

無人潜水機の水中ドッキングに関する研究

長崎大学大学院工学研究科
内堀 洋

無人潜水機には、自律的に水中を巡航する自律型無人潜水機 (AUV: Autonomous Underwater Vehicle) と、有線により水上母船から遠隔操縦される遠隔操縦型無人潜水機 (ROV: Remotely Operated Vehicle)がある。ROV は潜水士に代わって多くの海洋産業に広がりを見せている。一方、AUV は広範囲の海底を探索する優れた能力を有するが、未だに AUV の産業利用は限定的である。その理由の一つに、AUV の行動時間が内蔵電池のエネルギー量で制限されており、水上母船からの面倒で危険な海上作業である投入と揚収を何度も繰り返さなければならないことがある。このため、この制約を解決するために、AUV の水中ドッキングに関する研究を行った。これまで種々のドッキング方法が研究されてきているが、本研究では、ROV ドッキングステーション方式を構築した。この方式では、AUV を捕捉するドッキング装置を下部に備えた ROV ドッキングステーションを水中待機させ、AUV は ROV ドッキングステーションに接近し、ROV の直下で静止し、ホバリングを行う。ROV ドッキングステーションは静止している AUV に遠隔操縦で最終近接し、ドッキング装置を用いて AUV を捕捉し、非接触水中充電装置を用いて充電を行う。本研究は、このコンセプトに基づき、AUV と ROV ドッキングステーションのプロトタイプを実際に試作し、海上試験まで実施した。本論文では、特に、AUV 側のドッキング技術とホバリング技術に焦点を当てている。

第1章で、本研究の背景、目的について触れ、本研究と他の研究との関係を明らかにしている。

第2章で、この研究のために開発された AUV と ROV ドッキングステーションの概要について述べる。

第3章は、水中ドッキング運用について述べており、3.1章では、AUV の全体的な運用シーケンスの分析を行い、AUV 水中ドッキングを用いた利点を明らかにしている。3.2章ではドッキングシーケンスの分析をさらに詳細化した。

第4章で AUV のホバリング技術を示す。これはこのドッキング運用のために最も重要な技術であるだけでなく、将来の AUV 研究のためにも有益であるので、本論文の多くのスペースを費やした。

4. 1章から4. 3章まで、一般化された形で、流体力などの作用力を含めた運動方程式、アクチュエータとそのモデリング、センサとそのモデリングを取り上げた。4. 4章では、研究に用いた AUV の詳細モデルを示す。この AUV は、元々単軸推の巡航型 AUV であり、本研究のために、サイドスラストを合計 8 基追加してホバリング性能を向上させたものである。4. 5章に AUV の先進制御システムを示す。本論文では制御則として、MPC (Model Predictive Control) を、接近時とホバリング時の両方の位置・姿勢制御に適用した。AUV の方程式の運動方程式は非線形である。また、アクチュエータは非線形特性を持つ。これらの非線形性をそのまま MPC に適用すると計算負荷の増大を招き、CPU 能力が制限されている AUV 制御には適していない。そこで、本研究では LPV (Linear Parameter Variables) 法を用いて運動方程式を線形近似した。LPV-MPC とは、各時間ステップで方程式を定数係数行列で近似し、新しい時間ステップでこの行列を更新する手法である。さらにアクチュエータ特性を除去するために LPV-MPC は仮想力とモーメントを出力するようにし、これらを、QP (二次計画法) 問題ソルバである TA (Thrust Allocation) アルゴリズムによって、各アクチュエータへの指令値として割当てられる。QP ソルバは線形な等式および不等式の制約条件の下で、二次方程式を用いた多変数最適化問題に対する解放の一つである。なお、MPC を AUV に適用した他の研究では、計算負荷を最小化するために、例えば水平面のみ自由度を低減した例が多いが、本研究では、完全な 6 自由度制御として適用した。4. 6章に経路計画について示す。経路計画は 2 段構成として構築した。前段が WG (Waypoint Generator) であり、後段が OP (Optical Planner) である。WG は 3. 2章で導出したシナリオに基づき、次に AUV が向かうべきウェイポイントを出力する。OP は現在位置とウェイポイントを補間する連続的な指令値を出力する。OP では、2つの違う条件を考慮した。一つは潮流の下でコース角を最適化するものであり、もう一つは常にセンサ視野中心に目標を捉えるために、コース角と横方向速度の両方を制御するものである。前者は接近フェーズでサイドスラストの消費電力を最小化するために使用され、後者は ROV に最も近接したフェーズで使用される。4. 7章では OP に用いられる潮流速度の推定アルゴリズムを示す。このアルゴリズムは、TA から出力されるアクチュエータ指令値と AUV センサにより測定される AUV 運動を用いて、Kalman フィルタで潮流を推定するものであり、地球固定座標系での潮流速度を推定するように構成しているため、AUV がそのコース角を変化させたときでも、継続して潮流推定できることに特徴を有している。4. 8章及び4. 9章では、これらの LPV-MPC-TA 制御器、WG、OP 経路計画器、潮流推定器のシミュレーションモデルと、シミュレーションによる評価結果を示す。

最後に、5章として、大村湾で実施した水中ドッキング試験の結果を述べた。