

令和元年6月24日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06903

研究課題名(和文) 巻き癖・遊び・捻りを考慮したテザーケーブル解析法とROVの運動推定法に関する研究

研究課題名(英文) Numerical Study on the motion estimation of ROV with tether cable considering cable's mechanical property

研究代表者

鈴木 博善 (Suzuki, Hiroyoshi)

大阪大学・工学研究科 准教授

研究者番号：00252601

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、テザーケーブルの運動推定法の高度化のため、巻き癖、遊び、捻りを考慮できるケーブルの運動推定法の構築、および、オープンフレーム型的水中探査機のCFDによる流体力微係数推定精度の確認、向上を目的として研究を行った。

ケーブル運動推定に関しては、ANCFというFEMの一種をベースとし、計算プログラムに巻き癖、遊び、捻りの影響を導入した。結局、これらは、初期変位、ケーブルの材料特性である異方性および非線形性であったが、曲げ剛性を物理的に正しく変化させることにより、ANCFに、組み込むことができた。

一方、オープンフレーム型的水中探査機の運動推定は、なお、工夫の余地があることもわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果を、テザーケーブルを有する水中探査機の運動推定に適用することにより、より正確な運動の予測が可能となる。これは、より高精度な水中探査機の運動シミュレータの構築を目指すことが可能になる。このようなシミュレータがあれば、水中探査機のオペレータの訓練にも用いることができるであろうから、今後我が国で盛んに行われるであろう、海底の鉱物資源開発であるとか、地震発生域の海底調査等が促進される可能性がある。さらに、水中探査機的设计時に本研究の成果を援用すれば、水中探査機が目的に相応しい運動が出来るかを事前に検討できるから、水中探査機の開発にも有用である。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research was to enhance the motion estimation method of ether cable by considering curl, play and twist of the cable ,and to confirm and improve estimation accuracy of hydrodynamic force coefficients of open-frame type underwater vehicle.As for cable motion estimation, based on a kind of FEM called ANCF, the effects of initial curl, play and twist were introduced on the computer program. In the end, these characteristics were initial displacement, anisotropy and non-linearity that are material properties of the cable, but could be incorporated into ANCF by physically correct bending stiffness.On the other hand, it was also found that the motion estimation of the open frame underwater explorer still has room for ingenuity.

研究分野：海洋工学

キーワード：テザーケーブル 非線形性 異方性 初期変形 ANCF CFD 流体力微係数

1. 研究開始当初の背景

近年、海洋資源開発およびこれに対する調査の機運が高まり、水中探査機が盛んに建造されるようになった。これらの多くは、自律型水中無人探査機（AUV）と呼ばれるものであるが、資源開発等、実際の作業が始まれば、遠隔操作水中無人探査機（ROV）が活躍するものと思われる。このような作業では、オペレータが意のままに ROV をコントロールできること、ROV にはその要求に応える運動性能や機能を有することが重要であると考えられる。ROV の運動は、テザーケーブルの挙動に大きく依存し、これまで、ROV の運動を正確に予測することは困難であった。ここで、ROV の運動性能の推定あるいは運動シミュレータに着目すると、これまで ROV の運動推定その他、有索の水中探査機の運動およびテザーケーブルの挙動に関する研究は、すでに多く行われてきている。それに用いる方法の多くは、水中探査機の流体力性能に関して、運動方程式と流体力微係数を、既存の機体あるいは似た形状の流体機械で機知となっているものを流用したり、そこから多少の変更を加えたりする程度のもが多く、一方、テザーケーブルの挙動推定には、ランプドマス法を適用することが多いようである。

これに対し、これまで大阪大学では、特に、巡航型の AUV に関する抵抗性能や運動性能の推定・性能向上について、CFD を援用した手法を開発してきた。最近では、ホバリング型（作業型）AUV に、これら性能推定法を適用し、推進性能や運動性能の向上を基礎とした最適機体形状開発法の開発に向けた研究を行っている。一方、テザーケーブルの解析に関しては、以前、ランプドマス法を用いたテザーケーブルの挙動推定による ROV の運動推定を行った。昨年度は、解析法を ANC 法(Absolute Nodal Coordinate formulation : ANCF)に変更しての ROV の運動推定を実施した。ANC 法は、近年、大変形を伴う線状物体の解析法として開発された。ANC 法は、その名の通り、節点変位を絶対座標で記述することが大きな特徴となっており、このことが大変形時の解析を可能としている。ANC 法は、一種の FEM である。節点間に適当な梁を考えることで、ケーブルの撓みや伸縮、あるいは捻りを表現することができる。大阪大学では、この ANC 法のうち、捻りを考慮しない場合の解析法をテザーケーブルの挙動解析に適用し、一応の成果を得た。本研究では、これらの技術を用いた上で、それぞれの推定精度を向上させることで、ROV の運動推定法を開発しようとするものである。

2. 研究の目的

上記をまとめ、本研究の目的を整理する。

すなわち、

- ・巻き癖、遊び、捻りおよび伸縮を考慮したテザーケーブルの挙動推定法の構築、
- ・CFD を用いた水中探査機機体性能推定法の高度化・高精度化
- ・計算モデルの簡略化法ガイドライン作成

これらを統合して ・テザーケーブルを有する水中探査機の運動推定法の構築を行うことを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

< ANC 法の拡張 >

1) 捻りの考慮

すでに定式化されている、捻りを考慮した ANC 法のプログラムを作成する。これは、現有のプログラムを拡張する。

2) ケーブルの材料力学的・機械的性質の計測

前述のように、テザーケーブルは、一般に、巻き癖と遊びを有するので、これを表現できるよう数値モデルあるいは数式を構成する必要がある。このため、比較的小型の ROV での使用 4 種類のテザーケーブルの巻き癖や遊びを含む機械的性質を調査する。

3) ケーブルモデルの構築

前述のように、ANC 法では、基本的に通常の梁を基礎として理論が構築されている。一方で、テザーケーブルは、前述したように、巻き癖、遊びを有する。したがって、2) で得られた機械的性質を基に ANC 法に搭載できるようなモデルを作成する。

4) ケーブルモデルを用いたケーブル単独での運動解析および検証

3) で得られたケーブルモデルを ANC 法プログラムに組み込み、一様流中や上端を運動させる等の計算を行う。同時に、大阪大学船舶海洋試験水槽にて 2) で購入したケーブルを使って実験を行い、モデルの正当性を検証する。もちろん、この結果、実験と計算結果との間で不整合等が生じれば、2) 3) に戻って、再検討を行う。

5) ケーブルの巻き取り繰り出しシミュレーション法の構築

実際の ROV の運用では、初期的に一方的に繰り出し、回収時に巻き取るだけの場合もあるが、テザーケーブルを小刻みに巻き取ったり、繰り出したりすることもある。

ここでは、拡張した ANC 法のプログラムをさらに改良し、上記のケーブルの伸縮が表現できるよう、さらに拡張を行う。

< CFD による機体性能推定 >

6) CFD による機体推進性能推定法の精度確認・改善手法の検討

ここでは、主に、定常航行時の抵抗性能について考える。

今回使用を予定している CFD コードは、水中探査機メーカーに使用いただく観点から、これま

でシステムを構築してきた商用コードの FLUENT に加え、オープンソースコード openFOAM の使用を考えている。すでに FLUENT を運用しているメーカーは言うに及ばず、CFD コードを有さないがこれから使用してみたいと考えているメーカーには、openFOAM が使用できるようにすることを考える。

これらのソフトを用いて、定常航行時の計算精度の確認を行う。その後、計算格子に関して計算領域、最小メッシュ幅、メッシュの数を適宜変更、同時に乱流モデルを適宜変更して計算を実施する。かなりなケースとなると考えられるものの、この後の計算精度を左右する可能性があるため、確実に実施する。この上で、東京海洋大学取得の実験データとの比較において計算精度を評価し、適切な格子、乱流モデル等を選択する。この格子、乱流モデル等がこの後の標準とする。

7) CFD による数値強制動揺試験

CFD による PMM 試験 (強制動揺試験) での流体力と流体力微係数の計算精度の確認を行う。

6) で定常状態での計算格子について、計算領域、最小メッシュ幅、メッシュの数の観点から検討し、これらの具体的な数値を得ており、乱流モデルについても、どの乱流モデルが最も適切かを調査済みである。ここでは、これらを軸に、強制動揺を数値的に再現できる MDM (Moving Dynamic Mesh) の手法を用いる場合に、上記計算格子や乱流モデルが適切かどうかを再検討する。これで東京海洋大で取得されたデータとの比較において、精度不十分な場合は、ここでも適宜、格子を変更したり、乱流モデルを変更したりして、計算精度の検討を行う。変更があった場合は、5) に戻り定常運動時の計算精度の確認を行う。

8) 水中探査機のための機体形状数値モデルの簡略化手法の検討

6)、7) では完全な 3 次元 CAD データを元に、計算格子の生成を行い、詳細の機体のディテールまでを計算格子上で表現するが、本来的には、計算精度に有効でない小さな部品等を省略できる方が、計算コストを低減する点で有効である。しかも、本研究で用いる数値的な強制動揺試験は非定常計算であり、格子数を削減する効果は大きい。このような観点から、機体形状データを、系統的に簡略化し、この簡略化程度の計算精度への影響を調査する。

9) テザーケーブルを有する ROV の運動推定法の構築と検証実験

以上の研究、すなわち、テザーケーブル挙動推定法、および ROV の機体運動推定法を組み合わせ、テザーケーブルを有する ROV の運動推定法を構築する。

JAMSTEC 殿に適当な ROV を想定し、これの CAD データ、テザーケーブル等の情報から、この ROV の運動推定法を作成する。

4. 研究成果

< ANC 法の拡張 >

・ケーブルの機械的性質

ある ROV のテザーケーブルとして用いられている、ケーブルの機械的性質を測定した。テザーケーブルには、前述のように巻き癖 (初期変位) があり、これの方向を基準として、Fig.1 のように 4 つの方向から荷重を付加することで、片持ち梁試験を行った。

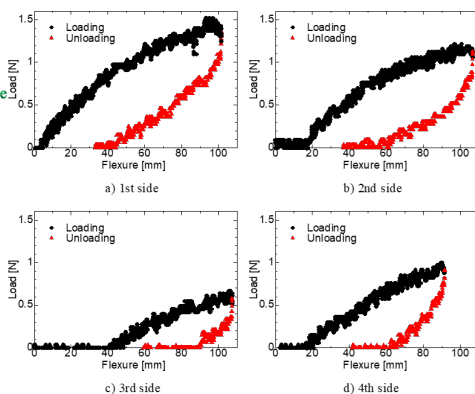
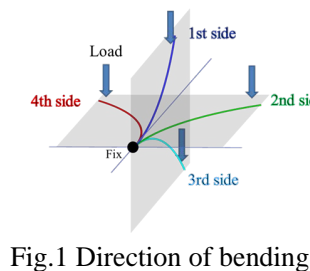


Fig.2 Relationship between displacement and load

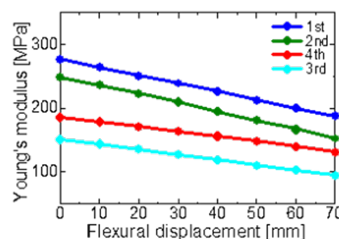


Fig.3 Young's modulus

この結果、Fig.2 のようにそれぞれの方向で、変位と荷重の関係が異なり、さらに、これから求めたヤング率は、Fig.3 のように線形関係になっていないことがわかった。

・ケーブルの水中挙動の計測

上記の結果を踏まえ、ケーブルの水中挙動を調査するため、先端に重錘を付けたケーブルを水中に吊り下げて曳航した。Fig.4 は、計測時の写真、Fig.5 は、これを画像生息計測したものである。なお、Fig.5 の 2 本の線は、初期変位の方向とその逆の方向にケーブルを設置した場合である。

この結果、曳航速度が大きくなるにつれ、ケーブルの変位が大きくなること、前記の機械的性質で明らかになったように、ケーブルの取り付け方向で変位が異なる異方性が見取れた。

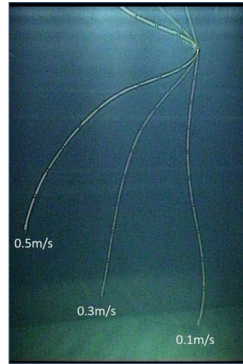


Fig.4 Photo of experiment

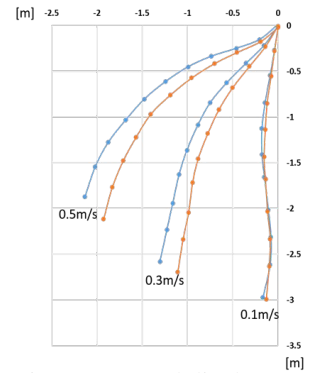


Fig.5 Measured displacement

・ケーブルの巻き癖、遊び、捻りのプログラムへの考慮

ケーブルの巻き癖は、初期変位をどのように計算法に組み込むかという問題、遊びは、ケーブルの機械的性質（異方性、たわみの非線形性）であることがわかった。一方、捻りは、すでに定式化されているものであった。これらを ANCF によるケーブル運動計算手法に取り入れた。まず、巻き癖については、ANCF プログラムに初期変位を強制変位として代入しておくことで、解決した。次に、異方性については、4 方向で異なる曲げ剛性を、変位方向に応じて案分することにより実現した。さらに、非線形性については、曲げ剛性を変位の関数として表現することにより、実現した。これによる計算の結果を Fig.6 に示す。

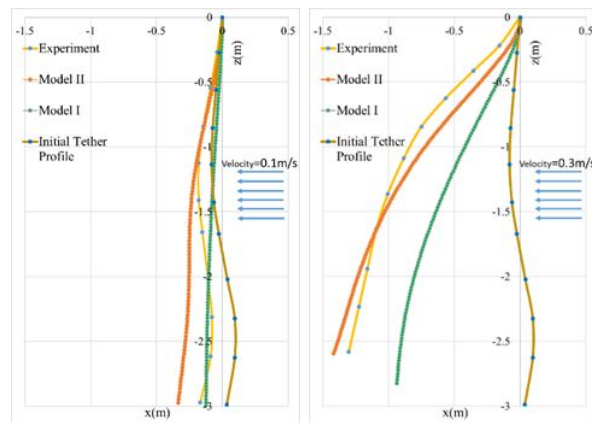


Fig.6 Computational results

さらに、捻りについては、定式化されているものをプログラム化し、組み込んだ上、Fig.7 の写真のように捻り方向の振動を計測し、Fig.8 に示すように計算結果と比較した。

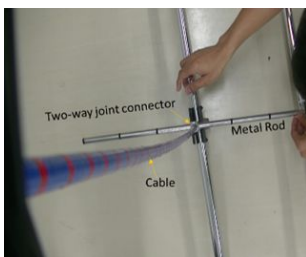


Fig.7 Torsional Oscillation test

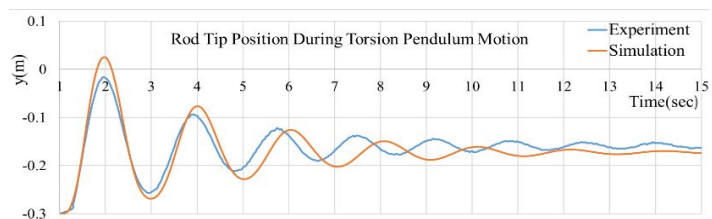


Fig.8 Computational and experimental results of torsional oscillation test

これらをまとめ、ケーブルの運動推定法を構築した。

< CFD による機体性能の推定 >

機体形状は、対象とする水中探査機とは異なるものの、同様にオープンフレーム構造を有する水中探査機について、乱流モデルやメッシュサイズを検討するため、定常状態の CFD 計算を行った。一例として、流体力の推定結果を示す

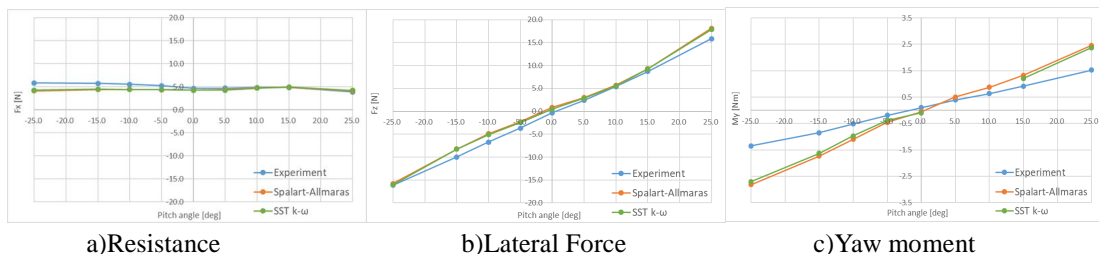


Fig.9 Hydrodynamic force distribution

この結果、Fig.9 に示すように、乱流モデルとしては、Spalart-Allmaras モデルが良好であることがわかった。紙面の都合上割愛するが、強制動揺時でも、良好な結果が得られた。残念ながら、計算モデルの簡略化法の明確な指針は得られなかった。

同様の方法を対象とする水中探査機について適用し、流体力微係数を同定し、運動方程式を構築し、機体の運動推定法を構築した。

<ROV とテザーケーブルの運動シミュレーション>

上記に示した、水中探査機の運動推定法とケーブルの運動推定法をまとめ、テザーケーブルを有する水中探査機の運動推定法を構築した。結果の一例を Fig.10 に示す。青線がテザーケーブル、緑が水中探査機の機体を示す。この図に示すように、テザーケーブルを有する水中探査機の運動推定法を構築できた。

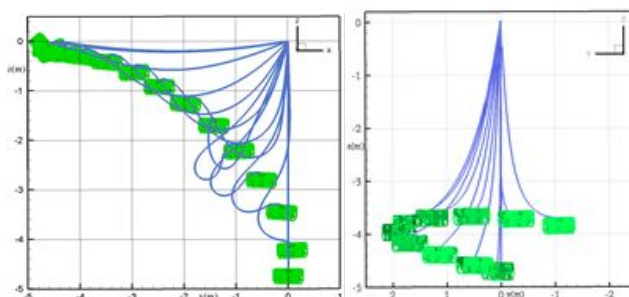


Fig.10 example of motion simulation

<ケーブルの巻き上げ、繰り出し>

最後に、ケーブルの巻き上げ、繰り出しシミュレーションについて述べる。Fig.11 は、ウィンチ、プーリーを有するシステムで、ケーブルの巻き上げを行うシミュレーションである。時間の進行に伴い、ケーブル（赤）が巻き上げられていることがわかる。

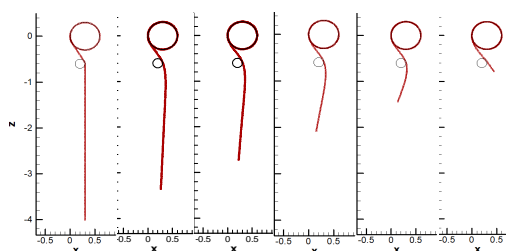


Fig.11 Draw-in simulation

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計7件)

・ Numerical Motion Analysis of ROV coupled with Tether Applying 24-DOFs Absolute Nodal Coordinate Formulation, Thant Zin Htun, Hiroyoshi Suzuki, et.al, Proceedings of ISOPE2019 ,1553-1560, 2019 年

・ オープンフレーム型水中探査機に働く流体力の簡易推定法に関する研究 鈴木博善ほか4名, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第27号, pp207-211, 2018 年

・ Numerical Motion Analysis of ROV Applying ANCF to Tether Cable Considering its Mechanical Property, Hiroyuki Suzuki et.al., Proceedings of the ISOPE2018,365-372, 2018 年

・ Numerical Study on Estimation of Hydrodynamic Performance for Open-Frame Underwater Vehicle using CFD, Hiroyoshi Suzuki et.al., Proceedings of the ISOPE2018, 432-438, 2018 年

・ Numerical Analysis of the Motion of ROV Applying ANC Method to the Motion of Tether Cable, Hiroyoshi Suzuki et.al, Proceedings of ISOPE2017, 447-453, 2017 年

・ ANC 法を用いたテザーケーブルの運動解析に基づく ROV の運動推定に関する研究, 鈴木博善,友辺裕人,高須一弘,井上朝哉,石渡隼也, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 2016 年

・ 水中探査機「おとひめ」の CFD を用いた流体力推定について, 鈴木博善ほか8名, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 2016 年

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕なし

6 . 研究組織

(1)研究分担者 なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 井上朝哉, 友辺裕人, 桑野麻子, 長井伊岐, 奥田耀介, 山添愛, 大田豊, 渡邊佳孝, Thant Zin Htun, 石渡隼也

ローマ字氏名: Tomoya Inoue, Hiroto Tomobe, Asako Kuwano, Yoshiki Nagai, Yosuke Okuda, Ai Yamazoe, Yutaka Ota, Yoshitaka Watanabe, Thant Zin Htun, Junya Ishiwata

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。