

氏 名	田 村 正 和
学 位 の 種 類	博 士 (工学)
学 位 記 番 号	工博甲第245号
学位授与の日付	平成19年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学 位 論 文 題 目	マニピュレータを搭載した水中ロボットの分解加速度制御に関する実験的研究
論 文 審 査 委 員	主 査 教 授 田 川 善 彦 ” 小 林 敏 弘 ” 芹 川 聖 一 助教授 相 良 慎 一

## 学 位 論 文 内 容 の 要 旨

広大な海洋空間は地球上に残された最後のフロンティアと呼ばれて久しい。生産素材やエネルギーとしての鉱物資源の確保、防災を絡めた学問的見地からの海洋地質調査など、海洋開発は人間の生活にとって非常に重要な位置を占めると考えられ、今日まで海洋開発が積極的に進められてきている。しかしながら、その作業環境は宇宙空間と同様に人間にとって非常に厳しい環境下にあり、水中は高水圧、浮力に伴う重量の減少、非一様な複雑な流れ、電波等の不透過といった極限環境であり、人間にとっては活動が著しく困難な環境である。そのため、人間に代わり極限環境下で所定の作業を行う水中作業用ロボットの要望は高く、水中ロボットに関する研究が盛んに行われている。

水中作業用ロボットは、単にカメラやセンサを用いて調査、検査を行う水中ヴィークルと、人間のように作業用アームを使用して複雑な作業をおこなう自立型水中ヴィークル・マニピュレータシステム (Underwater Vehicle-Manipulator System; UVMS) に大別され、前者の水中ヴィークルは実用化されている。しかしながら、後者の UVMS はまだ研究段階にあり、モデリングと制御に関する研究が現在活発に行われている。

これまでに提案されている UVMS の制御法は、まず、運動学関係のみでマニピュレータ手先の希望加速度を目標関節角加速度に変換し、つぎに、ベース位置・姿勢角およびマニピュレータ関節角に関する計測値と目標値の誤差に基づき、流体力を含む運動方程式を用いた計算トルク法によりベースおよび関節の制御入力を求めている。したがって、マニピュレータ手先に関しては間接的な制御法であると言える。また、水中ロボットには複雑な流体力が作用するため、モデリングと制御の有用性検証には実験が必要不可欠であるが、UVMS に関してはこれまで実験的研究はほとんど行われていないのが現状である。

本論文では、将来の海洋、湖沼などの実環境下で運用可能な水中作業用ロボットの開発を目指した、UVMS の制御法開発および実験による開発制御法の有用性検証を研究目的とする。本論文で提案する制御法は、ベースおよびマニピュレータ手先の位置・速度誤差に基づいてベースおよび関節の加速度制御入力を直接決定する、分解加速度制御法である。一般的なロボットマニピュレータに対する分解加速度制御法は運動学を基本としており、これまで水中ロボットへの適用例はない。本論文では、運動学関係のみではなく流体力の影響を含む運動量方程式も考慮した、UVMS に対する分解加速度制御法を提案する。さらに、2 リンクマニピュレータを搭載した水中ロボットを用いた実験により、提案制御法の有用性を示す。

本論文の構成は次のとおりである。

第1章では、本研究の背景および関連する従来の研究について概説し、本研究の位置づけおよびその構成について述べた。

第2章では、UVMS に対する分解加速度制御法の有用性確認の第一歩として、ロボットベースに推進機構が実装されておらず、かつ、重力・浮力の影響を受けない、水平2次元面内で運動する2リ

リンクマニピュレータを搭載した水中ロボットの制御法を提案する。まず、分解加速度制御法開発に必要な運動学、運動量を定式化するとともに運動方程式を導出する。つぎに、マニピュレータ手先位置のみを制御する分解加速度制御法を提案する。さらに、導出した運動方程式の妥当性をシミュレーションと開ループ実験との比較により示すとともに、制御実験により提案制御法の有用性を示す。

第3章では、第2章で得られた結果に基づき、推進機構であるスラストをロボットベースに実装し、鉛直2次元平面内で運動する2リンクマニピュレータを搭載した水中ロボットに対する分解加速度制御法を提案する。まず、ロボットに作用する流体抗力の3次元モデルおよび対象とする水中ロボットの数学モデルを導出し、ロボットベースとマニピュレータ手先を同時に制御可能な分解加速度制御法を提案する。つぎに、ロボットベースに作用する流体力のモデル化誤差を外乱として取り扱う外乱補償制御法を提案する。さらに、スラストモデルを実験により求めるとともに、分解加速度制御実験および外乱補償制御実験を行い、提案制御法の有用性を示す。

第4章では、一般にディジタルコンピュータがコントローラとして使用されることを考慮し、離散時間分解加速度制御法を提案する。まず、3次元空間で運動する水中ロボットの数学モデルを導出するとともに、離散時間系の分解加速度制御法を提案する。つぎに、第3章で提案した外乱補償制御法は離散時間制御系にも簡単に適用可能であるので、ここでは、マニピュレータの特異姿勢を回避する一方法を提案する。さらに、第3章で用いた水中ロボットによる基本制御法および特異姿勢回避法の適用実験により、離散時間制御法が第3章の連続時間制御法と同等の制御性能を有するとともに、特異姿勢回避法が有用であることを示す。

最後に第5章では、本研究によって得られた結果をまとめる。

## 学 位 論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

地表の約7割を占める海洋は、海底油田採掘用プラットフォームやメガフロートなどの海洋構造物建設、また、通信用海底ケーブル設置が現在行われており、今後さらに開発が進むと考えられる。海洋は人間にとって極限環境であり、海洋構造物の保守点検などの作業を人間が直接行うことは非常に危険である。そのため、人間に替わって作業する水中ロボットの研究開発が行われており、マニピュレータを持たない探査用水中ヴィークルはすでに実用化されている。今後さらに海洋開発を進めていくためには、マニピュレータを持つ自律型水中ロボット (Underwater Vehicle-Manipulator System; UVMS) が必要不可欠である。そこで、UVMS のモデリングと制御に関する研究も行われているが、実験的研究はほとんど行われていないのが現状である。

UVMS の制御法は、水中ヴィークルの制御法で適用されている計算トルク法を基本としたもの以外これまで提案されていない。UVMS は地表などに固定した座標系 (固定座標系) に関するマニピュレータ手先の位置・姿勢角を制御しなければならない。しかしながら、UVMS の計算トルク法は、それらの目標値に対応した加速度を、幾何学的関係に基づいてマニピュレータ関節の目標角加速度に変換し、関節角加速度の目標値と計測値の誤差に基づいて制御入力を求める、間接的な制御法であると考えられる。

計算トルク法は、ベースが固定された地上用マニピュレータに対して最初に提案された制御法である。地上用マニピュレータに対しては、マニピュレータ手先の目標値と計測値の誤差に基づいて関節目標値を求める、分解加速度制御法も提案されており、手先に対して直接的な制御法である。しかしながら、UVMS に対する分解加速度制御法はこれまで提案されていない。本研究は、以上の点を考慮し、UVMS の分解加速度制御法を提案するとともに、これまでほとんど行われていなかった実験により提案制御法の有用性を検証したところに意義がある。

筆者は、まず、UVMS に対する分解加速度制御法開発の第一歩として、水面上で運動し、マニピュレータ関節にのみアクチュエータを有する2リンク水中ロボットに対して、流体力を含んだ運動方程式の導出および分解加速度制御法を提案している。また、導出した運動方程式の妥当性を開ループ実験との比較により示すとともに、運動量も考慮した分解加速度制御法の有用性をマニピュレータ手先の制御実験により示している。

著者は、つぎに、推進機構であるスラストをロボットベースに実装し、鉛直2次元平面内で運動す

る、2 リンクマニピュレータを搭載した水中ロボットに対する分解加速度制御法を提案している。ロボットに作用する流体抗力の3次元モデルおよび対象とする水中ロボットの数学モデルを導出するとともに、ベースとマニピュレータ手先を同時に制御可能な分解加速度制御法の有用性を制御実験により示している。さらに、ベースに作用する流体力のモデル化誤差を外乱として取り扱う外乱補償法を提案するとともに、提案法の有用性を制御実験により示している。

著者は、さらに、一般にデジタルコンピュータがコントローラとして使用されることを考慮し、離散時間系分解加速度制御法も提案している。また、連続時間系で提案している外乱補償制御法は離散時間制御系にも簡単に適用可能であるので、新たに、マニピュレータの特異姿勢回避法を提案している。各種制御実験より、離散時間制御法が離散時間系制御法と同等の制御性能を有することを示すとともに、特異姿勢回避法が有用であることを示している。

以上要するに、本研究で提案している UVMS の分解加速度制御法は有用性があり、海洋工学・ロボット工学・制御工学において寄与するところ多大である。よって、本論文は博士(工学)の学位論文に値するものと認める。

なお、本論文に対して審査委員から、①分解加速度制御法の水中ロボットへの適用例の有無、②連続時間系と離散時間系の制御性能の比較、③連続時間系で提案されている外乱補償法の離散時間系への適用可否、などについて質問がなされたが、著者より適切な回答がなされた。また、公聴会においても種々の質問がなされたが、いずれも著者から適切な回答がなされ、質問者の理解が得られた。