学位論文題名

ウォータージェット推進型水中ビークルの 運動に関する研究

学位論文内容の要旨

[研究の背景と目的]

地上資源の枯渇が叫ばれている現在、海は人類の共有財産としてその持続的な利用を地球規模で模索しなければならない状況にある。危険と莫大なコストの伴う海中資源や生物量の調査において、様々な水中ロボットが開発され、人間の役割に代わる手段として最近フィールドで活用され、その成果をあげている。

水中ビークルは水中で3次元運動を行い調査や航行を行う。そのため水中ビークル本体にはビークルを前進させる推進装置が装備されており、それに加え水平面のみならず水深の制御を行う運動制御装置を備えている。

まず、水中ビークルの推進システムにおいては、前述のように推進装置がビークル本体から外に突き出したプロペラ方式、胸鰭・尾鰭方式が多いが、海中環境を調査する際、網や索といった障害物に絡まる危険性のみならず推進器による巻き込みそして複雑な機構など多くの問題を抱えている。

運動の制御においては、舵やプロペラの後流の向きを変える方法により水平面の運動制御を行い、水深制御には昇降舵を用いて行うシステムがMITのOdysseyをはじめ数多くのビークルのシステムとして構成されている。ただし、このような装置は定点保持などビークルが前進速度を持たない場合運動制御ができない他に、前述の推進装置のように大きな突起物となり衝突などで損傷された場合運動制御機能を失い、大変危険な状態になりかねない。

自律型水中ビークルはケーブルがなく、可動範囲も広く、人間が近づくことのできない海域で入力されたプログラム通り、調査や研究データの収集を行うが、ビークルの推進装置としてプロペラや方位角制御のための舵といった突起物があるため、事故が絶えず、漁網や索のある海域や海藻が茂った海域での使用には制限がある。

以上の背景をもとに本研究ではウォータージェットによる推進制御システムを持つ自立型水中ビークルを考案し、高い操縦性を持つ水中ビークルの開発を目的として研究を行った。

[方法及び内容]

開発しようとするビークルの運動範囲を通常の直進、上昇、下降、回頭のみならず、その場回頭、横移動などの操縦が可能な高効率な海中調査探査機として設定し、それに見合った実験範囲を決め、拘束模型実験を行った。得られた操縦流体力よりシミュレーション計算を用いて本水中ビークルの運動を予測した。またシミュレーションの有用性を確認するため自走実験を行い、シミュレーション計算と自走実験から得られた実測値を比較・検討に取り組んだ。

本論文の構成は以下のとおりである。

第1章では様々な水中ビークルをオペレーティング方法と推進方法により水中ビークルを大別してその特徴を説明し、現在海洋研究や調査で活躍している水中ビークルの外、まだ実現はないものの新しいプラットフォームとして期待できる研究ロボットである生物模倣型水中ビークルのレビューを述べる。第2章では既存の水中ビークルの制約を解決するため考案、研究された本ウォータージェット制御型水中ビークル(以下 WJ 型水中ビークル)の将来的なコンセプトを紹介し、新しいプラットフォームとして開発をする上で行ってきた研究ステップをフローチャートと共に紹介する。第3章では本 WJ 型水中ビークルに働く操縦流体力を水中ビークル本体に作用する流体力とウォータージェット(以下 WJ)噴射による流体力に大別して紹介する。WJ による流体力(以下駆動力)においては各噴射口から噴射した推力がビークルの本体との干渉で変化する実験結果を述べ、章の最後にそのモデル化について述べる。第4章には、3章で解析してモデル化した操縦流体力を用いて運動方程式を逐次計算し、本 WJ 型水中ビークルの運動推定シミュレーションを行った結果について述べる。第5章では4章で述べた水中ビークルの運動推定結果が妥当であるかを検証するため自航装置を模型に搭載し、自由航走試験を行い、その結果から本 WJ 型水中ビークルの運動特性を確認する他、シミュレーション計算結果と比較を行うことにより数学モデルによるシミュレーションの推定精度を検討する。第6章には第5章でその妥当性が確認したシミュレーションツールを用いてこの種のビークルの最適なオペレーション法を探り、これからの更なる開発に向けて検討を行う。シミュレーション手法は本水中ビークルの運動推定ツールとしてこの種のビークルの開発に資することができ、本水中ビークルを評価や比較するために自走実験の代わりに用いることが期待できる。最後に第7章には本研究の総合結論を要約する。

[結論及び考察]

1) ビークルの運動によって本体に作用する流体力について

試験水槽でビークル本体の直進状態を含む斜航試験、および CMT といった拘束模型実験を行い、ビークルの運動によって本体に作用する流体力特性について明らかにした。この流体力特性を用いてビークルの運動特性を推定するには、この特性を数学モデルで表現する必要がある。本研究では、芳村の cross-flow モデルを使用することにより、本ビークル本体に作用する流体力を広範な斜航角と旋回角速度に対して表現することができた。また、直進操縦性能(保針性能)を向上させる目的でサイズの異なるフィンに船尾に付けることとし、そのサイズの検討を行った。解析した流体力のスタビリティレバーの結果から、進路安定性が確保でき、旋回性能にも障害にならない(1/2)サイズフィンが有効であることがわかった。

2) 各噴射口の WJ の駆動力

本ビークルを推進・操縦する WJ の駆動力についてはビークルが停止状態における推力が基本となるが、ビークルの運動によってこれらがどのように変化するかを、ビークルに種々の運動を与えた状態で噴射実験を行うことにより駆動力を計測した。その結果、停止状態においても、水中ポンプから噴射口に導く管路の形状によって管路ロスが発生することによって駆動力が変化すること。また、ビークルの前進船速に対する駆動力の変化については、まずビークルを前進駆動する後方噴射による駆動力の前後方向の力は、運動量理論にほぼ従って前進速度比に比例して減少する。また、船尾右噴射および、船首右噴射の横方向の駆動力(横力、回頭モーメント)は前進速度比に対して複雑に変化する。特に船首右噴射の横力は速度比の増加と共に減少し、さらに速度比が上がると反対方向の力となるが、これらを数値的にモデル化を行った。

3) 自走実験結果とシミュレーションの結果の比較

シミュレーションで推定した操縦性能の妥当性や有用性を確認すると共にシミュレーション計算の推定精度を確認した。その結果、

- ビークルの深度制御にはビークルの船首・船尾に搭載した圧力計を用い、前後の深度が目標深

度となるよう上下方向のウォータージェットポンプを on-off 制御したが、このような簡単な制御でも、一定の水深を保持した所定の垂直運動を実現できることが確認できた。なお、水平面内の運動計測に際しては、ビークルの平面運動をカメラで連写し、ビークル上部に取り付けた3個のマーカーの画像解析を連続的に行うことによって時々刻々の平面運動を計測できる方法を構築した。

- ビークルの重心をできるだけ下げ、浮心をその上部に配置して縦揺れに静的復原力を持たせる方法は、動的な安定性を確保できる他、ピッチ角の制御も容易になる。
- 小型水中ポンプを複数ビークルに搭載し、これらを操作することによって、ほぼ任意の運動が実現でき、ビークルの前進速度が大きい場合のみならず、低速時でビークルが横移動、その場旋回に近い運動まで精度良く推定可能なことが確認できた。

4) 高度な運用方法の検討

実際に行うことが困難な本ビークルの水平面内の制御およびスパイラル状に降下する3次元空間の運動についてシミュレーション手法でその運動を検討した。具体的には平面噴射口と垂直面噴射口の組み合わせることによってビークルをスパイラル状に降下させ、3次元運動を実現した。その結果、本ビークルは上下左右にある複数の噴射口からウォータージェットを噴射することによって3次元運動が可能であることがわかった。

5) 本水中ビークルの実用化に向けての展望と課題

本水中ビークルの実験ではそれぞれの噴射口に水中ポンプをつないで複数の水中ポンプを on-off することによって3次元の制御を検討した。しかし、水中ビークルには内部容積が限られているため、当初の構想のように一つのポンプで水流を各噴射口に供給し、各々噴射口に電磁弁を設けることによって省スペース、省電力で制御できることが期待できる。また、本研究では針路安定にする目的で固定の船尾フィンを設けたが、直進時と作業時で船尾フィンのサイズを可変にできるような装置を開発することによって様々な環境に対応できることも期待される。更に、鉛直方向の航行距離が水平移動距離と同じオーダーになる場合には、バラスト投下装置やビークル本体の揚力特性を利用した垂直降下時の水平移動への検討も行う必要があると考えられる。

以上のことから、WJ 駆動力およびビークル本体の流体力に基づいたシミュレーション計算を用いることによってこの種のビークルの更なる開発の基礎研究として大いに役に立てることができると考えられる。本ビークルはまだ実験やシミュレーションでこれからのシステムを検討している基礎段階であるが、完成すれば自律型無人ロボットの一つの形態を確立できると期待できる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 芳 村 康 男
副 査 教 授 木 村 暢 夫
副 査 教 授 藤 森 康 澄

学 位 論 文 題 名

ウォータージェット推進型水中ビークルの 運動に関する研究

海洋の環境や生物資源の調査の他、漁業生産においても、水中ロボットによる沿岸養殖設備の設置や保守などに水中ビークルの活用が期待されている。しかし水中ビークルの操縦・推進システムについてはほとんどがプロペラのスラスターによる推進方式であり、漁場等の海中では網や索に絡まる危険性を常に抱えている。昨今では海洋生物の遊泳形態を参考にした、尾ビレ推進方式、胸鰭推進方式、またアオリイカやシャコを真似た推進方式なども研究が進められているが、いずれも推進装置が外部に突出している点に変わりなく、網や索に絡まる危険性は避けられない。

本研究では水中ビークルの新しい推進・制御システムとしてウォータージェットによる駆動システムを考案し、この方式による水中ビークルの運動性能を明らかにすることによって、実用化の可能性を探ることとした。具体的には、開発しようとするビークルの運動範囲を通常の直進、上昇、下降、回頭のみならず、その場回頭、横移動などの操縦が可能な水中ビークルと設定し、それに見合った実験範囲を決め、拘束模型実験を行った。得られた操縦流体力よりシミュレーション計算を用いて本水中ビークルの運動を予測した。また、これらのシミュレーションの有用性を確認するため自走実験を行い、シミュレーション計算と自走実験から得られた実測値を比較・検討を行った。その主な研究成果は以下のとおりである。

1. ウォータージェット推進方式による水中ビークルの基本コンセプトの構築

既存の水中ビークルの問題点を要約し、これらを解決するためにウォータージェット制御型水中ビークルの基本的なコンセプトを検討した。具体的には、水中ビークルを回転楕円型とし、ウォータージェットの噴射口をビークルの前後方向、船首と船尾には上下・左右方向に計 10 個を設け、時間制御によりウォータージェットを制御して前進のみならず、方向・姿勢制御などを自在に行う方式を開発した。

2. 水中ビークルに作用する流体力のモデル化

ウォータージェットによる水中ビークルの運動、操縦性能を把握するには直接模型実験を行う方法もあるが、流体力特性を明らかにすることによってシミュレーション計算を行う方が種々の条件に対する検討が可能になる。このため、水中ビークル本体に作用する流体力とウォータージェット噴射による流体力に大別して流体力を詳細に計測し、種々のビークルの運動あるいは制御パラメータに対する複雑な流体力特性をモデル化することができた。

3. 自走模型試験によるシミュレーションのバリデーション

流体力特性をモデル化し、シミュレーション計算した運動が妥当であるかを確認するため、代表的な

運動について、実際に自走模型試験を試みた。水平面内の運動、垂直面内の運動などに限られた状態ではあるが、こうしたビークルの運動を実現し計測する施設が十分無い本学において、種々の計測方法を考案しながら実験を成功させた。これらの実験結果と、シミュレーション結果を比較検討した結果、シミュレーション計算結果が妥当であることを確認した。

4. 水中の3次元操縦運動の検討

妥当性を確認したシミュレーションツールを用いて、この種のビークルの最適なオペレーション法を探り、これからの更なる開発に向けて検討を行った。シミュレーション手法は本水中ビークルの運動推定ツールとしてこの種のビークルの開発に資することができ、本水中ビークルを評価や比較するために自走実験の代わりに使用できることを明らかにした。

以上の研究成果より審査員一同が評価した点は以下のとおりである。

1) ビークルに作用する流体力のモデル化について

ビークル本体の直進状態を含む種々の運動に対する流体力特性を、従来の運動・制御パラメータによる多項式モデルではなく物理的に明確な cross-flow モデルを適用することにより、本ビークル本体に作用する流体力を広範な斜航角と旋回角速度に対して表現できることを示した。また、本ビークルを推進・操縦するウォータージェットの駆動力についてはビークルが停止状態における推力が基本となるが、ビークルの運動によってこれらが変化するメカニズムをモデル化できたこと。

2) 自走実験によるシミュレーション計算の確認

シミュレーション計算によって、本水中ビークルの運動性能が明らかとなり、将来水中ロボットの一つの形態として多に期待できること。また、シミュレーションの妥当性や有用性を確認するため、困難な自走模型実験を実施して定量的なバリデーションを詳細に行っていること。特に、

- ビークルの深度制御にはビークルの船首・船尾に搭載した圧力計を用い、前後の深度が目標深度となるよう上下方向のウォータージェットポンプを on-off 制御したが、このような簡単な制御でも、一定の水深を保持した所定の垂直運動を実現できることが確認できた。なお、水平面内の運動計測に際しては、ビークルの平面運動をカメラで連写し、ビークル上部に取り付けた3個のマーカーの画像解析を連続的に行うことによって時々刻々の平面運動を計測できる方法を構築したこと。
- ビークルの重心をできるだけ下げ、浮心をその上部に配置して縦揺れに静的復原力を持たせる方法は、動的な安定性を確保できる他、ピッチ角の制御も容易になること。
- 小型水中ポンプを複数ビークルに搭載し、これらを操作することによって、ほぼ任意の運動が実現でき、ビークルの前進速度が大きい場合のみならず、低速時でビークルが横移動、その場旋回に近い運動まで精度良く推定可能なことが確認できたこと。

3) 高度な運用方法の検討

実際に行うことが困難な本ビークルの水平面内の制御およびスパイラル状に降下する3次元空間の運動についてシミュレーション手法でその運動を検討した。具体的には平面噴射口と垂直面噴射口の組み合わせることによってビークルをスパイラル状に降下させ、3次元運動を実現した。その結果、本ビークルは上下左右にある複数の噴射口からウォータージェットを噴射することによって3次元運動が可能であることがわかったこと。

以上のことから、本研究で開発したウォータージェットで推進・駆動する本水中ビークルはまだ基礎的な開発段階であるが、将来は無人ロボットの一つの方式として期待できること。また、本研究で開発した流体力モデルの考え方は、各種の水中物体の運動シミュレーションや開発研究に応用することができ、水産・海洋における工学の発展に多に資するものである。よって、審査員一同は申請者が博士(水産科学)の学位を授与される資格のあるものと判定した。