## 1. 研究開始当初の背景

海洋沿岸域や港湾は、人にとって身近な存在でありながら、ロボットによる自動化が進んでいない環境である。沿岸域は生物活動が活発であり、エネルギーや炭素、バイオマス等の循環に大きくかかわっているが、ダイバーによる現地調査及び作業が主流である。船舶に注目すると、日本の輸出入における船舶を用いた海上輸送は貿易量の99.8%を占め、海運大手3社が保有する船舶数は、大型船だけでも1500隻を数える。海上輸送によって発生するCO<sub>2</sub>排出量は年間7300万トンと推定され、CO<sub>2</sub>排出量の削減が望まれている。輸送における問題点の一つとして、船舶の船底船側には時間の経過とともに海洋生物が付着することがあげられ、最初の一年間で燃費が20%程度、更に清掃を行わず放置した場合、最悪の場合50%悪化するとも言われている。船底の清掃は、主にダイバーによる水中作業、或は、ドッグ入りした時に陸上において行われている。ダイバーによる清掃は、危険を伴う作業である。船舶の定期検査、中間検査は1年毎に実施されるがコストが高く、効率良い燃費を維持するには清掃の頻度をできるだけ増やす必要がある。現在の船底清掃ロボットは陸上作業用であり、水中において自由に観測可能、かつ清掃機能を有するロボットは国内では例がなく、海外では昨年、米国 ONR (The Office of Naval Research) が車輪で船側にそって移動する水中ロボットを発表している例があるのみとなっている。

本研究では、船底清掃に水中ロボットを導入し、港湾に係留された状態で定期的に清掃することにより、船舶の燃費を良好な状態に維持するシステムを開発する。船舶をドッグ入りさせることなく、港湾における係留中、定期的に船底を清掃することにより燃費の維持が可能となり、運行費用の削減、CO<sub>2</sub>発生量の削減につながる。

## 2. 研究の目的

港湾や魚礁による実海域実験を通じて、ロボットを市場に投入するには、更なる小型軽量化、ロボットの自己位置推定、ロボットに要求されるミッションに応じたツールの取り付け、船底から一定距離を保持して航行・船底の写真撮影、船底の自動清掃、等の要望が得られた。これらの需要を踏まえ、スラスタを用いる従来型的水中ロボットに車輪を加えた新たな水中ロボットの技術課題に関して研究開発を進める。

本研究で開発する船底清掃用水中ロボットは、水中において三次元空間を自由に移動できる機能に加え、側面にブラシを有する清掃ユニット(図1中央部)、清掃時における船底への一定距離保持のための車輪を有する構造となっている。本ロボットにおいて核となる技術となる清掃ユニットは、ブラシとプロペラを組み合わせた構造となっており、

周囲をカウルで覆われている。清掃ユニットは、ロボットが船側船底に接地した時に吸引力を生み出しながら清掃する機能を有する。ここで、ブラシの形状やブラシとプロペラの回転数比、等に関して課題を有する。清掃システムとして機能させるには、ロボットの安定走行のための制御、ロボットの自己位置推定システム、自動走行、水中モザイク画像作成等、多くの開発要素が存在する。船底の検査および清掃を行う水中ロボットシステムを開発する。

## 3. 研究の方法

本研究課題では主に以下の項目に関する成果を報告する。

- (i) 小型でメンテナンスが容易な船底自動検査システムの開発を目標とした水中ロボット本体のモジュール構造化、重心移動機構の開発、及びその制御システムの開発
- (ii) 十分な吸引力と清掃能力を有する清掃ユニットの開発
- (iii) 水中モザイク画像生成システムの開発

試作機の実験結果をもとに、制御性能の向上やユーザーインターフェース、ロボットの軌道生成等、主にソフトウェア開発を中心に研究を進めた。また、清掃ユニットの試作及び性能評価、水中モザイク画像生成システムの検証、小型軽量化を目指して新たな船底清掃ロボットを設計した。2, 3年目は、1年目において設計したロボットの実機製作と基本性能評価実験、及び水中モザイク画像生成システムを開発し、船底清掃ロボットを組み合わせた自動船底清掃システムを構築した。

## 4. 研究成果

### 4.1 ロボットの開発と運動制御

開発したロボットの特徴を以下に述べる(図1, 及び表1参照)。

- ・ロボットの前後に浮力材を兼ねた車輪を有する。車輪はバンパーも兼ねており、前端部と後端部に取り付けられロボットの保護および船舶の損傷を防止している。
- ・清掃用のブラシを中央部に偶数個有する。



図1 開発した水中ロボット

表1 船底清掃水中ロボットの諸元

Types	Remotely Operated Vehicle (ROV)
Structures	Dimensions : 856 × 260 × 360 [mm]
	Dry Weight : 30 [kg]
Sensors	Attitude sensor, Gyro sensor, Depth sensor, Camera(Network: VB-M40) × 2
Actuators	90[W] Thruster × 4 150[W] Thruster × 2 (Brush Unit)

上下のブラシは、船底からの反モーメントを打ち消し合うために、両者は反対方向に回転する。

・清掃ユニットはブラシとスラスタを兼ねており、周囲をカバーで囲われている。カバーは船底に接する程度の長さを有し、船底方向に進む場合、負圧による吸引効果が働き、ロボットを船底に密着させる効果がある。

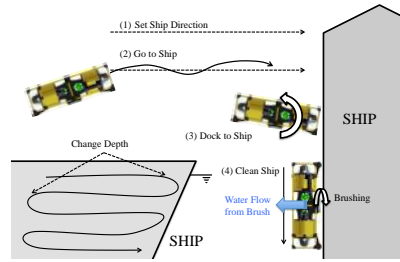
・前後の車輪は、船底にある一定距離を保たせながらロボットが走行できるようにする機能がある。ある程度の曲面に対応させるため、車輪はサスペンション機能を有する。

船底清掃実験におけるロボットの行動は、(1) (2) 船側へのアプローチ、(3) 船側への吸着動作、(4) 一定深度及び姿勢を保持し清掃、の順となる (図2 参照)。特に(1)~(3)は波浪の影響を受けながらの行動となるため、気象条件により手動操作では船体・ロボット本体に損傷を与える可能性があり、操作者による半自動航行とした。(4)においても、清掃作業が進むにつれ船側の角度/形状が変化するため、ロボットが保持すべき目標姿勢が清掃箇所に応じて異なる。

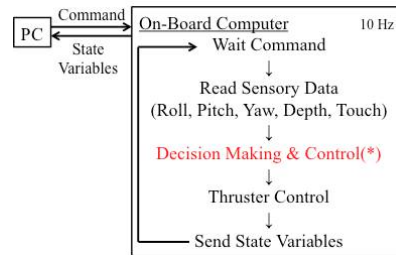
ロボットの制御アルゴリズムを表2に示す。ロボットの行動(2)では、方位角偏差が30度以内の場合、目標ピッチ角0、目標方位角0、深度一定として前進し、方位角偏差が大きい場合は、偏差が小さくなるまで停止し方位角を制御する。行動(3)のドッキングでは、最初清掃ユニットはOFFとし、ロボットが船底と平行になった場合に清掃ユニットをONにし、吸引力を発生させる。行動(4)の清掃行動では、深度偏差に応じて行動を変化させる。深度偏差が小さい場合は、深度を維持しながら目標ピッチ角を0とし、方位角は制御しない。深度偏差が大きい場合は、停止しヒープ方向の推力を大きくする。

(2) 清掃ユニットの開発

本ロボットのブラシユニット (図3) は、2基のスラスタが一体で、一つのモータの軸にプロペラとブラシを持った構造となっている。モータが回転することによりプロペラがダクト内へ水を送り込む力(吸引力)を發



(a) ロボットの行動計画



\*Procedure in Decision Making

- (1) Set Ship Direction, (2) Go to Ship, (3) Docking to Ship, (4) Clean Ship

(b) ロボット内部処理のフローチャート

図2 ロボットの行動制御のフローチャート

表2 ロボットの制御アルゴリズム

Procedure	Condition	Surge	Depth [m]	Pitch [deg]	Yaw [deg]	Brush
(2) Go to Ship	$ \text{Yaw}  < 30 \text{ deg}$ else	GO STOP	Docking Depth	0	0	OFF
(3-1) Docking	$-70 > \text{Yaw} > -110$ else	STOP	Docking Depth	0	-90 deg	ON(Full) OFF
(3-2) After Docking	Num of Touch Sensor "ON" $>= 3$	STOP	Docking Depth	0	No Control	ON(Full)
(4) Clean Ship	Depth Error $< 0.2$ else	GO STOP	Target Depth	0	No Control	ON(Full) ON(Full)

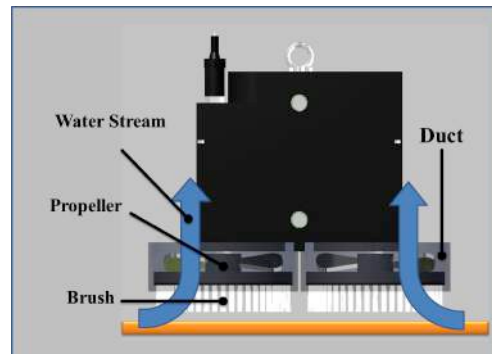


図3 開発した清掃ユニット

生し壁面に吸着する。同時にブラシも回転するため、壁面を清掃しながら移動することが可能となっている。2基スラスタのプロペラのピッチは、逆になっているため、清掃時発生するモーメントを打ち消すように設計されている。ブラシユニットのブラシが吸着力へ及ぼす影響を分析するために、吸着力を様々なブラシを装着し測定した。パラメータとして、ブラシの毛の長さ、太さ、配置、および、フレームの形状を変えた。その結果を図4に示す。図4を①~④の領域に分け、スラスタの推進システムをもとに検討した。



①の状態は、底板は離れているため何の影響もなく、定常状態であると考えられる。そのため、吸着力は一定の値となる。次に②の状態は、スラストの流入方向に障害物があることにより、流体が非定常な状態となり、吸着力が増加し始める。そして、③の状態では、底板がスラストの流入口近くのあるため、流体はさらに非定常な状態となり、吸着力がさらに増加している。④の状態になるとダクト内に十分な水が流入できなくなり、キャビテーションが発生していると考えられ、推力の減少が顕著にみられる。一方で、毛の長いブラシや毛の間隔が広いブラシでは、流体が十分にダクト内に流入するため、吸着力の減少は見られない。

次に、清掃能力の測定として、粘性物質及び固形接着物の剥離実験を行った。この結果から、吸着力による洗浄効果は見られないこと、粘着性の低い物質は、ブラシが通ることにより、剥離できること、粘着性の高い物質は、本ブラシで剥離することは難しいことを確認した。

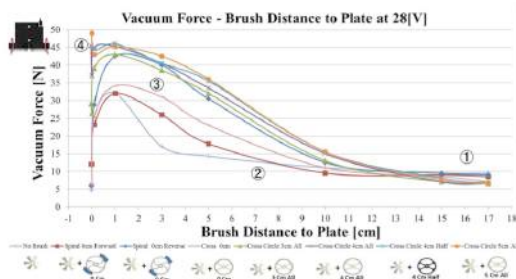


図4 清掃ユニットの吸引力実験の結果

### (3) 水中モザイク画像生成システム

船底の清掃状況を確認するためには、船底のモザイク画像が必要となる。搭載カメラを用いて水中画像撮影実験を行った。夏の透明度が低い海域では、搭載カメラの焦点が合わないため通常的手法では、良好なモザイク画像が得られないことを確認した。本研究では、船底清掃面のモザイク画像を作成するため、Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) 法を用いて特徴点を抽出し、モザイク画像生成実験を行った。その結果を以下に示す。

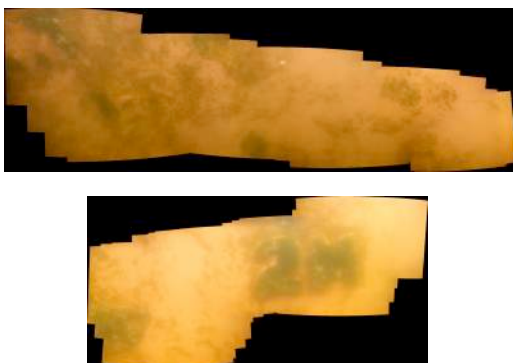


図5 船底映像からのモザイク画像作成

### (4) 船舶を用いた実証実験

船底清掃ロボットの実証実験に参加し、実証実験の内容の確認、トラブル対策の実施、ロボットの動作を検証した。

#### 船底清掃ロボットの動作確認

岸壁から沖に向かってロボットを操作し、船舶へのアプローチモード、ドッキング(90度回転)モード、クリーニングモードの3つの動きを確認した。実験の途中において、PLC通信が不安定になるという問題、過電流によりモータ制御基板がリセットされるといった問題が発生した。これは、プログラム上、スラストへの電流供給が個別にではなく、全スラスト同時に行われていることに起因していることによる。そこで駆動プログラムを改良し、消費電流を抑えることにより対応した。

#### 船底でのクリーニング動作

実際に停泊中のばら積み船を対象として、清掃効果の確認を行った。ロボットの移動に応じて周辺が大きく濁り、船体表面の付着物を巻き上げているのが確認された。さらに船体側面上を反復して洗浄を行う清掃動作を確認した。



(a)岸壁における制御実験



(b)船舶を用いた実験

図6 船底清掃実験の様子

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- ① Yasunori Takemura, Kazuo Ishii, Auto color calibration algorithm using neural networks and its application to RoboCup robot vision, International Journal of Artificial Intelligence, 7 巻 A11 号 (pp. 368 ~ 383), 2011 年 10 月, 査読有り
- ② Takaaki Takemitsu, Masayoshi Honda, Masato Ogura, Taizo Tasaka Atsuhiko Minami, Takumi Yokomichi, Kazuo Ishii, System Design and Increment Hardware Development of an Autonomous Underwater Robot "DaryaBird", AUVSI&ONR's 14th RoboSub Competition Journal Paper (pp. 1 ~ 8), 2011 年 07 月, 査読有り

〔学会発表〕(計 12 件)

- ① Kazuo Ishii, Amir Ali Forough Nassiraei, Takashi Sonoda, Design concept of an underwater robot for ship-hull cleaning, COMPIT' 14, pp. 540-545, Redworth GB, 2014/5/13
- ② Kazuo ISHII, RoboCup Competitions and Practical Robots, ISIS2013, Daejun Korea, 2013/11/13 (招待講演)
- ③ 石井和男, 新たなロボット市場の開拓を目指して, ひろしま IT 総合展, 広島, 2013/10/23 (招待講演)
- ④ 田坂大蔵, フォローナシライアミルアリ, 石井和男, 渡邊啓介, 船底清掃を目的とした水中システムの開発, 日本ロボット学会 学術講演会 2013, 4 頁, 東京, 2013/9/5
- ⑤ 田坂大蔵, フォローナシライアミルアリ, 石井和男, 船底清掃ロボットにおける船底吸着力と清掃能力に関する研究, 日本機械学会 第 14 回「運動と振動の制御」シンポジウム (MOVIC2013), 福岡, 2013/8/31
- ⑥ Kazuo ISHII, RoboCup Technology and Practical Robots, Osaka Univ. GCOE Seminar: Advances in Neuroengineering V, 大阪, 2013/3/8 (招待講演)
- ⑦ Amir Ali Forough Nassiraei, Kazuo Ishii, Development of Ship Hull Cleaning Underwater Robot, 5th International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology (pp. 293 ~ 298), 姫路, 2012/11/5
- ⑧ 横道匠, 石井和男, 小倉将人, AUV に搭載可能な海底生態系への干渉装置に関する研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 (ROBOMECH 2012), 浜松, 2012/05/28
- ⑨ 福田一貴, 石井和男, 北住祐一, 非接触式センサによるデッドレコニングに関する研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 (ROBOMECH 2012), 浜松, 2012/05/28
- ⑩ 石井和男, アミル ナシライ, 竹光考昭 田坂大蔵, 船底清掃ロボットの姿勢制御に関

する研究, 日本機械学会 第 12 回「運動と振動の制御」シンポジウム (MOVIC2011), 長野, 2011/7/1

- ⑪ 田坂大蔵, 竹光考昭, ナシライアミール, 石井和男, 水中用スラストの動特性解析, ロボティクス・メカトロニクス講演会' 11, 岡山, 2011/05/28
- ⑫ 竹光考昭, 田坂大蔵, ナシライアミール, 石井和男, 船底清掃を目的とした水中システムの開発第 2 報: 船底清掃用水中ロボットの姿勢制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会' 11, 岡山, 2011/5/28

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石井和男 (ISHII, Kazuo)

九州工業大学大学院生命体工学研究科・教授

研究者番号: 10291527