

令和元年6月6日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06186

研究課題名(和文) マニピュレータを持つ浮遊型水中ロボット(UVMS)に対する力制御法の開発

研究課題名(英文) Development of a force control method for underwater vehicle-manipulator systems

研究代表者

相良 慎一 (SAGARA, Shinichi)

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：50235199

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)：本研究は、腕に力覚センサを設置した3リンク双腕水中ロボットを研究対象とし、マニピュレータを持つ浮遊型水中ロボット(UVMS)の力制御法(インピーダンス制御法)の開発を、実験を通して行うことを目的として実施した。良好な手先位置制御性能が得られる制御法を適用したUVMSであれば、ロボットベースが浮遊していても、地上用インピーダンス制御法により力制御が実現可能であることを明らかにした。また、筆者らが提案している位置制御法以外のUVMS位置制御法では、良好な手先位置制御性能が得られないことも明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

極限環境で人間に代わって作業する、腕を持つ水中ロボットの制御法開発はシミュレーション研究が中心であり、実験に基づいたものはほとんど見当たらない。研究成果の学術的意義の一つ目は、腕による力作業を実現するためには、良好な手先制御性能が必要不可欠であることを明らかにした点である。また、二つ目は、そのような状況であれば、地上用力制御法が適用可能であることを明らかにした点にある。

研究成果の概要(英文)：In this research, using a 3-link dual-arm underwater robot with a force sensor equipped to the arm, force control method, especially impedance control method, for floating type underwater robot (UVMS) has been developed.

It is clarified that the force control can be realized by the impedance control method for ground, if the good position control performance of the hand of UVMS can be obtained. Moreover, it is also clarified that many UVMS position control methods, without our proposed method, cannot obtain good hand position control performance.

研究分野：ロボット工学, 制御工学

キーワード：水中ロボット UVMS 力制御 インピーダンス制御 位置制御

1. 研究開始当初の背景

(1) マニピュレータを持つ水中ロボット (UVMS) の研究開発が行われており、UVMS 制御法としては、ヴィークル (ベース) とマニピュレータ手先の位置・姿勢制御法が多く提案されている。しかしながら、これらの制御法は、ベースと手先の 3 次元空間(作業空間) の目標値を幾何学的関係を用いてベースとマニピュレータ関節角(関節空間) の目標値に変換し、関節空間における位置と速度のフィードバックにより目標値と実測値の偏差を零にする方法である。幾何学的関係のみではベースとマニピュレータは互いにダイナミクス (運動) の影響を考慮できない。また、一般にプロペラスラストを用いて制御されるベースは、関節と比較して動きが遅く、マニピュレータの運動による影響を大きく受ける。したがって、ベースの制御性能は劣化し、結果として手先の良好な制御性能も期待できない。また、実験を行った研究はほとんど見当たらない。

研究代表者は、作業空間におけるベースおよび手先の制御偏差を零にする、UVMS 用分解加速度制御 (RAC) 法を提案している。また、提案制御法の有用性は、双腕 3 リンク水中ロボットを用いた手先とベースの位置姿勢制御実験により示している。

(2) さて、地上用マニピュレータと同様に、UVMS においてもマニピュレータによる環境との接触作業の実現は必要不可欠である。しかしながら、ベースが固定または地上で停止しているマニピュレータと異なり、UVMS のベースは 3 次元空間で浮遊した状態にあるため、マニピュレータが環境から受ける反力によるベースの変動が十分考えられる。しかしながら、力制御法の UVMS への適用研究は 1 件しか見当たらず、また、実機を用いた有用性検証も行われていない。したがって、UVMS に対する有用な力制御法は存在しないと言える。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、研究代表者らが提案している UVMS 用 RAC 法を基本とした、実験用ロボットを用いた UVMS の力制御法開発である。

(2) 手先が壁などの環境に与える力とモーメントを計測するために力覚センサを使用する。力制御実験を行なうためには、水中用力覚センサが必要であるが、そのような力覚センサは存在しないため、丸形ジャバラなどを用いて防水力覚センサユニットを開発する。

(3) 壁など固定された環境を対象として、手先が環境に与える力とモーメントを UVMS 用 RAC 法に付加した、自律型 UVMS の力制御法、特に、インピーダンス制御法を開発する。

3. 研究の方法

(1) 手先が壁などの環境に与える力とモーメントを計測するため、購入力覚センサを丸形ジャバラと部材により覆う構造の、防水力覚センサユニットを試作した。

(2) 研究代表者は、MATLAB/SIMULINK 上で動作する双腕 3 リンクロボットのシミュレーションモデルおよび、位置姿勢制御系を構築している。そこで、防水力覚センサユニット開発と並行して、実験機のシミュレーションモデルと基本的なインピーダンス制御系の構築を行なった。

(3) シミュレーションを通して開発した力制御系を実験機に対して構成し、種々の条件下における制御実験を行ない、制御系の検討を行った。また、実験は、浮遊状態における片手による壁の押しつけ、水中固定物体を軽く片手持持した状態における壁の押しつけなどを行った。

4. 研究成果

(1) ロボットによる力制御実験を行っていくためには力覚センサが必要であるが、研究代表者らが知る限り水中用力覚センサは存在しない。そこで、水深 1[m]程度で使用可能な、実験環境下 6 軸力覚センサ (株式会社ワコーテック社製 WEF6A-P02-104) を用いた、図 1 に示す水密型力覚センサユニットを試作した。図 2 はユニットの計測結果例であり、地上

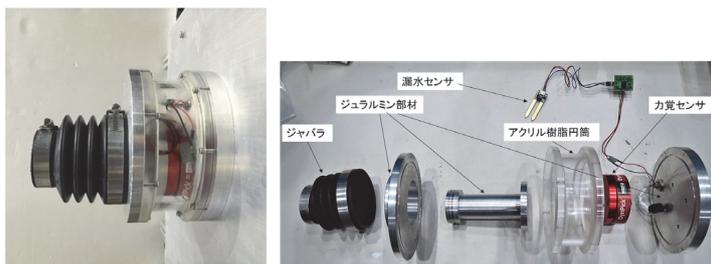


図 1 水密型力覚センサユニット

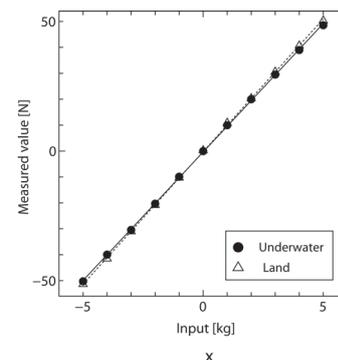


図 2 計測結果例

と同様の計測が可能であることを確認した。

(2) 力制御を行うためには、手先位置が精度よく制御されなければならない。研究代表者らが提案している UVMS 用 RAC 法(文献①)以外の UVMS 用位置制御法(文献②)は、手先位置を直接制御する方法ではなく、手先目標位置と幾何学的に対応するマニピュレータ関節目標値を求めて関節角度を制御する、計算トルク法に基づいている。したがって、手先を間接的に制御する方法であるため、ロボットベースの位置誤差やロボットのモデル化誤差の影響により、良好な手先位置制御性能が得られないことが考えられる。そこで、計算トルク法に基づいた方法として、モデル化誤差にロバスト(頑健)なスライディングモード制御法(図 3)と研究代表者らの提案位置制御法(図 4)の制御性能比較を、図 5 の挙動を示す制御シミュレーションにより行い、計算トルク法に基づく方法では、手先位置誤差が残るという問題点を明らかにした。

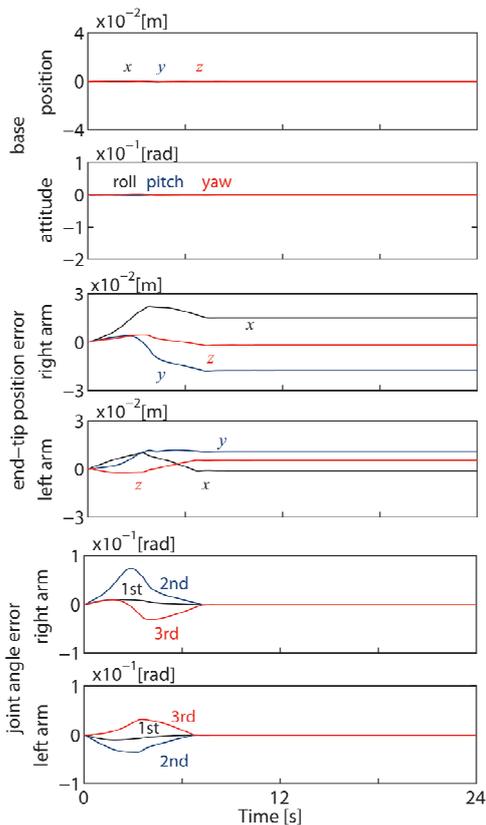


図 3 SMC 法

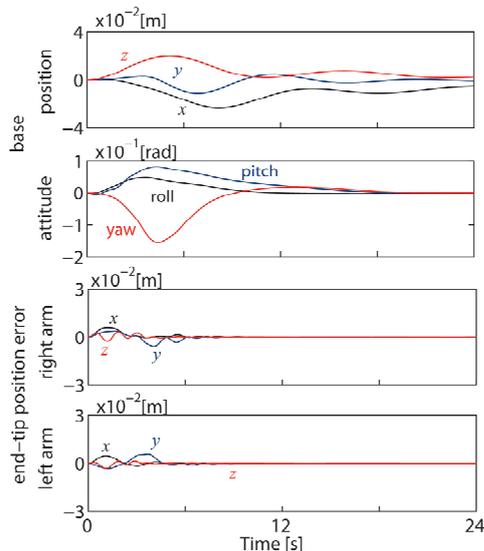


図 4 RAC 法

(3) 良好な手先位置制御性能が得られる制御法である UVMS 用 RAC 法を適用した UVMS であれば、ロボットベースが浮遊していても、地上用インピーダンス制御法(文献③)により力制御が実現可能であることを明らかにした。

(4) 双腕水中ロボットの作業として、まず、ベースの安定を目的として固定物体を片手把持し、つぎに、固定物体を把持していない方の腕の手先位置および力制御を行うことが十分考えられる。UVMS 用 RAC 法を用いれば、これらの作業を実現できることを、図 6 の双腕水中ロボットを用いた実験より確認した。

(5) インピーダンス制御法としては、対象とする片手に力制御ベースインピーダンス制御法を適用して直接力制御する方法と、所望の力を発生させるための手先目標位置を導出する方法である位置ベースインピーダンス制御法(文献④)がある。

そこで、両方の適用実験を行い、いずれも同様な力制御性能が得られることを確認した。図 6 は位置制御ベースインピーダンス制御法を適用した場合の、固定物体片手把持状態における制御実験結果例である。

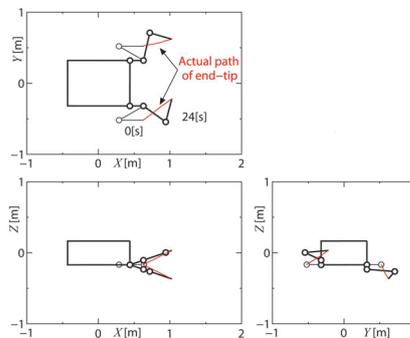


図 5 ロボットの挙動

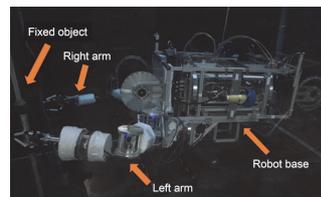


図 6 双腕水中ロボット

<引用文献>

① Radzi Bin Ambar, Shinichi Sagara, Experiment on a dual-arm underwater robot using

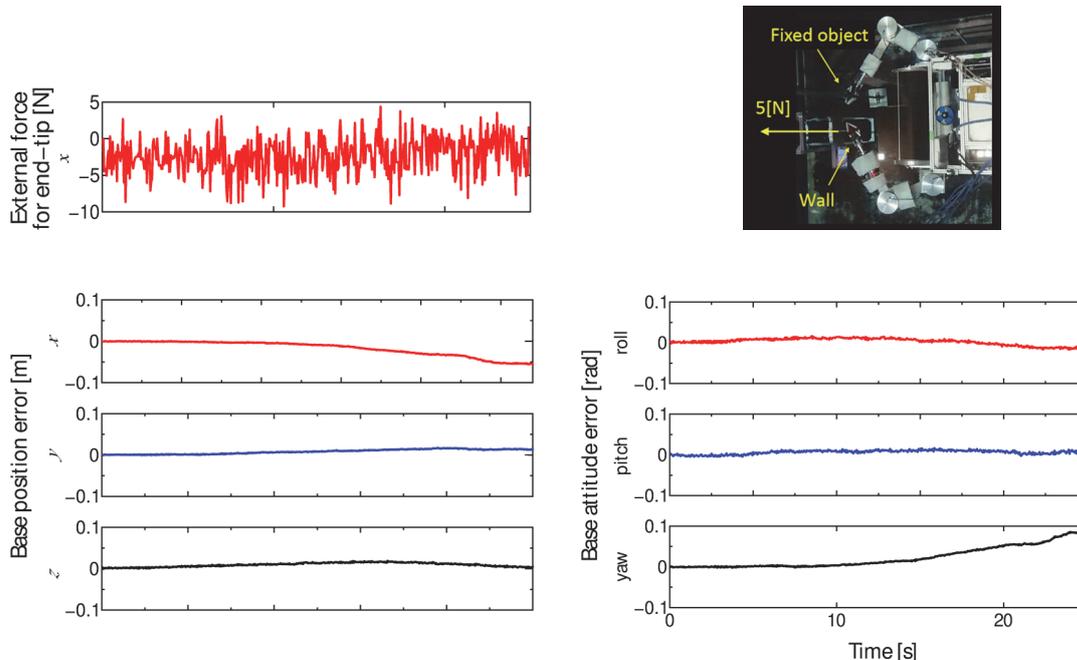


図 7 固定物体片手把持状態における位置ベースインピーダンス制御実験結果

resolved acceleration control method, *Artificial Life and Robotics*, 20, pp. 34-41, Springer, 2015

- ② 例えば, G. Antonelli, *Underwater Robots - Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems*, Springer, 2003
- ③ T. Yoshikawa, *Foundations of Robotics*, MIT Press. pp.211-221, 1990
- ④ B. Heinrichs, N. Sepeshri, A. B. Thornton-Trump, Position-based impedance control of an industrial hydraulic manipulator, *Proc. 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 284 - 290, 1996

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 13 件)

- ① 川口貴之, 山本伸吾, 関優, 相良慎一, 武村史朗, UVMS 用分解加速度制御法を用いた 3 リンク双腕水中ロボット的位置および力制御実験 - 固定物体を片手把持した場合 -, *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019*, 2A2-H09 (4 ページ), 2019
- ② Yutaka Seki, Yuichiro Taira, Shinichi Sagara, Radzi Ambar, Force control of a dual arm underwater vehicle-manipulator system, *24th International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)*, pp. 1032-1037, 2019
- ③ Hikari Nakano, Shinichi Sagara, Radzi Ambar, Resolved acceleration control and sliding mode control of a dual arm underwater vehicle-manipulator system, *24th International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)*, pp.1026-1031, 2019
- ④ Yutaka Seki, Shinichi Sagara, Radzi Ambar, Impedance Control of Dual-Arm 3-link Underwater Robot - In the Case of Grasping a Fixed Object Lightly with One Hand -, *International Conference on Information and Communication Technology-Robotics (ICT-ROBOT2018) (国際学会)*, FA1.1(4 ページ), 2018
- ⑤ Hikari Nakano, Shinichi Sagara, Radzi Ambar, Resolved Acceleration Control (RAC) of Dual-Arm 3-Link Underwater Robot - Comparison of Control Performance between RAC Method and Computed Torque Method -, *International Conference on Information and Communication Technology-Robotics (ICT-ROBOT2018) (国際学会)*, FA1.6(4 ページ), 2018
- ⑥ 相良慎一, 武村史朗, UVMS 用位置姿勢制御法の比較検討, 第 19 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.185-190, 2018
- ⑦ 山本伸吾, 川口貴之, 相良慎一, UVMS 用位置制御法の比較検討, *日本機械学会九州支部北九州講演会講演論文集*, pp. 76-80, 2018
- ⑧ 山本伸吾, 川口貴之, 相良慎一, 武村史朗, 固定物体を片手把持した浮遊型 3 リンク双腕水中ロボットの分解加速度制御, *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018*, 2P1-A12(3 ページ), 2018
- ⑨ 関優, 相良慎一, 武村史朗, 浮遊型双腕ロボットに搭載した 3 リンクアームのインピーダンス制御, *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018*, 2P1-B07(3 ページ), 2018

- ⑩ Shingo Yamamoto, Takayuki Kawaguchi, Shinichi Sagara, Radzi Ambar, Resolved acceleration control of a 3-link dual-arm underwater robot - Simulation for underwater robot gripping fixed underwater object with one hand -, 23rd International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会) pp.643-647, 2018
- ⑪ Yutaka Seki, Yuichiro Taira, Shinichi Sagara, Radzi Ambar, Impedance control of a 3-link manipulator mounted on position-controlled floating underwater robot by resolved acceleration control method, 23rd International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会) , pp.648-652, 2018
- ⑫ 関優, 寺原竜生, 相良慎一, UVMS を対象とした水密機構を有する力覚センサユニットの開発. 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.1307-1310, 2017
- ⑬ 関優, 山本伸吾, 相良慎一, 田村正和, 浮遊型水中ロボットに搭載した3リンクマニピュレータのインピーダンス制御, 第35回日本ロボット学会学術講演会, 3K3-03(4ページ), 2017

[その他]

ホームページ

<http://lab.cntl.kyutech.ac.jp/~sgrlab/Welcom.html>

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。