

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：11201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K20850

研究課題名（和文）浅瀬における水上ロボットの位置・方位の自律的維持に関する研究

研究課題名（英文）Research on Autonomous Position and Azimuth Keeping for Aquatic Robot in Shallow Ocean

研究代表者

金 天海（Kim, Chyon Hae）

岩手大学・理工学部・准教授

研究者番号：30424815

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、水上ロボットを2台構成するとともに、水上ロボット用位置推定法として、オプティカルフローを用いた画像処理を構成した。また、力学系学習木の耐ノイズ性を向上させ、これをFAD学習と併用してロボットの加速度予測器を構成した。これらのロボットを用いた制御実験の結果、無波環境においてロボットが目標位置付近へと戻ることができること、有波環境において波の影響をキャンセルできること、有波環境においても目標位置・方位付近へと戻ることができることなどが分かった。本研究で開発した学習手法および制御手法はヒト型ロボットや自動車の制御などにも有効であることが分かった。

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed two aquatic robots and an image processing system based on optical flow in order to estimate the position of the aquatic robots. We also developed an acceleration predictor of the robots that is based on dynamics learning tree (DLT) and FAD learning. We improved the effectiveness of DLT against noise. As a result of the control experiments using these robots, we could confirm the three facts, the robots are able to come back around a goal position when there is no wave, the robots are able to cancel the affection from wave, and the robots are able to go back around goal position and azimuth even when there is wave. The learning and control methods that are developed by this research were also effective for the control of humanoid robots and vehicles.

研究分野：ロボティクス

キーワード：知能ロボット 定点制御 船体制御 学習アルゴリズム 動力学 ブラックボックスモデル 逐次学習  
外乱

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 位置・方位を自律的に維持できる水上ロボットは、漁業従事者やマリン・リバースポーツ関係者にとって有用である。図1はウニ漁を行う漁師の写真だが、操船、採集、ゴーグル把持を同時に行う必要があるため、(A) 身体的負担が大きく、(B) 作業効率も低い。



図1 操船(右手), 採集(左手), ゴーグル把持(口)を同時に行う作業者。操船が自動化できれば, 身体負担と作業効率を改善できる。

(2) 水上ロボット位置・方位を自律的に維持することが困難な理由には、(a)位置の定位と(b)波や流れの影響を踏まえた制御が困難であることが挙げられる。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、海や川などの浅瀬において位置・方位を自律的に維持できる水上ロボットの構成論を確立することである。高精度 GPS やソナーでは、時間解像度や外れ値の問題があり、高価でもある。本研究では人工視標の無い浅瀬において、水底画像を用いた位置の定位を行う。

(2) 本研究の目標は、無波環境において水上ロボットの位置・方位を自律的に維持できること、有波環境において水上ロボットの位置・方位を自律的に維持できること、海においてシステム全体の有効性の評価・検証を行うことの3点である。

### 3. 研究の方法

(1) 水底画像処理による定位(図2)及び加速度予測器による予測(図3)の精度向上, 処理の高速化, 及びオンライン化を行う。また、予備実験機をもとに水上ロボット1号機の機体設計と制作を行う。そして、無波環境において水上ロボットの位置・方位を自律的に維持できることを確認する。無波環境における試験結果を踏まえて、水上ロボット2号機の機体設計と制作を行い、1号機と同様に各評価を行う。両機体を用いて実験を行い、有波環境において水上ロボットの位置・方位を自律的に維持できることを確認する。この間、各処理の改良と調整を行う。最後に大船渡海岸においてシステム全体の有効性の評価・検証を行う。

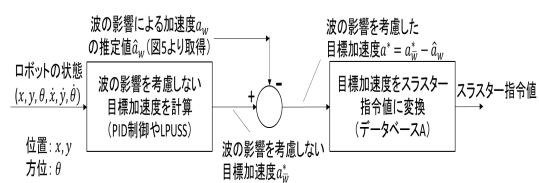


図2 波の影響による加速度の推定値を用いた状態フィードバック制御

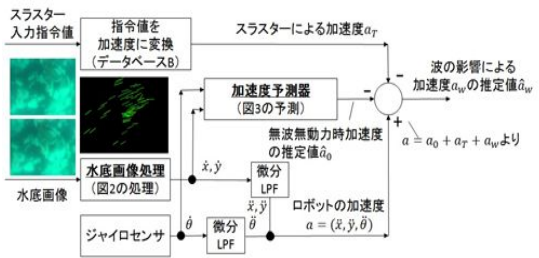


図3 波の影響により水上ロボットに生じる加速度の推定

### 4. 研究成果

(1) 造波水槽など、屋内環境での実験を念頭に水上ロボット1号機を構成した(図4)。本ロボットはカメラ(Point Grey社), 9軸センサ, 操舵用サーボモータ, 推進用ブラシレスモータを備えており、コンピュータより制御できる(図5参照)。

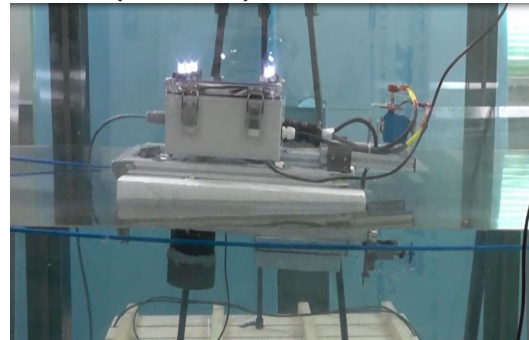


図4 水上ロボット1号機

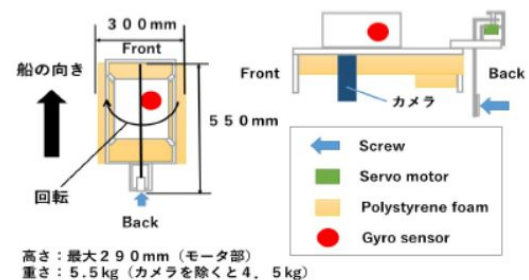


図5 水上ロボット1号機の模式図

(2) 湖や海など、屋外環境での実験を念頭に水上ロボット2号機を構成した(図6)。本ロボットは全長2.7m, 全幅1.14m, 全高0.46mであり、2馬力の推進機(エレキモータ)を備えている。これにより船舶免許を必要とせず、様々な環境で実験を行うことができる。本ロボットに取り付けたセンサ, モータは水上ロボット2号機の場合とほぼ同様である。



図6 水上ロボット2号機

(3) これらの水上ロボットは画像処理によって自己位置を推定する．その推定処理のフローは図7の通りである．ロボットの速度ベクトルの推定では，画像ピラミッドにLucas-Kanade法を適用することでオプティカルフローを計算した．計算されたオプティカルフローの平均値を速度ベクトルの推定値とした．

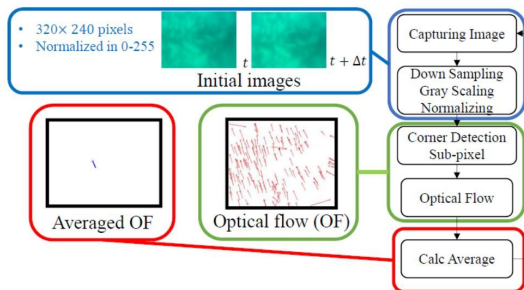


図7 オプティカルフローによる速度推定

(4) 本研究で加速度予測器として用いた力学系学習木はノイズの影響を受けやすく，制御へ応用するためには耐ノイズ性に関する改良が必要であった．そこで，本研究では力学系学習木の予測手法について，更新回数ベース予測，深さベース予測，誤差ベース予測の3手法を提案し，標準的な加速度予測学習において3手法の学習効果を評価した．更新回数ベース予測および深さベース予測では，パラメータ設定が難しく，従来法に劣る場合が多かった(図8, 9)．誤差ベース予測では，パラメータのほぼ全域に渡って従来法を上回る精度が得られた(図10)．

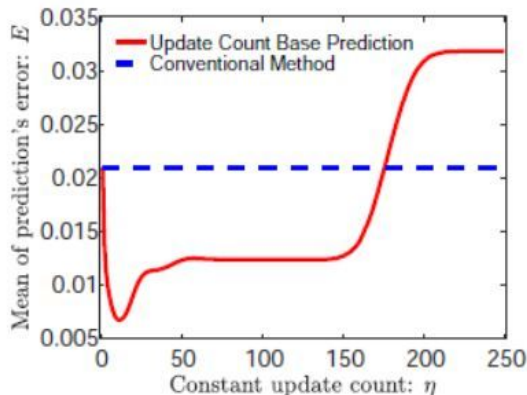


図8 更新回数ベース予測の結果

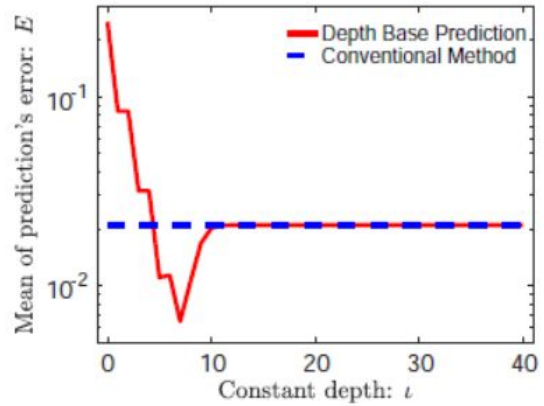


図9 深さベース予測の結果

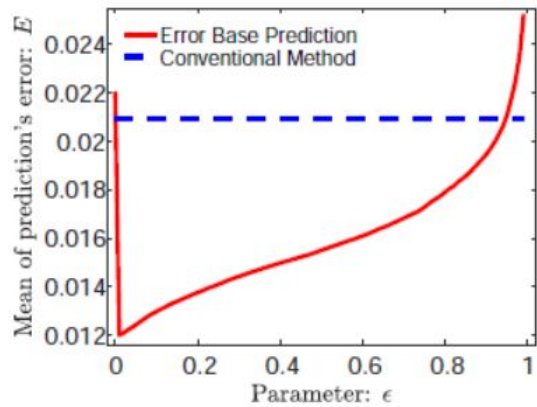


図10 誤差ベース予測の結果

(5) 各水上ロボットを水面上でランダムに運動させた際の軌道データをFAD学習により力学系学習木に学習させることで，ロボットの力学的な振る舞いを学ばせた．これにより，力学系学習木はロボットの加速度を精度良く推定できるようになった．本研究では，これを用いてロボット軌道の予測を行った．図11は力学系学習木を用いたロボット軌道の予測結果である．図中正解(実機)は，減速する水上ロボットの前後方向速度を示しており，図中予測は，0秒時点のロボットの状態から力学系学習木がロボット軌道を予測した結果である．これらの結果が8秒程度の間ほぼ一致したことから，力学系学習木により，ロボットが未来に通る軌道の予測ができたといえる．

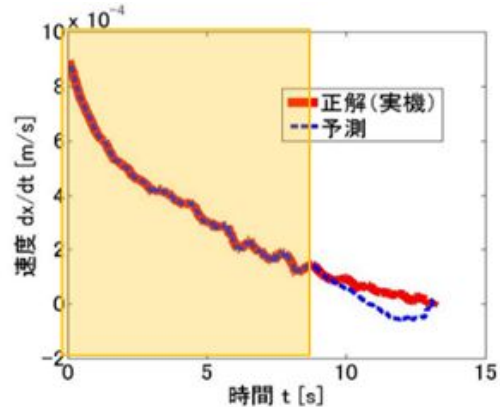


図11 ロボット軌道の予測結果

(6) 力学系学習木の加速度予測を用いて、水上ロボットに対して、波や流れの影響を踏まえた定点制御に関する試験を行った。図12は、無波環境にて目標位置(0)からロボットを変位させた際に、同じ位置へ自動的に戻れるかを試験した結果である。図中実線はロボットが実際に辿った軌道であり、点線は力学系学習木が行ったロボット軌道の予測のうち代表的なものを示している。力学系学習木はロボットがモータを停止した際にロボットがとる軌道を予測している。ロボットは、約6秒の時点で目標位置から十分に離れ、目標位置へ向けて前進制御を開始した。約14秒の位置において、力学系学習木が予測するロボットの軌道が目標位置を割り込んだため、ロボットは後進制御(ブレーキ)を初めた。約18秒の時点において、力学系学習木が予測する軌道が目標位置付近となったため、ロボットはモータを停止した。約20秒の時点では、モータを停止した反動でロボットが目標位置へと近づいていることが分かる。

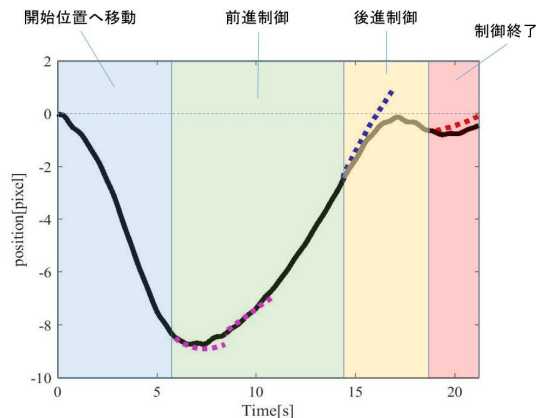


図12 ロボット軌道の制御結果(無波時)

(7) 有波環境にて同様の試験を行った。本実験では、造波水槽により波高2cm,周期5sの波をロボットの前から送った。また、ロボットを手で押すことで位置及び方位に外乱を与えた際の挙動を検証した。図13にその結果を示す。手で押す前のロボットは波の影響をキャンセルしながら初期位置(0),初期方位付近へ留まっていた。ロボットを手で押すと、ロボットは約0.3m後退し、再び初期位置付近へ戻ることができた。

(8) 2017年3月10日(金)に大船渡湾において、大船渡市役所、越喜来漁協、アサヤ株式会社、岩手大学関係者の立会のもと、水上ロボット2号機を用いた実験を行いその性能を確認した。

(9) 本研究では、水上ロボットを2台構成するとともに、水上ロボット用位置推定法として、オプティカルフローを用いた画像処理を構成した。また、力学系学習木の耐ノイズ性を向上させ、これをFAD学習と併用してロ

ボットの加速度予測器を構成した。これらのロボットを用いた制御実験の結果、無波環境においてロボットが目標位置付近へと戻ることができること、有波環境において波の影響をキャンセルできること、有波環境においても目標位置・方位付近へと戻ることができるなどが分かった。本研究で開発した学習手法および制御手法はヒト型ロボットや自動車の制御にも有効であることが分かった(学会発表 など)。

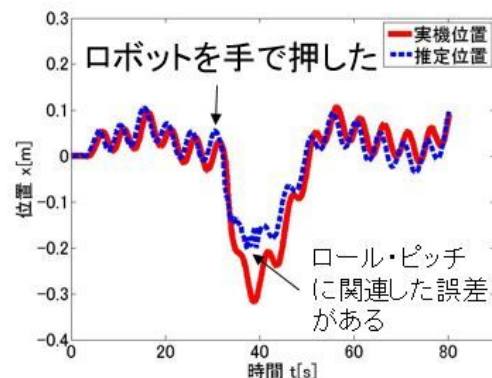


図13 ロボット軌道の制御結果(有波時)

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

Chyon Hae Kim, Shigeki Sugano, Executing Optimized Throwing Motion on Robot Arm with Free Joint, Advanced Robotics, Vol. 30, No. 24, 2016, pp. 1571-1578

Chyon Hae Kim, Shigeki Sugano, Closed loop trajectory optimization based on reverse time tree, Inter. Journal of Control, Automation, and Systems (Springer), Vol. 14, No. 6, 2016, pp. 1-9

Chyon Hae Kim, Shigeki Sugano, Tree Based Trajectory Optimization based on Local Linearity of Continuous Non-linear Dynamics, IEEE Transaction on Automatic Control, Vol. 61, Iss. 9, 2016

[学会発表](計13件)

金天海、菅原康滉、三浦勇氣、栗林倫、沼倉彬雄、加藤成将、佐藤和幸、富澤武弥、三好扶、明石卓也、力学系学習木における誤差ベース予測アルゴリズム、情報処理学会数理モデル化と問題解決研究会予稿集、2017

菅原康滉、沼倉彬雄、金天海、力学系学習木の対ノイズ性能の向上、情報処理学会東北支部研究会予稿集、No. 3-5, 2016  
栗林倫、三浦勇氣、沼倉彬雄、富澤武弥、

金天海、自律制御を目的とした小型船舶の開発、計測自動制御学会東北支部大会予稿集、No. 301-3、2016  
Kanta Watanabe, Shun Nishide, Manabu Gouko, Chyon Hae Kim, Epsilon Greedy Babbling -Exploitation and Exploration in Online Incremental Babbling-, In Proc. of IEEE Inter. Conf. on Intelligent Robotics and Systems, Workshop on Artistically Skilled Robots, 2016  
栗林倫、三浦勇氣、菅原康滉、沼倉彬雄、富澤武弥、金天海、海における自律安定化を目的とした小型船舶の開発、日本ロボット学会学術講演会予稿集、2016  
沼倉彬雄、加藤成将、佐藤和幸、富澤武弥、三好扶、明石卓也、金天海、画像処理を用いた小型船舶における速度推定法の検討、動的画像処理実用化ワークショップ予稿集、2016  
Akio Numakura, Shigenobu Kato, Kazuyuki Sato, Takeya Tomisawa, Tasuku Miyoshi, Takuya Akashi, Chyon Hae Kim, FAD learning: Separate Learning for Three Accelerations -Learning for Dynamics of Boat through Motor Babbling-, In Proc. of IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation, 2016, pp. 5609-5614  
金天海、小型船舶の自律安定化制御、テクニカルショウヨコハマ、2016  
Kanta Watanabe, Shun Nishide, Manabu Gouko, Chyon Hae Kim, Fully Automated Learning for Position and Contact Force of Manipulated Object with Wired Flexible Finger Joints, In Proc. of Inter. Conf. on Industrial, Engineering Other Applications of Applied Intelligent Systems, 2016, pp. 753-767  
沼倉彬雄、加藤成将、佐藤和幸、富澤武弥、三好扶、明石卓也、金天海、力学系予測による小型船舶の外乱推定、日本ロボット学会学術講演会予稿集、2015  
Chyon Hae Kim, Research Topics of Kim Laboratory, Myanmar-Japan Symposium, 2015  
金天海、ウニ・アワビ漁に活用できる自律安定小型船舶の開発、気仙ネットワークサロン、2015  
金天海、ウニ・アワビ漁に活用できる自律安定小型船舶の開発とその派生研究、INS 水産ロボティクス研究会、2015

〔図書〕(計1件)

Chyon Hae Kim, Trajectory Planning, Advances in Engineering Research (NOVA), Vol. 13, 2016

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 情報処理装置、情報処理方法、情報処理プログラム、及びICチップ

発明者: 金天海、沼倉彬雄、菅原康滉、出澤純一

権利者: 岩手大学及び株式会社 AISing

種類: 特願

番号: 2017-50459

出願年月日: 2017年3月15日

国内外の別: 国内

〔その他〕

<http://diginnos-server.kim.cis.iwate-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

金 天海 (KIM, Chyon Hae)

岩手大学・理工学部・准教授

研究者番号: 30424815

### (2) 研究協力者

佐々木 義久 (SASAKI, Yoshihisa)

富澤 武弥 (TOMISAWA, Takeya)

中嶋 久吉 (NAKAJIMA, Hisayoshi)

船砥 秀市 (FUNATO, Shuichi)

小山 博国 (OYAMA, Hirokuni)

明石 卓也 (AKASHI, Takuya)

三好 扶 (MIYOSHI, Tasuku)

小笠原 敏記 (OGASAWARA, Toshiki)

松林 由里子 (MATSUBAYASHI, Yuriko)